

# Schlussbericht



## SANitärRecycling ESCHborn (SANIRESCH)

Verbundprojekt gefördert durch das  
Bundesministerium für Bildung und Forschung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**giz**

universität **bonn**



**RWTH**AACHEN  
UNIVERSITY



**THM**  
TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

ROEDIGER VACUUM  
BILFINGER BERGER

**HUBER**  
TECHNOLOGY  
WASTE WATER Solutions

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderzeichen 02WD0947-52 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

**Das Verbundprojekt SANIRESCH besteht aus folgenden Partnern bzw. Teilprojekten:**

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH - 02WD0947

Universität Bonn, INRES - 02WD0948

RWTH Aachen, ISA & IfS - 02WD0949

Technische Hochschule Mittelhessen - 02WD0950

Roediger Vacuum GmbH - 02WD0951

HUBER SE - 02WD0952

**Weitere Informationen zum Projekt:**

SANIRESCH-Website:

[www.saniresch.de](http://www.saniresch.de)

SANIRESCH-Bilderportal:

<http://www.flickr.com/photos/gtzecosan/collections/72157623545998067/>

Tagungsband der Abschlusstagung:

[http://saniresch.de/images/stories/downloads/Tagungsband%20NASS-Tage/NASS-Tage\\_komprimiert-fuer-Onlinestellung.pdf](http://saniresch.de/images/stories/downloads/Tagungsband%20NASS-Tage/NASS-Tage_komprimiert-fuer-Onlinestellung.pdf)

Englische Factsheets mit den wichtigsten Projektergebnissen:

<http://saniresch.de/images/stories/downloads/Englische%20Factsheets%20NASS-Tage/Factsheets-Saniresch-en.pdf>

**Herausgeber:**

Dr.-Ing. Martina Winker, Christian Rieck

Sektovorhaben Nachhaltige Sanitärversorgung

Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5, 65760 Eschborn, Deutschland

Datum: 31.01.2013

# Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Schlussbericht des BMBF-Projekt SanitärRecycling Eschborn (SANIRESCH)		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Winker, Martina; Rieck, Christian; Arnold, Ute; Spoth, Katrin; Schürmann, Bettina; Montag, David; Pinnekamp, Johannes; Romich, Manfred; Schiele, Lisa; Wortmann, Christian; Röhrich, Markus; Heynemann, Johanna; Paris, Stefania; Netter, Thomas; Feicht, Martin; Walberer, Julian; Schlapp, Celine; Ruster, Christian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2012	
	6. Veröffentlichungsdatum 31.01.2013	
	7. Form der Publikation Bericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) <u>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH</u> , Sektorvorhaben Nachhaltige Sanitärversorgung, Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5, 65760 Eschborn <u>Universität Bonn</u> , INRES – Bereich Pflanzenernährung, Karlrobert-Kreiten-Str. 13, 53115 Bonn <u>RWTH Aachen</u> , Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen sowie Institut für Soziologie, Eilfschornsteinstr. 7, 52056 Aachen <u>Technische Hochschule Gießen-Friedberg</u> , Wiesenstrasse 14, 35390 Gießen <u>HUBER SE</u> , Industriepark Erasbach A1, 92334 Berching <u>Roediger Vacuum GmbH</u> , Kinzigheimer Weg 104 – 106, 63450 Hanau	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -	
	10. Förderkennzeichen 02WD0947, 02WD0948, 02WD0949, 02WD0950, 02WD0951, 02WD0952	
	11. Seitenzahl 233	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 184	
	14. Tabellen 49	
	15. Abbildungen 117	
16. Zusätzliche Angaben -		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 31.01.2013		
18. Kurzfassung Im Projekt SANIRESCH wurde untersucht und demonstriert, wie ein Urinentrennsystem in einem Bürogebäude eingesetzt werden kann. Das Projekt zeigte, dass die technische Realisierung nach heutigem Stand möglich ist. Nur bei den NoMix-Toiletten sowie der MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat)-Fällung bedarf es technischer Weiterentwicklung. Die gewonnenen Produkte Urin, MAP und Servicewasser sind hygienisch unbedenklich und erfüllen die landwirtschaftlichen Düngeanforderungen. Die Nutzerakzeptanz solcher Systeme im Gebäude ist, bis auf die NoMix-Toiletten, gegeben. Umfragen bei Landwirten und Konsumenten zeigten eine positive Einstellung bezüglich dem Einsatz solcher Düngemittel auch für die Lebensmittelproduktion auf. Die internationale Übertragbarkeit für die MBRs ist gegeben. Auch kann die Wirtschaftlichkeit des Systems unter den richtigen Randbedingungen bereits heute erreicht werden. Ausgenommen werden muss in beiden Aspekten die MAP-Fällung, welche vorher weiterer Entwicklung bedarf.		
19. Schlagwörter Neuartiges Sanitärsystem, NASS, Urin, Braunwasser, Grauwasser, Bürogebäude, Spültrenntoiletten, NoMix-Toiletten, wasserlose Urinale, Betrieb der NoMix-Toiletten, MAP-Fällung, Phosphorfällung, Phosphorrückgewinnung, Membranbioreaktor, Wartung und Betrieb, Permeat der MBRs, Flux, Permeabilität, Struvit, pharmazeutische Rückstände, landwirtschaftlicher Dünger, Hygiene, Nutzerakzeptanz, Akzeptanz Urin-basierter Dünger und Produkte, Wirtschaftlichkeit, Internationale Übertragbarkeit		
20. Verlag -	21. Preis -	

# Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title Final report of the BMBF projekt SanitaryRecycling Eschborn (SANIRESCH)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Winker, Martina; Rieck, Christian; Arnold, Ute; Spoth, Katrin; Schürmann, Bettina; Montag, David; Pinnekamp, Johannes; Romich, Manfred; Schiele, Lisa; Wortmann, Christian; Röhricht, Markus; Heynemann, Johanna; Paris, Stefania; Netter, Thomas; Feicht, Martin; Walberer, Julian; Schlapp, Celine; Rüster, Christian	5. end of project 31.12.2012	
	6. publication date 31.01.2013	
	7. form of publication Report	
8. performing organization(s) (name, address) <u>Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH</u> , Sustainable Sanitation programm, Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5, 65760 Eschborn <u>University of Bonn</u> , INRES – Department of Plant Nutrition, Karlrobert-Kreiten-Str. 13, 53115 Bonn <u>RWTH Aachen</u> , Institute for Environmental Engineering, Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52074 Aachen as well as Institute of Sociology, Eilfschornsteinstr. 7, 52056 Aachen <u>THM University of Applied Sciences</u> , Wiesenstrasse 14, 35390 Gießen <u>HUBER SE</u> , Industriepark Erasbach A1, 92334 Berching <u>Roediger Vacuum GmbH</u> , Kinzigheimer Weg 104 – 106, 63450 Hanau	9. originator's report no. -	
	10. reference no. 02WD0947, 02WD0948, 02WD0949, 02WD0950, 02WD0951, 02WD0952	
	11. no. of pages 233	
	12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	
13. no. of references 184		14. no. of tables 49
15. no. of figures 117		
16. supplementary notes -		
17. presented at (title, place, date) Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany, 31.01.2013		
18. abstract The project SANIRESCH investigated and demonstrated the implementation of a urine diversion system in an office building. The project showed that the technical realisation with today's state of the art technology is possible. With regarding to the NoMix toilets as well as MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat) precipitation further technical developments are necessary. The products received, urine, MAP and service water, are hygienically non-hazardous and fulfill the agricultural requirements for fertilisation. The user acceptance of such systems in a building is granted, apart from the NoMix toilets. Surveys among farmers and consumers show a positive attitude concerning the usage of these fertilisers even for food production. The international adaptability for the membrane bioreactors is granted. Also the economic feasibility of such systems can be reached today under certain, favouring, conditions. The MAP precipitation has to be excluded from both aspects, as here further development is required.		
19. keywords New alternative sanitation system, NASS, urine, brownwater, greywater, office building, urine diversion flush toilet, NoMix toilet, waterless urinals, maintenance of NoMix toilets, MAP precipitation, phosphorus precipitation, phosphorus recovery, membrane bioreactor, operation and maintenance, permeate of MBRs, flux, permeability, struvite, pharmaceutical residues, agricultural fertiliser, hygiene, user acceptance, acceptance of urine based fertiliser, economic feasibility, international adaptability		
20. publisher -	21. price -	

# Inhalt

Verbundprojekt gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung .....	I
Berichtsblatt .....	III
Document Control Sheet .....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XV
Abkürzungen.....	XVII
1 Zusammenfassung des Gesamtprojekts.....	1
2 Kurzdarstellung.....	4
2.1 Aufgabenstellung .....	4
2.2 Voraussetzungen der Durchführung des Vorhabens.....	4
2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
2.4 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens .....	6
2.4.1 Haus- und Sanitärinstallationen.....	6
2.4.2 Anlagentechnik .....	6
2.4.3 Betrieb und Überwachung.....	8
2.4.4 Produktqualität .....	9
2.4.5 Landwirtschaftliche Produktion.....	10
2.4.6 Akzeptanz .....	11
2.4.7 Wirtschaftlichkeit .....	12
2.4.8 Internationale Übertragbarkeit.....	13
2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
3 Darstellung der Ergebnisse.....	15
3.1 Sanitär- und Hausinstallationen (Verantwortlich: Roediger Vacuum).....	15
3.1.1 Ziele der Projektkomponente .....	15
3.1.2 Material und Methoden .....	16
3.1.2.1 NoMix-Toilette und ihre Funktion .....	16
3.1.2.2 Betriebstagebuch .....	20
3.1.2.3 Wasserlose Urinale .....	22
3.1.3 Ergebnisse und Diskussionen .....	22
3.1.3.1 Produktverbesserungen .....	22
3.1.3.2 Auswertung des Betriebstagebuchs .....	25
3.1.3.3 Wasserlose Urinale .....	30
3.1.4 Fazit.....	30
3.2 Anlagentechnik (Verantwortlich: HUBER SE).....	33
3.2.1 Ziele der Projektkomponente .....	33
3.2.2 Material und Methoden .....	33
3.2.2.1 Urin .....	35
3.2.2.1.1 Aufbau der MAP-Fällungsanlage .....	35
Fällungsreaktor .....	35
Magnesiumoxid-Dosierer .....	36
3.2.2.1.2 Funktionsbeschreibung.....	37

3.2.2.2	Grauwasserbehandlung .....	39
3.2.2.2.1	Aufbau der Grauwasserbehandlung mittels MBR.....	39
	Siebelement.....	40
	Vorlagebehälter.....	41
	Membranbelebungsreaktor und Speicherbehälter für Permeat.....	41
3.2.2.2.2	Funktionsbeschreibung.....	43
	Siebelement.....	43
	Vorlagebehälter.....	44
	Membranbelebungsreaktor und Speicherbehälter für Permeat.....	44
3.2.2.3	Braunwasserbehandlung.....	45
3.2.2.3.1	Aufbau der Braunwasserbehandlung mittels MBR .....	45
	Braunwasservorreinigung.....	46
	Membranbelebungsreaktor .....	47
3.2.2.3.2	Funktionsbeschreibung.....	48
	Braunwasservorreinigung.....	48
	Membranbelebungsreaktor .....	49
3.2.3	Ergebnisse und Diskussionen .....	50
3.2.3.1	Anlageninbetriebnahme.....	50
3.2.3.1.1	Installation der Urinanlage .....	50
3.2.3.1.2	Installation der Grauwasseranlage.....	50
3.2.3.1.3	Installation der Braunwasseranlage .....	51
3.2.3.2	Anlagenoptimierungen.....	52
3.2.3.3	Betrieb.....	54
3.2.3.4	Wartung.....	55
3.2.3.5	Rückbau .....	56
3.2.4	Fazit.....	56
3.3	Betrieb und Überwachung (Verantwortlich: TH Mittelhessen).....	58
3.3.1	Ziele der Projektkomponente .....	58
3.3.2	Material und Methoden .....	58
3.3.2.1	Verfahrenstechnische Beschreibung des MAP-Fällungsprozesses .....	58
3.3.2.2	Betriebsweise der Membranbioreaktoren .....	59
3.3.2.3	Analyseverfahren .....	59
3.3.3	Ergebnisse und Diskussionen .....	60
3.3.3.1	Grundlegende Verfahrensparameter der MAP-Fällung.....	60
3.3.3.1.1	Stöchiometriefaktor $\beta$ .....	60
3.3.3.1.2	Sedimentationszeit .....	61
3.3.3.2	Kalkulation des Urinverbrauchs und der möglichen MAP-Menge bei Auslastung der MAP-Fällungsanlage .....	62
3.3.3.3	Bilanzierung des Fällungsverfahrens.....	63
3.3.3.4	Zusammensetzung der beiden Düngeprodukte: Urin und MAP .....	63
3.3.3.5	Betrieb der MAP-Fällungsanlage .....	65
3.3.3.6	Fällversuche mit unterschiedlichen Filtertypen .....	67
3.3.3.6.1	Vergleich verschiedener Filtermaterialien .....	67

3.3.3.6.2	Versuche zur Ursachenfindung der aufgestauten Filtersäcke .....	68
3.3.3.7	Betriebsstörungen an der MAP-Fällungsanlage.....	70
3.3.3.8	Analytik und Verfahrensparameter der Membranbioreaktoren.....	71
3.3.3.9	Flux und Permeabilität der MBR.....	75
3.3.3.10	Einordnung der Permeate nach Qualitätskriterien.....	77
3.3.4	Fazit.....	78
3.4	Qualität der Produkte / Urinlagerung (Verantwortlich: RWTH Aachen).....	80
3.4.1	Ziele der Projektkomponente .....	80
3.4.2	Material und Methoden .....	80
3.4.2.1	Nachweisverfahren für Pharmazeutika .....	81
3.4.2.2	Nachweisverfahren für Tenside .....	84
3.4.2.3	Nachweisverfahren für Standardparameter .....	85
3.4.2.4	Mikrobiologische Untersuchungen.....	85
3.4.2.5	Beschreibung der untersuchten Pharmazeutika .....	86
3.4.2.6	Urinlagerungsversuche bei unterschiedlichen pH-Werten.....	88
3.4.2.7	Bestimmung der Daphnientoxizität .....	89
3.4.3	Ergebnisse und Diskussionen .....	89
3.4.3.1	Lagerungsversuche mit Urin.....	89
3.4.3.2	Qualität des Produktes Struvit .....	96
3.4.3.3	Nachweis von Pharmazeutika und Tensiden in den Grau- und Braunwasserbehandlungsanlagen.....	101
3.4.3.4	Bestimmung adsorbierbarer organisch gebundener Halogene (AOX) .....	104
3.4.3.5	Mikrobiologische Untersuchungen.....	105
3.4.3.6	Beurteilung der Daphnientoxizität des Ablaufs der MBR-Reaktoren .....	109
3.4.4	Fazit.....	109
3.5	Landwirtschaftliche Produktion / Rechtslage (Verantwortlich: Universität Bonn)..	111
3.5.1	Ziele der Projektkomponente .....	111
3.5.2	Material und Methoden .....	111
3.5.2.1	Untersuchungen zur Düngungseignung.....	111
3.5.2.2	Untersuchungen zur Keimungshemmung.....	113
3.5.2.3	Untersuchungen zum Verhalten von Schadstoffen .....	114
Hormonnachweis mittels YES-Test .....	114	
Pharmazeutika im Gewächshausversuch.....	115	
Pharmazeutika im Freilandversuch .....	116	
3.5.2.4	Rechtliche Einstufung.....	117
3.5.3	Ergebnisse und Diskussionen .....	117
3.5.3.1	Düngungseignung .....	117
3.5.3.1.1	Bedarf an neuartigen Düngern.....	117
3.5.3.1.2	Nährstoffzusammensetzung im Hinblick auf die Düngungseignung ...	118
3.5.3.1.3	Handhabung oder „Handling“ der Produkte.....	119
3.5.3.1.4	Ertragsparameter in vergleichenden Feldversuchen .....	120
3.5.3.2	Keimungshemmung.....	122
3.5.3.3	Risikobetrachtungen.....	125

3.5.3.3.1	Methodenentwicklung zum Nachweis von endokrinen Disruptoren in Urin, MAP und Boden .....	126
3.5.3.3.2	Gefäßversuche zur Aufnahme von Pharmazeutika und Hormonen in die Pflanze	127
3.5.3.3.3	Abbauverhalten von Östrogenen in Böden.....	128
3.5.3.3.4	Nachweis von Pharmazeutika und Hormonen im Feldversuch.....	130
3.5.3.4	Rechtliche Machbarkeit .....	131
3.5.4	Fazit.....	135
3.6	Akzeptanz (Verantwortlich: RWTH Aachen/Universität Bonn).....	137
3.6.1	Ziele der Projektkomponente .....	137
3.6.2	Akzeptanz der Nutzer (RWTH Aachen).....	139
3.6.2.1	Material und Methoden.....	139
3.6.2.2	Ergebnisse und Diskussionen .....	141
3.6.2.2.1	Haustechnik.....	141
3.6.2.2.2	Reinigungspersonal.....	141
3.6.2.2.3	Nutzer.....	142
3.6.3	Akzeptanz der Landwirte und Konsumenten (Universität Bonn).....	160
3.6.3.1	Material und Methoden.....	160
3.6.3.2	Ergebnisse und Diskussionen .....	162
3.6.3.2.1	Rücklaufquote.....	162
3.6.3.2.2	Sozioökonomische Rahmenbedingungen.....	162
3.6.3.2.3	Düngung, Abwasser und Hintergrundwissen .....	163
3.6.3.2.4	Einstellung zum Thema „Dünger aus Urin“ .....	165
3.6.3.2.5	Akzeptanz des Einsatzes eines Urin-basierten Düngers.....	172
3.6.3.2.6	Einschätzung des Marktpotentials .....	174
3.6.4	Fazit.....	174
3.6.4.1	Akzeptanz der NoMix-Anlagen .....	174
3.6.4.2	Akzeptanz unter Landwirten und Konsumenten.....	175
3.7	Wirtschaftlichkeit (Verantwortlich: GIZ/Universität Bonn).....	177
3.7.1	Ziele der Projektkomponente .....	177
3.7.2	Material und Methoden .....	177
3.7.2.1	Kostenvergleich nach LAWA .....	178
3.7.2.2	Betrachtete Szenarien und Sensitivitätsanalysen .....	180
3.7.2.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse „Gebäude“.....	180
3.7.2.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse „Landwirtschaftliche Verwertung“ .....	181
3.7.3	Ergebnisse und Diskussionen .....	181
3.7.3.1	Wirtschaftlichkeitsanalyse „Gebäude“.....	181
3.7.3.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse „Landwirtschaftliche Verwertung“ .....	183
3.7.4	Fazit.....	187
3.8	Internationale Übertragbarkeit (Verantwortlich: GIZ) .....	189
3.8.1	Ziele der Projektkomponente .....	189
3.8.2	Material und Methoden .....	189
3.8.2.1	Nutzwertanalyse.....	189

3.8.2.2	Identifikation der Hotspots .....	190
3.8.3	Ergebnisse und Diskussionen .....	192
3.8.3.1	Nutzwertanalyse .....	192
3.8.3.1.1	Hotspots .....	195
3.8.4	Fazit .....	200
4	Danksagung .....	202
5	Literaturverzeichnis.....	205
5.1	Literatur zu Kapitel 2 .....	205
5.2	Literatur zu Kapitel 3.1 .....	209
5.3	Literatur zu Kapitel 3.2 .....	209
5.4	Literatur zu Kapitel 3.3 .....	209
5.5	Literatur zu Kapitel 3.4 .....	210
5.6	Literatur zu Kapitel 3.5 .....	213
5.7	Literatur zu Kapitel 3.6 .....	215
5.8	Literatur zu Kapitel 3.7 .....	216
5.9	Literatur zu Kapitel 3.8 .....	217
6	Anlage .....	220
6.1	Anlagen zu Kap. 3.1.....	220
6.2	Anlagen zu Kap. 3.5.....	222
6.3	Anlagen zu Kap. 3.6.....	225

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung des neuartigen Sanitärkonzepts in der GIZ in Eschborn unterteilt in seine beiden Phasen der Umsetzung.....	5
Abbildung 2:	Roediger NoMix-Toilette. Links: Seitenansicht; Rechts: Draufsicht, Pfeil zeigt auf den integrierten Urinablauf. ....	16
Abbildung 3:	Funktionsabbildungen vor und während der Toilettennutzung sowie bei der Spülung. ....	18
Abbildung 4:	Explosionszeichnung der NoMix-Toilette. ....	19
Abbildung 5:	Hier ist die Verlängerung des neuen Bowdenzugs (weiße Ummantelung) um 2 cm gegenüber dem Alten (schwarzen) sichtbar. ....	23
Abbildung 6:	Blick auf die abgerundeten Innenkanten im Ventilkörper innen. ....	23
Abbildung 7:	Die kegelförmig ausgebildete Aufnahmefassung für den Bowdenzug im Ventilkörper (Ansicht von unten, Aufnahmefassung rot markiert). ....	23
Abbildung 8:	Urinablauftrichter mit der geänderten Passsicherung (Ansicht von der Seite, rot markiert) für den Bowdenzug. ....	24
Abbildung 9:	RoeVac NoMix-Toilette mit Kennzeichnungen: Rund: hinterer Beckenbereich; Rechteckig: vorderer Urinableitbereich. ....	24
Abbildung 10:	RoeVac Ablaufsiphon mit zwei zusätzlichen Rollringen zur Abdichtung. ....	25
Abbildung 11:	Auswertetabelle zur Lebensdauer bzw. Betriebsdauer der Urinablaufventile. ....	26
Abbildung 12:	Prozentuale Lebens- bzw. Betriebsdauer der in den NoMix-Toiletten verbauten Urinablaufventile im erfassten Berichtszeitraum. ....	26
Abbildung 13:	Zusammenstellung für getauschte Bauteile der Auswertetabelle aus Abbildung 11. ....	28
Abbildung 14:	Zusammenstellung der Betriebszustände der NoMix-Toiletten nach der Auswertungstabelle aus Abbildung 11. ....	29
Abbildung 15:	Draufsicht des Aufstellungsplans für den Aufstellungsraum im Untergeschoss des GIZ-Hauptgebäudes. ....	34
Abbildung 16:	Schematische Darstellung des Fällungsreaktors. ....	35
Abbildung 17:	Fällungsreaktor. Links: 3-D-Modell des Reaktors; Rechts: Installierter Reaktor im Keller des GIZ-Hauptgebäudes. ....	36
Abbildung 18:	Magnesiumoxid-Dosierer in verschiedenen 3D-Ansichten (Frontblech und Deckel transparent dargestellt). ....	37
Abbildung 19:	Links: Neue Filtersäcke (Nadelfilz) eingehängt in Filtersackrevolver; Rechts: Befüllte Filtersäcke (Nylon) eingehängt in Filtersackrevolver. ....	38
Abbildung 20:	Links: 3-D-Modell des Magnesiumoxid-Dosierers; Rechts: Innenansicht der Dosierstation. ....	39
Abbildung 21:	Schematische Darstellung der Grauwasserbehandlung im GIZ-Gebäude, Haus 1. ....	40
Abbildung 22:	Siebelelement HUBER TURNY zur Entfernung von Grobstoffen und Haaren. ....	41
Abbildung 23:	Vorlage-, MBR- und Speicherbehälters. Schnitt B-B. ....	42
Abbildung 24:	Darstellung mit Beschreibung des Ultrafiltrationsmoduls. ....	43
Abbildung 25:	Schematische Darstellung der Brauwasserbehandlung im GIZ-Gebäude, Haus 1. ....	46
Abbildung 26:	Aufbau der Braunwasservorreinigung. ....	47
Abbildung 27:	MBR-Behälter der Braunwasserbehandlung. Draufsicht und Schnitt C-C. ....	48
Abbildung 28:	Transport des Fällungsreaktors. ....	50
Abbildung 29:	Testbetrieb der Grauwasseranlage im Werk der HUBER SE. ....	51
Abbildung 30:	Links: Grauwasseranlage im Kellerraum des GIZ-Hauptgebäudes; Rechts: Innenansicht des Membranbelebungsreaktors. ....	51
Abbildung 31:	Links: Vorführung der Braunwasservorreinigung im Werk der HUBER SE; Rechts: Vorübergehender Betrieb der Braunwasservorreinigung in Eschborn. ....	52
Abbildung 32:	Braunwasser-MBR (von links: Membranbioreaktor, Schaltschrank und Braunwasservorreinigung). ....	52
Abbildung 33:	Höhenstände der Grauwasserbehandlungsanlage der HUBER SE; Abfrage der Daten vom 23.05.2012. GW = Grauwasser. ....	54

Abbildung 34:	Links: Messung der Stromaufnahme am Schaltschrank der Urinbehandlung; Rechts: Wartungsarbeiten am Fällungsreaktor. ....	55
Abbildung 35:	Links: Ausgebautes Membranmodul mit leichten Verschmutzungen; Rechts: Gereinigtes Membranmodul wieder eingebaut im MBR-Behälter. ....	55
Abbildung 36:	Schematische Darstellung des MAP-Fällungsreaktors. ....	59
Abbildung 37:	Darstellung des Phosphatausfällungsgrads in Abhängigkeit vom $\beta$ -Faktor. ....	61
Abbildung 38:	Phosphat- und Magnesiumkonzentration in Abhängigkeit der Sedimentationszeit.....	62
Abbildung 39:	MAP-Bilanz eines Speichertanks (2000 l) bei Fällung mit analytischem MgO (Röhrich et al., 2012). ....	63
Abbildung 40:	MAP direkt nach der Entfernung aus einem Filtersack abgefüllt in Flaschen. ....	64
Abbildung 41:	Rasterelektronenmikroskopaufnahme des MAP mit typischen Kristallformen. ....	64
Abbildung 42:	Energiedispersive Röntgenanalyse des MAP. ....	65
Abbildung 43:	Darstellung des Austauschprozesses der Filtersäcke.....	67
Abbildung 44:	Links: Filtersack aus Polypropylen mit MAP belegt; Rechts: Filtersack aus Polyamid mit MAP belegt.....	68
Abbildung 45:	REM-Aufnahmen eines 5 $\mu$ m-Polyamid-Filtersacks mit Verklebungen der Poren, rechts in einer höheren Vergrößerung des roten Ausschnitts. Die Größenskala ist jeweils unten links im Bild angegeben.....	69
Abbildung 46:	Vor dem MAP-Fällungsreaktor eingebauter Schmutzfang. Links: gereinigter (alter; Mitte: belegter alter Schrägsitzschmutzfang mit den länglichen, gelblich bis dunkelbraunen Larvenhüllen; Rechts: befüllter Siebkorb mit abgeschiedenen Fällprodukten im Bodensatz.....	70
Abbildung 47:	Links: Zulauf des Grauwasser-MBR (links) und des Braunwasser-MBR (rechts); Rechts: Permeat der MBR: Grauwasser (links), Braunwasser (rechts).....	71
Abbildung 48:	Flux und Permeabilität des Grauwasser-MBR in Abhängigkeit von der Zeit.....	76
Abbildung 49:	Flux und Permeabilität des Braunwasser-MBR in Abhängigkeit von der Zeit.....	77
Abbildung 50:	Gussrohre des Urinleitsystems.....	91
Abbildung 51:	Elimination der Pharmazeutika während der Lagerung bei unterschiedlichen pH-Werten.....	92
Abbildung 52:	Konzentrationen der Parameter CSB, Gesamtstickstoff, Ammonium- Stickstoff und ortho-Phosphat zu Beginn und am Ende der Lagerungsversuche. ....	94
Abbildung 53:	CSB-Elimination während der Lagerungsversuche über 6 Monate. ....	95
Abbildung 54:	Elimination von Ammonium-Stickstoff und Gesamtstickstoff während der Lagerungsversuche über 6 Monate. ....	96
Abbildung 55:	Pharmazeutikakonzentrationen im Zulauf (Zu) und Ablauf (Ab) der der MAP- Fällungsanlage. LOQ $\leq 1$ mg l <sup>-1</sup> . ....	97
Abbildung 56:	Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen der Urinfällungsanlage im Zeitraum 8.7.2010 bis 22.5.2012 analog zu Abbildung 55. ....	98
Abbildung 57:	Mikroskopische Aufnahmen von Struvit-Kristallen (Größenangabe 100 $\mu$ m). Links: Ungewaschene Struvitkristalle; Rechts: Gewaschene Struvitkristalle. ....	99
Abbildung 58:	Verteilung der Gewichtsanteile von Stickstoff, Phosphor und Magnesium nach Trocknung des Fällproduktes bei unterschiedlichen Temperaturen (Mittelwert aus drei Untersuchungen) und in reinem Struvit ((NH <sub>4</sub> )Mg[PO <sub>4</sub> ] • 6 H <sub>2</sub> O). ....	100
Abbildung 59:	Nachweis von Pharmazeutika in Einzelproben von Zu- und Ablauf der Braunwasserbehandlungsanlage. ....	102
Abbildung 60:	Tensid-LC-Massenspektren der Grauwasserzulaufprobe vom 3.4. und 17.4.2012. ....	103
Abbildung 61:	Tensid-LC-Massenspektren der Grauwasserablaufprobe vom 3.4., 17.4. und 22.5.2012. ....	104
Abbildung 62:	Strukturformel von Diclofenac-Natrium-Salz (ESIS, 2012).....	104
Abbildung 63:	Probenahme am Ablauf der Braunwasseranlage.....	108

Abbildung 64:	Mikroorganismen im belebten Schlamm der Grauwasserbehandlungsanlage. Links: Wassermilbe; Rechts. Vorticella convallaria. ....	109
Abbildung 65:	Mikroorganismen im belebten Schlamm der Braunwasserbehandlungsanlage. Links: Schalenamöbe; Rechts: Rotaria spec. ....	109
Abbildung 66:	Keimungstest mit Weizensamen in Petrischalen auf Watte. ....	114
Abbildung 67:	Nachweis von endokrinen Disruptoren im YES-Test in der Mikrotiterplatte. ....	115
Abbildung 68:	Weltdüngerverbrauch nach Nährstoffen von 2002-2010 mit Prognose bis 2015 (AMI, 2012). ....	117
Abbildung 69:	Inlandsabsatz von mineralischen Düngemitteln in Deutschland von 1993/94 bis 2009/10, Säulenabschnitte von unten nach oben: CaO, N, K <sub>2</sub> O, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> in 1000 t Nährstoff (UBA, 2011). ....	118
Abbildung 70:	IBC-Tanks zu Transport und Lagerung, sowie Feldspritze bei Befüllung mit GIZ-Urin links und beim Einsatz im Feld rechts. ....	119
Abbildung 71:	Feldversuch mit parzellengenauem Anbau von Sommerweizen auf dem Versuchsgut Kleinaltendorf im Jahr 2010 und Ernte des Mittelstreifens zur Vermeidung von Randeffekten. ....	120
Abbildung 72:	Erträge bei Sommerweizen im Versuchsjahr 2011 nach Düngung mit GIZ- Urin (GIZ-U) im Vergleich zur nicht gedüngten Kontrolle (K) und zu Mineraldünger (KAS) sowie zu Varianten mit zusätzlich appliziertem Phosphor als MAP oder Tripelphos (TP); Standardabweichung für n= 4, mit 36 m <sup>2</sup> pro Parzelle. ....	121
Abbildung 73:	Erträge bei Ackerbohne im Versuchsjahr 2011 nach Düngung mit Phosphor als MAP oder Tripelphos (TP) im Vergleich zur nicht gedüngten Kontrolle (K), Standardabweichung für n= 4. ....	122
Abbildung 74:	Keimung von Weizen und Sonnenblume bei Zugabe von Urin (1 GW), 1:10 und 1:100 verdünntem Urin (0,1 GW; 0,01 GW); Standardabweichung für n=4. ....	123
Abbildung 75:	Keimung von Weizen und Sonnenblume bei Zugabe von Leitungswasser (LW) und 1:10 verdünntem Urin (0,1 GW) in pH 9 und 11; Standardabweichung für n=4. ....	124
Abbildung 76:	Keimungsraten von Sommerweizen und Sonnenblume bei der Anwendung verschiedener Salze in zwei verschiedenen Molaritäten; Oben: 0,02 mol l <sup>-1</sup> ; Unten: 0,2 mol l <sup>-1</sup> ; n=4. ....	125
Abbildung 77:	Kultivierung von Weizen in Kick-Brauckmann-Töpfen zum Zeitpunkt der zweiten Urin-Düngung, je 5 Pflanzen pro Gefäß. ....	128
Abbildung 78:	Abnahme von E2 im Verlauf des Gefäßversuchs bei Zugabe von Urin (U), zusätzlicher Gabe von 100 µg E2 (T1) und 10 µg (T2), n <sub>0</sub> =6, n <sub>43</sub> =2, n <sub>127</sub> =4. ....	129
Abbildung 79:	Östrogenaktivität in Weizenproben des Freilandversuchs 2011 in E2eq g <sup>-1</sup> Trockenmasse; K = Kontrolle, KAS = Kalkammonsalpeter, U = Urin, TP = Triplephosphat. ....	131
Abbildung 81:	Übersicht über relevante Rechtsgebiete bei der Verwendung von neuartigen Düngern in der Landwirtschaft mit Zuordnung der wichtigsten Gesetze (BNatSchG = Bundesnaturschutzgesetz, KrWG = Kreislaufwirtschaftgesetz, WHG = Wasserhaushaltsgesetz, BBodSchG = Bundesbodenschutzgesetz, BauGB = Baugesetzbuch, DüngG = Düngegesetz). ....	132
Abbildung 82:	Geschlechterverteilung. ....	143
Abbildung 83:	Bewertung der Sauberkeit von wasserlosen Urinalen im Vergleich zu konventionellen Urinalen. ....	145
Abbildung 84:	Bewertung der Geruchsbelästigung von wasserlosen Urinalen im Vergleich zu konventionellen Urinalen. ....	146
Abbildung 85:	Links: Wissen um Trennmechanismus; Rechts: Wissen um Papierentsorgung in hinterer Öffnung der Toilettenschüssel. ....	147
Abbildung 86:	Wunsch nach einem anderen Trennmechanismus. ....	148
Abbildung 87:	Wunsch nach verschiedenen in den NoMix-Toilettenanlagen angebotenen hygienischen Zusatzmaßnahmen. ....	149
Abbildung 88:	Nutzungspräferenz der Teilnehmer. ....	149
Abbildung 89:	Technische Probleme bei der Nutzung von NoMix-Toiletten. ....	150

Abbildung 90:	Frage 21: „Halten Sie die derzeit eingestellte Spülkraft in den NoMix-Toiletten für ausreichend?“ .....	151
Abbildung 91:	Geruchsbelästigung der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten. ....	152
Abbildung 92:	Gebrauchsempfinden der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten. ....	153
Abbildung 93:	Sauberkeitsempfinden bei NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten. ....	153
Abbildung 94:	Entwicklung der Frage 34 „Würden Sie Obst oder Gemüse kaufen, das entsprechend der Richtlinien der WHO mit diesen gewonnenen Nährstoffen gedüngt worden ist?“ .....	155
Abbildung 95:	Entwicklung der Frage 35 „Würden Sie nicht-essbare Produkte (wie z.B. Blumen oder Baumwollprodukte) kaufen, die mit den aus der getrennten Sammlung gewonnenen Nährstoffe gedüngt worden sind?“ .....	155
Abbildung 96:	Entwicklung der Frage 37 „Sollte die Nutzung des über NoMix-Toiletten gewonnenen Urins auch im Biolandbau zugelassen werden?“.....	156
Abbildung 97:	Einschätzung der Qualität der NoMix-Toilettenreinigung durch das Personal in Prozent.....	157
Abbildung 98:	Einschätzung der Effektivität der Einführung einer Reinigungsliste in Prozent.....	158
Abbildung 99:	Prozentuale Nennungen der Mehrfachantwort nach dem Einbezug der Mitarbeiter in das Projekt SANIRESCH.....	159
Abbildung 100:	Bewertung des aktuellen Sanitärsystem. Links: Landwirtschaft; Rechts: Verbraucher. ....	164
Abbildung 101:	Assoziationen der Befragten zu einem Urin-basierten Dünger; Links: Landwirte; Rechts: Konsumenten.....	165
Abbildung 102:	Links: Nutzung von Urin-basierten Dünger in der landwirtschaftlichen Produktion; Rechts: gesundheitliche Einschätzung eines Urin-basierten Düngers durch die Landwirte.....	167
Abbildung 103:	Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe von Gegensatzpaaren. Links: indiskutable Idee; Rechts: interessante Idee. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung. ....	168
Abbildung 104:	Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe von Gegensatzpaaren. Links: nützlich; Rechts: schädlich. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung. ....	169
Abbildung 105:	Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe des Gegensatzpaares. Links: gefährlich; Rechts: sicher. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung. ....	170
Abbildung 106:	Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe des Gegensatzpaares. Links: kontrollierbar; Rechts: unkontrollierbar. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung. ....	171
Abbildung 107:	Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe des Gegensatzpaares. Links: natürlich, Rechts: unnatürlich; Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung. ....	171
Abbildung 108:	Akzeptanz von Landwirten in Bezug auf den Einsatz unterschiedlicher Applikationsformen bei Gemüse und Getreide. Links: Applikation in flüssiger Form; Rechts in Pulverform (z.B. MAP).....	172
Abbildung 109:	Konsum von Gemüse und Getreide, das mit einem Urin-basierten Dünger produziert wurde. Links: flüssige Applikation; Rechts: Applikation in Pulverform (z.B. MAP). Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung. ....	173
Abbildung 110:	Darstellung der beiden in den Wirtschaftlichkeitsanalyse „Gebäude“ (gestrichelte Linie) und „Landwirtschaftliche Verwertung“ (durchgezogene Linie) betrachteten Systeme, ihre Systemgrenzen und ihrer Überschneidungen.....	180

Abbildung 111: Projektkostenbarwert „Gebäude“ der drei Szenarien: A – SANIRESCH mit Urinnutzung, B – SANIRESCH mit MAP-Fällung, C – konv. System.....	182
Abbildung 112: Projektkostenbarwert „Landwirtschaftliche Nutzung“ der fünf Szenarien betrachtet für eine Fläche von 2,83 ha bzw Sz. III für 0,39 ha : Direkte Urinnutzung: I – Lagerung bei der GIZ, II – Lagerung am Feld; III – Produktion und Nutzung des MAPs, IV – Nutzung von KAS, V – Nutzung von Triplephos. Jeweils dargestellt ist die kostengünstigste Variante jedes Szenarios. Szenario III orientiert sich an der rechten y-Achsenkalierung. ....	184
Abbildung 113: Veränderung der Düngekosten pro Hektar in Abhängigkeit von den der Steigerung der Nährstoffpreise in den einzelnen Szenarien. ....	186
Abbildung 114: Globale Hotspots, an denen sich eine Nutzung der MAP-Fällung anbietet (nach Peng, 2012). Je dunkler die Schattierung, desto größer ist der Nutzwert. ....	196
Abbildung 115: Globale Hotspots, an denen sich eine Nutzung der Grauwasserbehandlung mittels MBR-Verfahren anbietet (Löw, 2011). Je dunkler die Schattierung, desto größer ist der Nutzwert. ....	198
Abbildung 116: Globale Hotspots, an denen sich eine Nutzung der Braunwasserbehandlung mittels MBR-Verfahren anbietet (Wu, 2011). Je dunkler die Schattierung, desto größer ist der Nutzwert. ....	198
Abbildung 117: Kombinierte Darstellung der Hotspots aller drei Technologien. In diesen Regionen könnte eine Implementierung des Gesamtkonzepts interessant sein. ....	199

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Materialstückliste der NoMix-Toilette.....	19
Tabelle 2:	Auswertung aller Wartungen zum Tausch von Bauteilen sowie Betriebszustand.....	27
Tabelle 3:	Auflistung der zur Analyse verwendeten Kuvettentests von Hach Lange.....	60
Tabelle 4:	Durchschnittlicher Urinanfall pro Werktag durch alle eingebauten NoMix-Toiletten und 23 wasserlose Urinale.....	62
Tabelle 5:	Messwerte der energiedispersiven Röntgenanalyse.....	65
Tabelle 6:	Chemische Parameter des Grauwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 12.07.2011 bis zum 30.09.2012.....	72
Tabelle 7:	Chemische Parameter des Braunwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 30.08.2011 bis zum 30.09.2012.....	73
Tabelle 8:	Gesamt-Phosphatwerte des Grauwasserzulaufs unterschieden in die Zeiträume vor, während und nach der Umstellung auf phosphatfreie Spülmaschinenreiniger.....	74
Tabelle 9:	Physikalische Parameter des Grauwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 12.07.2011 bis zum 30.09.2012. n.n. = nicht nachweisbar.....	74
Tabelle 10:	Physikalische Parameter des Braunwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 30.08.2011 bis zum 30.09.2012. n.n. = nicht nachweisbar.....	75
Tabelle 11:	Auflistung des Flux, der Permeabilität, des Tagesdurchsatzes und des Transmembrandrucks der Grau- und Braunwasser-MBR.....	76
Tabelle 12:	Vergleich der Richtwerte und Qualitätsanforderungen für Toilettenspülwasser, Bewässerungswasser und Trinkwasser mit den Durchschnittswerten der Permeate der Grau- bzw. Braunwasserbehandlung.....	78
Tabelle 13:	Anzahl der im Rahmen des Projektes durchgeführten Analysen.....	81
Tabelle 14:	HPLC-Gradient bei der flüssigkeitschromatographischen Trennung der Pharmazeutika.....	83
Tabelle 15:	Quantifizierungsmassen der eingesetzten Pharmazeutika.....	83
Tabelle 16:	HPLC-Gradient der flüssigkeitschromatographischen Trennung der Tenside.....	84
Tabelle 17:	Verwendete Standardverfahren.....	85
Tabelle 18:	Mikrobiologische Nachweisverfahren.....	85
Tabelle 19:	Ergebnis des Medikamenten-Screenings vor Beginn der Untersuchungen.....	86
Tabelle 20:	Verbrauchsmengen und Nachweis der im Rahmen des Projektes untersuchten Arzneimittel in Umweltkompartimenten in Deutschland (OW = Oberflächengewässer, GW = Grundwasser, TW = Trinkwasser, BG = Bestimmungsgrenze; UBA, 2011; PharmQue, 2009).....	86
Tabelle 21:	Resultate aquatischer Toxizitätstests und $K_{ow}$ -Werte.....	87
Tabelle 22:	Versuchsansatz der Urinlagerungsversuche.....	89
Tabelle 23:	Ergebnisse der Beprobung der Urinlagertanks im GIZ-Gebäude.....	90
Tabelle 24:	Qualitativer Nachweis von Medikamenten in Tank 1 und Tank 3 (Mmono = Masse monoisotopisch, +/- = positiv oder negativ ionisiert, m/z = Verhältnis Masse zu Ladung, RT = Retentionszeit), o = in den Tanks nachgewiesen.....	91
Tabelle 25:	Bewertung des Eliminationsgrades von Pharmazeutika in Urin bei unterschiedlichen pH-Werten. „-“ = <10%; „-“ = 10 - <30%; „+“ = 30 - <60%; „+“ = 60 - <80%; „+“ = ≥80%.....	93
Tabelle 26:	Statistische Werte der CSB-Eliminationsleistung.....	95
Tabelle 27:	Veränderung der Molverhältnisse der Struvitinhaltstoffe unter dem Einfluss der Trocknungstemperatur.....	101
Tabelle 28:	Ergebnisse der Elementanalysen von Struvit (ungewaschenes Fällprodukt) nach Trocknung bei 30°C.....	101
Tabelle 29:	Konzentration der adsorbierbaren Halogenverbindungen (AOX) und von Diclofenac in den Zu- und Abläufen der Pilotanlagen.....	105
Tabelle 30:	Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen von Tank 2 und 3.....	106
Tabelle 31:	Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen von Zu- und Ablauf der Urinfällungsanlage sowie Struvit. KBE = Kolonie bildende Einheiten.....	106

Tabelle 32:	Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen der Abläufe der Braunwasserbehandlungsanlage. ....	107
Tabelle 33:	Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen der Abläufe der Grauwasserbehandlungsanlage. ....	107
Tabelle 34:	Nährstoffentzug von Weizen und Mais bei entsprechendem Ernteertrag (= Nährstoffbedarf der Kultur) im Vergleich zu Nährstoffdargebot durch neuartige Sanitärdünger der GIZ in kg, bezogen auf 1 ha. ....	113
Tabelle 35:	Wirkstoff-Charakteristika und eingesetzte Konzentrationen. ....	114
Tabelle 36:	Geräte für die Handhabung von Urin in SANIRESCH. ....	119
Tabelle 37:	Geräte für die Handhabung von MAP (siehe auch Kapitel 3.3.3). ....	120
Tabelle 38:	Übersicht über Abbauraten von Hormonen in Böden. ....	130
Tabelle 39:	Hygienische Probleme bei der Nutzung von NoMix-Toiletten nach Geschlecht. ....	150
Tabelle 40:	Altersverteilung der Stichprobe (a) Landwirtschaft, (b) Konsumenten in %. ....	163
Tabelle 41:	Links: Verteilung der Betriebsgrößen; Rechts: Verteilung der Haushaltsgrößen. ....	163
Tabelle 42:	Preise der Einzelnährstoffe wie sie in dieser KVR berücksichtigt wurden (Agrarmarkt NRW, 2012). ....	179
Tabelle 43:	Projektkostenbarwert (PKBW), Jahreskosten (JK) und Dynamische Gestehungskosten (DGK) der drei Szenarien. ....	181
Tabelle 44:	Auswirkung einer höheren Lebenszeit der Ersatzteile der NoMix-Toiletten kombiniert mit einer Reduktion der Investitionskosten (IK) für Toiletten und Urinale, betrachtet für Szenario A und B. ....	183
Tabelle 45:	Düngekosten je Hektar bei Bodenklasse C für verschiedene Düngemittel. Es wurden jeweils die kostengünstigsten Alternativen innerhalb der einzelnen Szenarien dargestellt. T: Transport, L: Lagerung, A: Ausbringung, KAS: Kalkammonsalpeter. ....	185
Tabelle 46:	Düngekosten je Hektar Fläche bei einer erneuten Steigung des Phosphorpreises um 800% bzw. aller Nährstoffe um 260% bei Bodenklasse C betrachtet nach den verschiedenen Düngemitteln. Es wurden jeweils die kostengünstigsten Alternativen innerhalb der einzelnen Szenarien dargestellt. T: Transport, L: Lagerung, A: Ausbringung, KAS: Kalkammonsalpeter. ....	186
Tabelle 47:	Bewertungsmatrix der Nutzwertanalysen Grauwasser, Braunwasser und MAP-Fällung zur Identifikation der Hotspots. In der jeweils zweiten Zeile finden sich die Quellenangaben. „Nicht berücksichtigt“ bedeutet, dass dieses Kriterium für die jeweilige Anlage keine Relevanz hat. ....	191
Tabelle 48:	Bewertungsmatrix der Nutzwertanalyse MAP-Fällung (Peng, 2012). Zur Erläuterung des Tabellenaufbaus (siehe Kapitel 3.8.2.1). ....	193
Tabelle 49:	Bewertungsmatrizen der Nutzwertanalyse für Grau- und Braunwasserbehandlung (GW, bzw. BW Behandlung) in MBRs (Löw, 2011 und Wu, 2011). Zur Erläuterung des Tabellenaufbaus vgl. Kapitel 3.8.2.1. ....	195

# Abkürzungen

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AOX	Adsorbierbare, organisch gebundene Halogene
BSB <sub>5</sub>	Biologischer Sauerstoffbedarf (5 Tage)
BSB <sub>7</sub>	Biologischer Sauerstoffbedarf (7 Tage)
BW	Braunwasser
C	Kohlenstoff
Ca	Calium
CaO	Kalk
Cd	Cadmium
Cr	Chrom
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
Cu	Kupfer
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff
E2	17 $\beta$ -Estradiol
E2eq	Estradiol-Äquivalenten
EDC	Endokrine Disruptoren
EDX	Energiedispersive Röntgenanalyse
Gd	Gadolinium
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
GV	Glühverlust
GW	Grauwasser
Haus 1	GIZ-interner Name des Gebäudes, in dem das SANIRESCH-System im mittleren Gebäudeteil eingebaut ist
Hg	Quecksilber
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (High-performance liquid chromatography)
hRE	Östrogen-Rezeptor-Gen
ISA	Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen
IVA	Industrieverband Agrar
K	Kalium
KAS	Kalkammonsalpeter
KBE	Kolonie bildende Einheiten
K <sub>2</sub> O	Kali
LAS	Lineare Alkylbenzolsulfonate
LCMS	Flüssigkeitschromatographie mit Massenspektrometrie
Lf	Leitfähigkeit
LOQ	Quantifizierungsgrenze
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
MBR	Membranbioreaktor
MCB	MembraneClearBox
MS	Massenspektrometrie
m/z	Verhältniss Masse zur Ladung
N	Stickstoff
N <sub>ges</sub>	Gesamtstickstoff

Na	Natrium
NASS	Neuartige Sanitärsysteme
Ni	Nickel
NH <sub>4</sub> -N	Ammoniumstickstoff
NO <sub>2</sub> -N	Nitritstickstoff
NO <sub>3</sub> -N	Nitratstickstoff
NRW	Nordrhein-Westfalen
Ø	Durchschnitt
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
o-PO <sub>4</sub> -P	Orthophosphat
pH	pH-Wert
P	Phosphor
P <sub>ges</sub>	Gesamtphosphor
Pb	Blei
PE	Polyethylen
PES	Polyethersulfon
PO <sub>4</sub> -P	Phosphat
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Phosphorpentoxid, eigentlich Diphosphorpentoxid (P <sub>4</sub> O <sub>10</sub> )
PVOH	Polyvinylalkohol
REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Retentionszeit
S	Schwefel
SANIRESCH	SanitärRecycling Eschborn
SAS	Sekundäre Alkylsulfonate
SPE	Festphasenextraktion
T	Trübung
THM	Technische Hochschule Mittelhessen Gießen-Friedberg
TN <sub>b</sub>	Gesamter gebundener Stickstoff
TOC	Gesamter organisch Kohlenstoff
Triplephos	Triple-Superphosphat
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
ÜSS	Überschussschlamm
WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organisation)
XIC	Extracted Ion Chromatogramm
Zn	Zink

## 1. Zusammenfassung des Gesamtprojekts

Die Realisierung eines neuartigen Sanitärsystems mit der Technik der Urinseparation im GIZ-Hauptgebäude in Eschborn (Haus 1) war zum Beantragungszeitpunkt und ist immer noch das größte Projekt dieser Art in Deutschland. Außer in der GIZ wurde die Urinseparation bislang nur in sehr kleinem Maßstab im Projekt „Lambertsmühle“, in der Kläranlage Stahnsdorf durch die Berliner Wasserbetriebe, sowie in ebenfalls kleinerem Maßstab in den Gebäuden der Firma HUBER SE umgesetzt. Parallel gibt es noch zwei weitere Gebäude, das Form Chrisbach der EAWAG (Dübendorf Schweiz) und die SolarCity Pichling bei Linz (Österreich). Auch mit der Aufbereitung des Brauwassers in einem Bürogebäude wurde Neuland betreten. Marktreife Technologien zur dezentralen Abwasserbehandlung sind derzeit nur für die Behandlung von Schwarzwasser und zur Grauwasserbehandlung verfügbar.

Die Neuheit des Projektes bestand durch die Lage in einem Bürogebäude mit hohem Publikumsverkehr insbesondere in den Anforderungen an die technischen Anlagen zur Urin- und Brauwasserbehandlung: Die Anlagen durften keinerlei Belästigungen wie Geruchsentwicklung, Leckagen oder Unterbrechungen des Betriebs der Toilettenanlagen hervorrufen. Auch Betrieb und Wartung der Anlagen mussten weitgehend automatisiert und störungsfrei sein. Die Anforderungen an die Technik und das Betriebskonzept entsprachen den realen Marktbedingungen. Das Projekt bot daher die Möglichkeit zur Entwicklung von marktreifen Technologien und Betriebskonzepten.

Der erste wichtige Punkt war das „user interface“ die NoMix-Toiletten und wasserlosen Urinale, da sie der einzige direkte Berührungspunkt zwischen der arbeitenden Belegschaft im Gebäude und dem Abwassersystem waren. Wasserlose Urinale funktionieren sehr gut, sind akzeptiert und werden nun aufgrund der positiven Erfahrung auch in anderen Neubauten der GIZ zum Einsatz kommen. Darüber hinaus wird im Haus 1 Wasser eingespart. Der Markt für wasserlose Urinale ist sehr groß und unser Projekt hat dazu beigetragen, die Bekanntheit von wasserlosen Urinalen im In- und Ausland zu erhöhen. Das Vorhaben hat auch gezeigt, dass die NoMix-Toiletten weiterer Optimierung bedürfen. Die Anfälligkeit des Urinabtrennventils ist mit einer durchschnittlichen Lebenszeit von 337 Tagen sehr hoch. SANIRESCH hat dazu geführt, dass erkannt wurde, welche Elemente der NoMix-Toilette weiter optimiert werden müssten. Die Optimierung selber konnte jedoch aus verschiedenen Gründen nicht durchgeführt werden.

Das Projekt konnte zeigen, dass dezentrale und nach Stoffströmen getrennte Abwasserbehandlung in einem Bürogebäude auf engstem Raum technisch möglich und machbar ist. Auch konnte der sensible Aspekt „Geruch“ zufriedenstellend berücksichtigt werden. Es gab während der gesamten Anlagenlaufzeit keine Zwischenfälle, die zu Geruchsbelästigungen im Gebäude geführt hätten. Dies wurde dank einer geruchsgekapselten Anlagenausführung und einem guten Entlüftungssystem erreicht. Die implementierte Ferneinwirktechnik für die Anlagenüberwachung und -steuerung hat sich im Zugriff von den unterschiedlichen Projektstandorten hat sich als zuverlässig und sehr hilfreich erwiesen.

Über die komplette Betriebszeit liefen die drei Behandlungsanlagen (zwei Membranbioreaktoren für Braun- und Grauwasser und der Fällungsreaktor zur Rückgewinnung des Phosphors aus dem Urin) störungsfrei. Es gab keinen Zwischenfall der anlagenbedingt ausgelöst worden wäre. Des Weiteren konnten konstruktive Verbesserungen an den Membranbioreaktoren und dem MAP-Fällungsreaktor umgesetzt werden und bewiesen sich im laufenden Betrieb. Die Wasserqualität des gereinigten Braun- als auch Grauwasser erlaubt einen Einsatz desselben als Service- bzw. Toilettenspülwasser und ist somit für die Wiedernutzung geeignet.

Die Gewinnung von MAP (Struvit) in dem MAP-Fällungsreaktor der Firma HUBER SE ist in seiner hier verbauten Größe immer noch ein für Europa einzigartiger Maßstab im Bereich Urin. Der MAP-Reaktor hat dadurch schon für viel Medieninteresse gesorgt. Die MAP-Fällung bedarf jedoch weiterer Schritte der Optimierung und Automatisierung bevor sie wirtschaftlich ist. Aktuell, mit einer Arbeitszeit von 4,35 h pro Charge (600-1000 l Urin) kann noch keine Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Die Rückgewinnungsrate von Phosphor aus Urin lag bei analytischem Magnesiumoxid bei 97% und bei technischem bei 65%. Dies entspricht einer MAP-Produktion zwischen 0,7-1,3 g MAP l<sup>-1</sup> Urin.

Hygienisch war das gewonnene Produkt unbedenklich. Auch zeigte es keine Anlagerungen der im Rahmen des Projekts untersuchten pharmazeutischen Rückständen im ungewaschenen als auch gewaschenen Zustand. Die Verbringung von Pharmazeutika in die Umwelt kann beim Einsatz von MAP in der Landwirtschaft weitgehend ausgeschlossen werden.

In Feldversuchen der Universität Bonn konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass die gewonnenen Produkte Urin und MAP eine gute Düngerwirkung haben und in ihrer Wirkung auf Pflanzen zu konventionellen mineralischen Düngern konkurrenzfähig sind. Die Untersuchungen zur Gefährdungsabschätzung zeigten, dass Pflanzen bestimmte Pharmazeutika aus dem Boden in ihre Pflanzenteile aufnehmen können. Dieser Nachweis konnte im Gewächshaus bei einem von vier zusätzlich applizierten pharmazeutischen Wirkstoffen - für Carbamazepin - bei der Kultivierung von Weizen erbracht werden. Die nachgewiesenen Konzentrationen sind sehr gering (ng kg<sup>-1</sup> TS Weizen) und liegen damit mehrere Log-Stufen unter den Tagesdosen bei der Medikation bzw. den angestrebten Konzentrationen im Blut. Ohne extra Pharmazeutikazugabe waren weder im Gewächshausversuch noch im Freiland in Weizen, der mit dem Urin gedüngt worden war, Pharmazeutika nachweisbar.

Die Befragungen im GIZ Gebäude zeigten, dass die männlichen Nutzer gegenüber den wasserlosen Urinalen positiv eingestellt sind. Diese werden aus diesem Grund nun auch langfristig in allen GIZ-Gebäuden verbaut werden. Es zeigte sich aber auch, dass in Bezug auf die NoMix-Toiletten hygienische Bedenken vorhanden sind und die Nutzung der Toiletten in einigen Aspekten (wie z.B. Geruch, Sauberkeit, Spülkraft) nicht unproblematisch gesehen wird. Dass die Idee einer getrennten Sammlung von Feststoffen und Urin und dessen Wiederverwertung dennoch positive Resonanz findet, darf hervorgehoben werden. Die Nutzer zeigen sich auch überwiegend bereit, Produkte zu konsumieren, die mit dem so gewonnenen

Dünger produziert werden. Auch im Hinblick auf die Nutzung der Produkte in der Landwirtschaft und den Konsum der produzierten Lebensmittel durch Verbraucher sind die Ergebnisse der Umfrage positiv zu bewerten. Insgesamt überwog eine gute Resonanz in Bezug auf die Nährstoffverwertung in der landwirtschaftlichen Produktion. Allerdings war eine gute Akzeptanz nicht uneingeschränkt gegeben, sondern an bestimmte Prämissen wie beispielsweise gesundheitliche Unbedenklichkeit, genaue Nährstoffdeklaration und Überwachung von Schadstoffen geknüpft.

Die Analyse der internationalen Übertragbarkeit hat ergeben, dass die beiden Membranbioreaktoren bereits ein gutes Potential für den Export aufweisen und es weltweit Regionen gibt, wo sie aufgrund der örtlichen Gegebenheiten eine interessante Alternative zu herkömmlichen Techniken darstellen. Auch im Bereich der MAP-Fällung gibt es interessante erste Ergebnisse, diese hängen jedoch noch sehr stark von der Wirtschaftlichkeit als auch dem Weltmarktpreis des Phosphors ab, so dass zum jetzigen Zeitpunkt das Exportpotential als deutlich geringer als das der MBR einzustufen ist.

Die Wirtschaftlichkeit des SANIRESCH-Systems ist am Standort der GIZ nicht gegeben, die Sensitivitätsanalysen zeigen jedoch auch, dass Potential für eine bessere Wirtschaftlichkeit vorhanden ist. Die Betrachtung der landwirtschaftlichen Nutzung zeigt, dass es hier deutlich größerer Einflüsse bedarf, um die neuartigen Dünger mit den kommerziell gehandelten konkurrenzfähig werden zu lassen. Aktuell kann die Urindüngung jedoch wirtschaftlich attraktiv und konkurrenzfähig zu herkömmlichen mineralischen Düngern sein, wenn die Rahmenbedingungen des Standorts wie etwas der Grundstückspreis und die Entfernung zu den landwirtschaftlichen Flächen günstig sind.

Wir möchten uns an dieser Stelle sehr herzlich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung sowie bei allen Personen, die das Projekt unterstützt und seine Durchführung mitgetragen haben, bedanken. Eine ausführliche Danksagung findet sich in Kapitel 4.

## 2. Kurzdarstellung

### 2.1 Aufgabenstellung

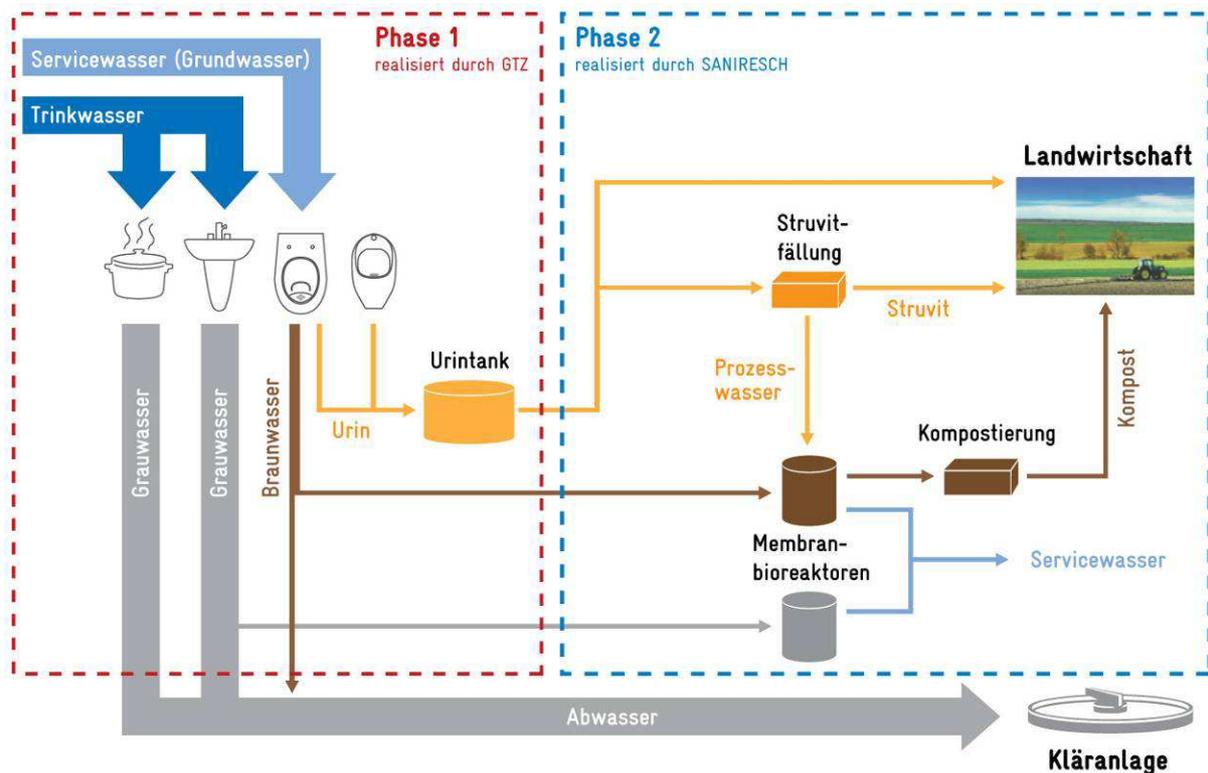
Das Forschungsvorhaben SANIRESCH bearbeitet in seiner Verbundstruktur bestehend aus sechs Partnern eine Vielzahl von Fragestellungen und Themen. Die drei Hauptaufgaben, worunter sich diese Fragestellungen gliedern lassen, können wie folgt benannt werden. Die erste übergreifende Aufgabe des Projekts besteht in der Entwicklung von ausgereiften Technologien zur Urin-, Braun- und Grauwasserbehandlung, die im städtischen Umfeld in Deutschland und international eingesetzt und sowohl störungsfrei als auch wirtschaftlich betrieben werden können. Darüber hinaus sollte, mit Blick auf eine zukünftige Zulassung dieser Produkte als Düngemittel, die Beurteilung der Umweltverträglichkeit der landwirtschaftlichen Verwertung von Urin und Struvit als Produkt als auch in den einzelnen Behandlungsschritten hin zum Produkt geklärt werden. Drittens lag ein Hauptaugenmerk des Projektes darauf, die Erschließung von Exportchancen für deutsche Technologie und Konzepte zur ökologischen Sanitärversorgung weiter voranzubringen und hierzu wichtige Impulse beizusteuern.

### 2.2 Voraussetzungen der Durchführung des Vorhabens

Die Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH (seit dem 1.1.2011 Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH) hat im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen 2005-2006 in ihrem Hauptgebäude in Eschborn ein System zur getrennten Erfassung von Urin<sup>1</sup>, Braun- und Grauwasser eingebaut. Gründe hierfür waren eine Vermeidung von Umweltbelastungen durch die Einleitung der enthaltenen Nährstoffe und Mikroverunreinigungen in das Kanalisationssystem, die Rückgewinnung der immer knapper werdenden Nährstoffe aus dem Urin zur landwirtschaftlichen Verwertung und die Aufbereitung und Verwertung des Braun- und Grauwassers zu ermöglichen, um einen sparsameren Umgang mit der Ressource Wasser zu erreichen (siehe Abbildung 1, Phase 1). Das System zur getrennten Erfassung des Urins, des Braun- und Grauwassers umfasst Separationstoiletten, wasserlose Urinale, separate Leitungssysteme für Urin, Braunwasser und Restabwasser, sowie mehrere Tanks zur Urinspeicherung.

---

<sup>1</sup> Im Folgenden bezeichnet „Urin“ damit nicht nur die direkt vom Menschen ausgeschiedene Form, sondern auch das aus dem Sanitärsystem der GIZ stammende, von seinen Eigenschaften eher als Gelbwasser zu bezeichnende Material. Dieser Abwasserstrom ist jedoch, da keine bewusste Verdünnung mit Wasser erfolgte laut der durch die DWA (2008) festgelegte Terminologie als Urin zu bezeichnen.



**Abbildung 1:** Darstellung des neuartigen Sanitärkonzepts in der GIZ in Eschborn unterteilt in seine beiden Phasen der Umsetzung.

Das System ist im mittleren Gebäudeteil eingebaut, die beiden Flügel verfügen über konventionelle Technik. Diese Implementierung (Phase 1) war die Voraussetzung für die Beantragung des Forschungsvorhabens SanitärRecycling Eschborn und dessen Umsetzung, die Mitte 2009 begann. Häufig wird in diesem Bericht die Lage des SANIRESCH-Systems mit „Haus 1“ angegeben. Das ist der interne GIZ-Name des Gebäudes.

## 2.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen des beantragten Forschungsvorhabens wurden die Behandlung und Verwertung von Urin, Braun- und Grauwasser umgesetzt und wissenschaftlich begleitet (siehe Abbildung 1, Phase 2). Technologien zur Urin-, Braun- und Grauwasserbehandlung und Praktiken zur landwirtschaftlichen Verwertung wurden teilweise zur Markt- und Praxisreife weiterentwickelt. Wichtige Fragestellungen bezüglich der Nutzerakzeptanz, Umwelt- und Gesundheitsrisiken der Verwertung, Wirtschaftlichkeit und internationale Übertragbarkeit, sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen wurden wissenschaftlich untersucht.

In 2009 standen die Projekt- und Anlagenplanung, die Erfassung der Stoffströme und die bereits in Phase 1 entstandenen Projektdaten im Mittelpunkt.

2010 erfolgten die ersten landwirtschaftlichen Versuche, die erste Nutzerbefragung, die Implementierung und die Inbetriebnahme des MAP-Fällungsreaktors. Außerdem wurden die ermittelten Wirtschaftlichkeitsdaten für Phase 1 ausgewertet, eine Dokumentation des Betriebs der NoMix-Toiletten und wasserlosen Urinale eingeführt sowie die Qualität des gelagerten Urins untersucht.

2011 wurden, neben einer Fortführung der genannten Arbeiten, die beiden Membranbioreaktoren (MBR) für Braun- und Grauwasser in Betrieb genommen. Die Forschung rund um Überwachung und Betrieb sowie Qualität der Produkte gewann zunehmend an Intensität. Die Arbeit an Wirtschaftlichkeit, internationaler Übertragbarkeit und den rechtlichen Rahmenbedingungen wurden in der zweiten Jahreshälfte verstärkt aufgenommen.

2012 stand im Zeichen der Weiterführung begonnener Untersuchungen, der Detailklärung einzelner Aspekte sowie der Konsolidierung und der Ergebnissicherung.

## **2.4 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens**

### **2.4.1 Haus- und Sanitärinstallationen**

Roediger Vacuum GmbH entwickelt und vertreibt seit 1972 Abwassersammel- und Abwassertransportsysteme mittels Unterdruck – sogenannte Vakuum-Entwässerungssysteme. Die bis zum Projektstart gesammelten Erfahrungen zeigten auf, dass durch die Vakuumtechnik die Trennung der Abwasserteilströme einfach zu realisieren ist. Dadurch kam Mitte der 90ziger Jahre die Idee auf, die getrennte Erfassung der einzelnen Abwasserströme gleich an der Einleitstelle, also am Toilettenbecken zu realisieren. Roediger Vacuum begann mit der Entwicklung einer Separationstoilette mit Wasserspülung, die die Trennung des Urins und des Brauwassers direkt im Toilettenbecken ermöglicht. Die entstandene NoMix-Toilette kann man als Mischung zwischen einem Urinal Becken und einem herkömmlichen Toilettenbecken in nur einem Porzellankörper bezeichnen. Sie besitzt im vorderen Bereich eine in das Porzellan eingearbeitete Urinableitmöglichkeit. Der hintere Bereich wird zur Ableitung der Fäzes verwandt.

Die NoMix-Toilette wurde im Jahr 2001 patentiert und wird seit 2002 vertrieben. Bis zum Projektbeginn wurden die NoMix-Toiletten lediglich in kleinen Stückzahlen – bei diversen Pilotprojekten – eingesetzt. In diesen Projekten zeigte sich, dass sich die Trennung von Urin und Fäzes gut durchführen lässt. Auch das Spülverhalten hinsichtlich der unverdünnten Trennung des Urins wurde für gut befunden. Bei den ausschließlich schwedischen Wettbewerbsprodukten wie BB Innovation & Co AB (Modell Nova Dubletten), Gustavsberg (Modell Nordic) und WostMan Ecology (Modell EcoFlush) geht die Urintrennung immer mit einer Spülwasservermischung einher. Im Gebäude der GIZ in Eschborn wurde erstmals in Deutschland eine große Anzahl dieser Separationstoiletten in einem Gebäude verbaut. Mit dem SANIRESCH Projekt sollte eine langfristige Überprüfung der technischen Zuverlässigkeit und Funktionstüchtigkeit, der Betriebssicherheit und die optimale Wartungshäufigkeit ermittelt werden.

### **2.4.2 Anlagentechnik**

Eine in Deutschland weitgehend einmalige Anlage zur dezentralen Abwasseraufbereitung im Sinne des vorliegenden Forschungsantrags ist am Standort von HUBER SE in Berching zu finden. Der Neubau des Bürogebäudes für rund 200 Mitarbeiter wurde 2003 mit einer neuartigen Sanitärtechnik zur separaten Erfassung der Stoffströme ausgestattet, welches in der

Technik vergleichbar mit dem Bürogebäude der GIZ ist. Dabei sind NoMix-Toiletten installiert worden, die eine Vermischung von Urin und Fäkalien verhindern. Neben den Spültrenntoiletten stehen außerdem wasserlose Urinale zur Verfügung. Die Besonderheit dieses aus eigenen finanziellen Mitteln gestalteten Forschungs- und Demonstrationsprojekts liegt darin, dass Technologien zur Behandlung aller einzelnen Abwasserströme im halbtechnischen Maßstab realisiert wurden, um praktische Erfahrungen im Umgang mit den spezifischen Medien zu sammeln. Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse können je nach Randbedingung und Behandlungsziel verschiedene Konzepte angeboten werden.

Zur Entwicklung umfassender Konzepte werden bei HUBER SE die Abwasserteilströme Braunwasser (mit ca. 1000 l d<sup>-1</sup>), Gelbwasser (ca. 125 l d<sup>-1</sup>), Grauwasser (mit etwa 500 l d<sup>-1</sup>) und Regenwasser separat erfasst und zum Teil behandelt, um je nach Einsatzfall Wasser, Nährstoffe und Energie zurückzugewinnen bzw. um von Schadstoffen (Schwermetalle) befreites Regenwasser zur Anreicherung des Grundwassers nutzen zu können.

Eine Möglichkeit zur Rückgewinnung des Phosphors aus dem Urin stellt die MAP-Fällung dar. Unter MAP versteht man die kristalline Verbindung Magnesiumammoniumphosphat häufig auch Struvit genannt. Die MAP-Fällung ist ein Verfahren um gemeinsam Stickstoff in Form von Ammonium und Phosphat unter Zugabe eines Magnesium-Fällmittels (Magnesiumoxid oder -chlorid) chemisch zu fällen. Eine großtechnische Umsetzung der MAP-Fällung zur Behandlung von Urin ist erstmals im Betriebsgebäude von HUBER SE in Berching durchgeführt worden. Weitere Anlagen zur Behandlung von Urin mit diesem Verfahren bestehen nicht.

Marktreife Verfahren zur dezentralen Abwasserbehandlung sind vor allem für die dezentrale Behandlung von Mischabwasser aus Haushalten im ländlichen Raum mit dem Ziel der Direktleitung oder Versickerung und für die dezentrale Aufbereitung von Grauwasser zu Brauchwasser für den ländlichen und städtischen Raum verfügbar. Verfahren zur Behandlung von Braunwasser, welche im städtischen Raum, z. B. innerhalb von Bürogebäuden eingesetzt werden können, sind noch nicht auf dem Markt erhältlich. In verschiedenen Projekten in Deutschland wird zurzeit die Behandlung von Braun- und Schwarzwasser erprobt bzw. erforscht.

Ein häufig verfolgter Ansatz ist die Sammlung von konzentriertem Schwarzwasser in einer Vakuumkanalisation mit anschließender Anaerobbehandlung. Ziel ist hierbei die Gewinnung von Biogas und Flüssigdünger. Entsprechende Projekte in Deutschland werden zum Beispiel in Lübeck (Flintenbreite) und in Freiburg (Vauban) durchgeführt. Ein weiterer Ansatz aktueller Forschungsprojekte besteht in der Abtrennung der Feststoffe aus Braunwasser mit dem Ziel der Düngergewinnung. Zur Behandlung der Feststoffe werden Entwässerungs- und Rotungsverfahren (z.B. Lambertsmühle, Berlin-Stahnsdorf) oder Anaerobverfahren (z. B. bei Firma HUBER SE, Berching) eingesetzt. Das von den Feststoffen befreite Restabwasser wird in diesen Projekten in weiteren Verfahrensschritten (z. B. Pflanzenkläranlagen oder Membranbelebungsanlagen) aufbereitet.

Das Projekt der GIZ verfolgt einen neuen Ansatz, bei dem das Braunwasser mit einem physikalisch biologischen Verfahrensschritt zu einer Qualität aufbereitet wird, die die Verwertung als Brauchwasser oder die Direkteinleitung erlaubt. Hierfür eignet sich das Membranbelebungsverfahren in besonderer Weise. Die Membranbelebungsanlage, auch Membranbioreaktor (MBR) genannt, ist eine Kombination aus einem Belebungsbecken mit einer Membranfiltration zur Abtrennung des belebten Schlammes. Die Membranfiltration übernimmt anstelle der konventionellen Nachklärung (durch Sedimentation) die Abtrennung des belebten Schlammes. In den letzten Jahren wurden Membranbelebungsanlagen sowohl zur kommunalen als auch industriellen Abwasserbehandlung eingesetzt und können damit als Stand der Technik gelten (Melin et al., 2005; Dohmann und Baumgart, 2007).

Noch nicht eingesetzt wurde die Membranbelebung bisher für die Behandlung von Braunwasser. Bei diesem Anwendungsfall spielt die mechanische Vorbehandlung zur Entfernung oder Zerkleinerung der Feststoffe (Fäkalien, Klopapier etc.) eine entscheidende Rolle. Als fester Abfall fallen bei diesem Abwasserbehandlungskonzept der Überschussschlamm und die Feststoffe an.

### **2.4.3 Betrieb und Überwachung**

Ökologische Abwasserkonzepte mit Urin-, Braun- und Grauwasserseparation wurden bislang nur in wenigen Projekten umgesetzt; existierende Projekte besitzen ausnahmslos Pilot- oder Demonstrationscharakter. So sind auch die Behandlungsanlagen beim Projekt im Firmengebäude von HUBER SE, welches dem Projekt in der GIZ vom technischen Konzept her sehr ähnlich ist, als Versuchsanlage außerhalb des Gebäudes im Container ausgeführt. Daher gab es bislang in Deutschland keine Erfahrungen mit dem Betrieb von Anlagen ökologischer Abwassersysteme und mit den Verwertungsketten der Produkte unter „realen“ Betriebsbedingungen wie sie im Projekt der GIZ gegeben sind.

Die Fällung von Phosphor und Stickstoff aus Urin zu MAP (Struvit) ist eine seit langem bekannte Möglichkeit der Rückgewinnung dieser Nährstoffe. Die Behandlung von Urin wurde in diesem Projekt aber erstmals großtechnisch im Dauerbetrieb mit einem Durchsatz von bis zu  $500 \text{ l d}^{-1}$  durchgeführt. Ziel war die Gewinnung größerer Mengen MAP für die im Projekt parallel laufenden Düngeversuche. Auch die Behandlung von Grauwasser mit Membranbelebungsanlagen ist Stand der Technik und wird in Deutschland z.B. in einigen Hotels praktiziert. Üblicherweise stellt dabei das Duschwasser einen erheblichen Anteil am Grauwasser dar; dies war in diesem Projekt jedoch nicht der Fall, da nur Handwaschbecken und die Teeküchen angeschlossen waren. Hinzu kam, dass am Wochenende praktisch kein Grauwasser anfiel und deshalb im Betrieb diese Zeiten ohne Zufluss überbrückt werden mussten. Die Behandlung von Braunwasser mit einem Membranbelebungsverfahren im Dauerbetrieb ist in der Literatur noch nicht beschrieben. Da Braunwasser üblicherweise hohe Gehalte an organischen Substanzen enthält, wird i.d.R. eine anaerobe Behandlung empfohlen (DWA, 2008).

#### 2.4.4 Produktqualität

Urin und Fäkalien können eine bedeutende Rohstoffquelle zur landwirtschaftlichen Nutzung darstellen und wurden schon früh zu Dünge Zwecken eingesetzt (King, 1911). Das zunehmende Wissen über den Zusammenhang zwischen fäkalen Verunreinigungen und dem Auftreten von Krankheiten führte zur Einführung von Spültoiletten, Kanalisationen und dem heutigen Stand der Technik bei der Abwasserreinigung. Erst seit wenigen Jahren bilden die menschlichen Ausscheidungen wieder wichtige Nährstoffquellen, deren landwirtschaftliche Nutzung insbesondere in ländlichen Regionen mit Wassermangel in den Fokus des Interesses gerückt ist. Menschliche Ausscheidungen bilden heute auch eine Quelle für die Verbreitung von Arzneimitteln, ihren Metaboliten, Transformationsprodukten und Konjugaten via Kanalisation und Abwasserreinigung in Oberflächenwasser, Grundwasser und Boden.

Untersuchungsergebnisse aus Forschungsvorhaben, die sich mit Medikamenten als Inhaltsstoffen von Urin und Fäkalien nicht unter medizinischen sondern siedlungswasserwirtschaftlichen und umwelthygienischen Gesichtspunkten befassen, sind zahlreich beschrieben. Eine umfangreiche Dokumentation über Forschungsvorhaben, die sich mit dem Vorkommen von Arzneimitteln in der Umwelt beschäftigen, findet sich in einem Datenbankauszug aus der Umweltforschungsdatenbank des UBA (Groh et al., 2011).

Da ca. 70% aller eingenommenen Medikamentenwirkstoffe in den menschlichen Ausscheidungen nachgewiesen werden und über den Wasserkreislauf in die Umwelt gelangen können (BLAC, 2003; Larsen und Lienert, 2007), liegt der Fokus der Untersuchungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen im Rahmen des Projektes SANIRESCH auf dem Verhalten von Arzneimitteln im Urin und in Faeces bei der Lagerung, der abwassertechnischen Behandlung, der Gewinnung von Düngemitteln und dem Verhalten bei Düngeversuchen in der Landwirtschaft.

Versuche zur Lagerung von Urin wurden bereits von Gajurel et al. (2007) beschrieben. Die Proben wurden über ein Jahr unter unterschiedlichen Bedingungen gelagert und Veränderungen der Konzentrationen verschiedener dotierter Medikamente bestimmt. Zusätzlich erfolgten vergleichende Untersuchungen über die Wirkung von Ozon und UV-Licht auf die Degradation der Pharmazeutika im Urin. Bei den in den Versuchen gewählten Konzentrationen von  $10 \text{ mg l}^{-1}$  wurden die Pharmazeutika Clofibrinsäure, Ibuprofen, Carbamazepin und Diclofenac während einer einjährigen Lagerung in Urin nicht eliminiert. Auch Veränderungen des pH-Wertes und der Temperatur hatten keinen Einfluss. Erst mit Hilfe einer Behandlung mit z.T. hohen Dosen von Ozon konnten die Pharmazeutika umgesetzt werden.

Bei anderen Lagerversuchen wurde das Hauptaugenmerk auf das Verhalten von potentiellen Krankheitserregern gelegt, da man von einer Nutzung der menschlichen Abgänge ohne Nährstoffrückgewinnungsprozess ausging (Vinnerås et al., 2008). Die Autoren stellten fest, dass es in unverdünntem Urin auf Grund des hohen Ammonium-Gehaltes bei der Lagerung zu einer Keimreduktion kommt, weshalb die von der WHO empfohlenen Lagerzeiten von 6 Monaten eingehalten werden sollte (WHO, 2006).

Die im Urin enthaltenen Nährstoffe lassen sich durch eine Struvitfällung in einen langsam wirkenden Dünger umwandeln. Auf diese Weise können bis zu 98% des im Urin enthaltenen Phosphors rückgewonnen werden (Ronteltap et al., 2007a). Die Autoren wiesen ebenfalls nach, dass bei der Fällung die in den Experimenten eingesetzten Pharmazeutika zu 98% in der flüssigen Phase verblieben und so nicht in den Dünger Struvit in nennenswerten Konzentrationen übergangen (Ronteltap et al., 2007b). Dieser Effekt konnte auch am ISA der RWTH in früheren Arbeiten belegt werden (Montag et al., 2009).

#### **2.4.5 Landwirtschaftliche Produktion**

Urin in originärer Form kann als mineralischer Mehrnährstoffdünger mit geringen Nährstoffgehalten (N ca. 1%; P, K < 1%) angesehen werden. Die Nährstoffkonzentrationen liegen niedriger als in synthetisch hergestellten Mineraldüngern und höher als die von Wirtschaftsdüngern.

Die Eignung als Mineraldünger war vor Projektbeginn in einzelnen Untersuchungen bereits belegt (Simons und Clemens, 2004; Jönsson et al 2004; Muskulos, 2008), Es existierten jedoch weder Düngepläne, die Urin und die Konsequenzen einer Implementierung auf andere Wirtschafts- oder Mineraldünger berücksichtigten, noch eine Zulassung zur Ausbringung, die nach Düngemittelverordnung (DüMV 2003) erforderlich ist. Ebenso fehlten Arbeiten zum Einsatz bei nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRos). Dies ist insbesondere bedeutsam, da die Nachfrage nach NaWaRos immer größer wird und deren Anbau mittlerweile auch auf Nichtstilllegungsflächen interessant ist.

Außerdem fehlten Kenntnisse über die Verwertungskette vom Sammelbehälter einer Abwasserbehandlungsanlage bis zum Feld. Hierbei sind in Besonderen die Lagerung und die Ausbringung von Urin bzw. Urinprodukten zu nennen. Für Urin erschien eine Ausbringung mittels Gülletechnik sinnvoll. Für andere urinbürtige Substrate fehlten jedoch Ansätze für die logistische Verwertungskette, die von der Menge, Konsistenz, Nährstoffzusammensetzung und anderen Parametern, wie z.B. Geruch abhängen.

Eine direkte Ausbringung ohne Vorbehandlung (z.B. Lagerung) wird nicht empfohlen, da Urin durch Kontamination von Erkrankten oder durch geringe Teilmengen an Braunwasser aus dem Sanitärsystem mikrobiell verunreinigt sein kann (Tuschewitzki, 2003, WHO, 2006). Daneben können im Urin Mikroverunreinigungen vorhanden sein, wie z.B. Hormone, Antibiotika und andere pharmazeutische Wirkstoffe (Butzen et al. 2005).

Einzelkomponenten-Analytik stößt dabei rasch an ihre methodischen und finanziellen Grenzen. Dagegen ist es möglich, einen Summenparameter (analog dem CSB im Abwasser) für eine Gruppe von organischen Mikroverunreinigungen einzusetzen, die sog. endokrinen Disruptoren: *"An endocrine disrupter is an exogenous substance or mixture that alters function(s) of the endocrine system and consequently causes adverse health effects in an intact organism, its progeny or (sub)populations"* (EU, 1999).

Zu dieser Gruppe zählen Hormone, Pflanzenschutzmittel, Medikamente bzw. deren Metaboliten, sowie andere Stoffe, wie z.B. Kosmetika (Daughton und Ternes, 1999; Shore und Shemesh, 2003). Mit einem Bioassay lassen sich diese Stoffe relativ einfach nachweisen (Beresford et al., 2000; De Boever et al., 2001). Der Test wurde beispielsweise von Stuer-Lauredsen et al. (2005) zum Monitoring von Gewässern in Dänemark genutzt. Im Rahmen dieses Vorhabens sollte eine Methode zur Anreicherung entwickelt werden, so dass das bestehende Verfahren auch auf Urin, Böden und Pflanzen angewendet werden kann.

#### **2.4.6 Akzeptanz**

Jede innovative Technologie bedarf der Akzeptanz, um sich langfristig durchsetzen zu können. Ob sich eine innovative Technologie wie bspw. NASS-Konzepte entwicklungsfördernd auswirken können, hängt weitgehend von der Akzeptanz ihrer Nutzer ab. Neben den erwünschten Folgen bringt technischer Fortschritt meist auch unerwünschte Nebeneffekte mit sich, die dazu beitragen, die Akzeptanz zu verringern (Grundwald, 2005). Bei der Analyse von Technikakzeptanz ist der Frage nachzugehen, wie ein Verhalten auf Grund der Einstellung zustande kommt und von welchen Faktoren die Einstellung und das Verhalten beeinflusst werden. In anderen Technikzusammenhängen hat sich gezeigt, dass Verhaltensakzeptanz im Sinne der tatsächlichen Nutzung auf Grund einer positiven Einstellungsakzeptanz zustande kommt. (Bürg et al., 2004). Zum Zeitpunkt des Projektbeginns gab es im Zusammenhang mit der Einführung von NASS-Systemen in Deutschland noch keine länger angelegte Untersuchung auf der Nutzerebene. In dem Projekt NOVAQUATIS in der Schweiz (EAWAG, 2006) fand in geringerem Umfang eine Akzeptanzstudie zu einem neuartigen Sanitärsystem in einem Bürogebäude statt. Bei dieser Studie ließ sich feststellen, dass NASS-Implementierungen durchaus positiv angenommen werden, sofern die Nutzer vor dem ersten Kontakt mit dem System über die Technik und den Zweck aufgeklärt wurden. Eine Umfrage bei diesen Nutzern nach einem definierten Nutzzeitraum ergab sogar, dass für diese ein neuartiges Sanitärsystem auch im privaten Bereich vorstellbar ist und dass diese Lebensmittel, die mit Urin gedüngt wurden, kaufen würden. (EAWAG, 2006).

Eine längerfristig angelegte Akzeptanzerhebung unter Berücksichtigung und Analyse verschiedener Nutzergruppen sowie Steuerungs- und Informationsmaßnahmen im Zusammenhang mit NASS-Systemen hat zu Projektbeginn bundesweit nicht gegeben. Auch im Zusammenhang mit der Akzeptanz von Landwirten und Verbrauchern gab es zu Projektbeginn wenig vergleichbare Studien mit ähnlichen Fragestellungen und Untersuchungsschwerpunkten. In Berlin (Muskolus, 2008) und im Schweizer NOVAQUATIS-Projekt wurden Landwirte und Konsumenten zu ihrer Meinung in Bezug auf den Einsatz von Urin und Urin-basierten Produkten in der landwirtschaftlichen Produktion befragt. Allerdings fanden die Befragungen der Studie von Muskolus (2008) im Rahmen von „grünen“ Veranstaltungen wie der Grünen Woche und einem Tag der offenen Tür der Landwirtschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität Berlin statt, so dass aller Wahrscheinlichkeit nach eher ökologisch Interessierte befragt wurden. In allen bisherigen Studien ergab sich unter den befragten Landwirten generell eine akzeptierende Haltung gegenüber dem Einsatz von Urin als Dünger. Allerdings kamen immer wieder Ängste in Bezug auf die Vermarktbarkeit sowie Bedenken im Zusammen-

hang mit der Sicherheit (Pharmazeutikarückstände, Schwermetalle u. ä.) zum Ausdruck. In der vorliegenden Studie wurden erstmals in einer größer angelegten Befragung Verbraucher landwirtschaftlicher Produkte schriftlich zu ihrer Meinung befragt. Das Ziel war es, die bisherigen Ergebnisse in einem systematischen Ansatz um Ergebnisse auf verschiedenen Ebenen (Nutzer, Landwirte, Verbraucher) zu ergänzen.

### **2.4.7 Wirtschaftlichkeit**

Da es bis Projektbeginn nur wenige Studien zur Wirtschaftlichkeit von nachhaltigen Sanitärsystemen (NASS) gab, stammen Informationen meist aus Pilot- und kleineren Demonstrationsprojekten, deren Ergebnisse dann für die Wirtschaftlichkeit auf eine größere Skala übertragen wurden (Oldenburg, 2007; Lindner, 2008; Engelhart und Kerr, 2009). Erste Ergebnisse bereits vorliegender Studien legen nahe, dass kreislauforientierte Abwassersysteme basierend auf Stoffstromtrennung wirtschaftlich mit herkömmlichen Lösungen vergleichbar sind bzw. sogar Kostenvorteile gegenüber herkömmlichen Systemen haben können (Peter-Fröhlich et al., 2006; DWA, 2010).

Häufige Ursachen für die noch nicht erreichte Wirtschaftlichkeit und Konkurrenzfähigkeit gegenüber konventionellen Sanitärsystemen sind in höheren Investitions-, und Betriebskosten begründet, da die Nachfrage noch relativ gering, die Automatisierung der Anlagen noch nicht erfolgt/möglich und die vollständige Marktreife der Produkte noch nicht erfolgt ist. Die hohen Investitionskosten beruhen auf der Notwendigkeit einer mehrfachen Leitungsführung für die getrennte Abführung der Abwasserströme genauso wie spezielle Toiletten- und Urinaltypen sowie Behandlungsanlagen und Anlagenteile zu installieren.

Parallel spielen auch die rechtlichen Rahmenbedingungen eine ausschlaggebende Rolle für die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme. Da die gewonnenen Produkte (gelagerter Urin, MAP) noch nicht oder nur unter großen Auflagen in der Landwirtschaft zum Einsatz kommen können, ist ihre Attraktivität und somit ihr Wert sehr gering (DWA, 2008). Außerdem sind die Produktionskosten oft noch hoch und stehen dann noch relativ niedrigen Nährstoffpreisen gegenüber. Daher ist es wichtig, Maßnahmen zur großtechnischen Phosphorrückgewinnung mit Hinblick auf die Rohstoffverknappung und einer einhergehenden Verminderung der Qualität zu fördern wie dies in der Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ parallel zu SANIRESCH geschah (Pinnekamp, 2011).

Die Ausbringung von Urin als Düngemittel wurde schon in mehreren Studien untersucht. Die anfallenden Kosten bewegen sich in der Größenordnung anderer Mineraldünger, wenn die Rahmenbedingungen des Standorts günstig sind (Tidåcker et al., 2007; Maurer et al., 2003; Wittgren et al., 2003). Studien der letzten Jahre gehen meist von einer Wirtschaftlichkeit des Transports zwischen Entstehungsort und landwirtschaftliche Nutzung zwischen 10 und 60 km Entfernung aus (Tidåcker et al., 2007; Maurer et al., 2003; Wittgren et al., 2003).

### **2.4.8 Internationale Übertragbarkeit**

Die Untersuchung der internationalen Übertragbarkeit dient der Identifizierung von Einsatzmöglichkeiten und Exportchancen der in SANIRESCH-untersuchten Technologien in andere Länder.

Im Bereich der neuartigen Sanitärversorgungen lassen sich die verwendeten Techniken in Low- und High-Tech Verfahren unterscheiden. Low-Tech Ansätze basieren auf den Grundsätzen von einfacher Bedienung, Herstellung und Funktion, und sollen robust und wartungsarm sein. Zu diesen Techniken gehört zum Beispiel der Einsatz von Trocken(trenn)toiletten, bei denen die Trennung und separate Lagerung der Fäzes und des Urins möglich ist, gepaart mit einem lokalen Logistik- und Behandlungssystem (Rieck et al., 2012; von Münch und Winker, 2011). Ein Projekt in dem Trockentrenntoiletten in großem Maßstab zum Einsatz kommen ist das Projekt der eThekwini Kommunalverwaltung in Durban in Südafrika (Roma et al., 2011). Low-Tech Ansätze wie die Trockentoiletten sind besonders in Schwellen-, und Entwicklungsländern wichtig, da Schätzungen davon ausgehen, dass bis zum Jahr 2050 rund 70% der Bevölkerung in urbanen Gebieten mit geringem Einkommen leben werden (UN-HABITAT, 2010).

Zu den High-Tech Ansätzen zählt neben wassereinsparenden Ansätzen wie der Vakuumentversorgung, wie sie aktuell in dem Projekt CUVE in Namibia erprobt wird (Eisold und Benzing, 2010), auch die Implementierung von Technologien zur Stoffstromtrennung und getrennten Behandlung z.B. mit Hilfe von Membranbioreaktoren. Der Einsatz von Membranbioreaktoren (MBR) findet weltweit mehr und mehr Verbreitung im Bereich der Schwarz- und Grauwasserbehandlung (Löw, 2010). Wesentliche Vorteile von MBR gegenüber bestehenden biologischen Abwasserreinigungstechniken sind die sehr gute Ablaufqualität des gereinigten Wassers sowie der geringere Platzbedarf der Anlagen gepaart jedoch mit dem Anspruch einer kontinuierlichen Stromversorgung (Löw, 2010).

Auch die Rückgewinnung von Phosphor aus Urin wurde bereits in anderen Projekten erforscht. So beschäftigte sich das Projekt STUN der EAWAG ausführlich mit der Low-Tech Ausfällung aus Urin in Nepal (Etter et al., 2011). Parallel wurde eine Vorversion des in diesem Projekt implementierten MAP-Fällungsreaktors in dem BMBF-Vorhaben SANSED in Vietnam unter den lokalen Bedingungen erprobt (Arnold und Gresens, 2009).

## **2.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Forschungsprojekt hat sehr eng mit dem KA-1 „Neuartige Sanitärsysteme“ der DWA kooperiert. Viele Ergebnisse sind direkt in die Arbeit des Ausschusses eingeflossen. Dies lag sicherlich auch daran, dass viele Projektpartner (HUBER SE, GIZ, Universität Bonn) im KA-1 vertreten sind. Außerdem haben einige der Arbeitsgruppen des Fachausschusses in Eschborn getagt und sich parallel zur Sitzung über den Fortschritt des Projekts informiert.

Darüber hinaus hat SANIRESCH einen engen Kontakt zu Hochschulen und Universitäten gepflegt. Dies geschah sowohl im Rahmen von Führungen und dem Studententag in Eschborn als auch durch Vorlesungen direkt in den Universitäten. Darüber hinaus haben 14 Studenten im Projekt eine Abschlussarbeit geschrieben und 12 weitere ein Praktikum innerhalb des Projekts absolviert, so dass zahlreiche Kooperationen zwischen dem Projekt und weiteren Hochschulen bestanden haben. Auch promovierte Maria Arias, unterstützt durch ein IpsWat Stipendium und mit zusätzlichen Untersuchungen in Kolumbien innerhalb SANIRESCH.

An den teilnehmenden Hochschulen Universität Bonn, RWTH Aachen und TH Mittelhessen sind viele der Ergebnisse in die Lehre eingeflossen und ermöglichen auf diese Weise den Studenten und potentiellen zukünftigen Anwendern moderner Abwasserreinigungstechnologien die Ansätze für Ressourcen schonendes Handeln in ihre Arbeit zu implementieren. So fand das Thema auch Eingang in ein interdisziplinäres Projektseminar mit Studierenden der Studiengänge Architektur, Umwelttechnik und Landwirtschaft aus Bonn und Stuttgart, wo mit Mitarbeitern der Stadt Andernach neue Konzepte für „Die eßbare Stadt“ erarbeitet wurden.

Parallel sind auch Fragestellungen aus der Akzeptanzuntersuchung in die umweltsoziologischen Seminare am Institut für Soziologie (RWTH Aachen) eingebracht worden und tragen dort auch zur Entwicklung weiterer Projekte bei. Ebenfalls dazu beitragen wird die Mitarbeit von Wissenschaftlern der RWTH-Aachen in nationalen und internationalen Normungsgremien auf dem Gebiet der Abwassertechnik, da insbesondere Techniken der Abwasserwiederverwendung zunehmend in die Arbeit der Normungskomitees Eingang halten (CEN TC 165 WG 50 „Wastewater Reuse“).

## **3. Darstellung der Ergebnisse**

### **3.1 Sanitär- und Hausinstallationen (Verantwortlich: Roediger Vacuum)**

#### **3.1.1 Ziele der Projektkomponente**

Ziel des Projektes war die Erforschung der separaten Erfassung, Behandlung und Verwertung von Urin, Braunwasser und Grauwasser im Gebäude 1 der GIZ in Eschborn. Hierzu wurden im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen die Roediger NoMix-Toiletten eingebaut, um die getrennte Erfassung von Urin und Braunwasser zu ermöglichen. Durch separate Rohrleitungen für den Urin konnte der so abgeleitete Urin in einem Tank zur Speicherung gesammelt werden, um ihn später der weiteren Behandlung zu zuführen.

Roediger Vacuum GmbH sollte hierbei die eingesetzten NoMix-Toiletten optimieren und in den bauseits gestellten Urinsammeltanks Füllstandsonden einbauen, die zur Überwachung der Füllmengen in den Tanks für die MAP-Fällung dienen. Die Separationstoiletten waren zum Zeitpunkt des Projektbeginns bereits 5 Jahre auf dem Markt. Im Gebäude der GIZ in Eschborn wurden jedoch zum ersten Mal eine so große Anzahl dieser Toiletten verbaut.

Mindestens halbjährlich sollte durch das Personal von Roediger die Toiletten überprüft und gewartet werden. Gegebenenfalls sollten die in den Toiletten verwandten Materialien, wie Ablaufventile, Siphons, Bowdenzüge neu justiert bzw. bei Bedarf auch ausgetauscht werden. Hierbei sollten festgestellte Mängel an den einzelnen Komponenten verbessert und diese Verbesserungen in die Produktion der Ersatzteile einfließen.

Das Ziel hierbei war die langfristige Überprüfung der technischen Zuverlässigkeit und Funktionstüchtigkeit der Toiletten sowie deren Betriebssicherheit im Allgemeinen. Ferner sollte die optimale Wartungshäufigkeit ermittelt werden. Des Weiteren sollte das Auftreten von Ausfällungen, sprich Inkrustationen durch Urinstein und andere unvorhergesehener Gegebenheiten erkannt werden, mit dem Ziel diesen durch entsprechende Gegenmaßnahmen entgegen zu wirken.

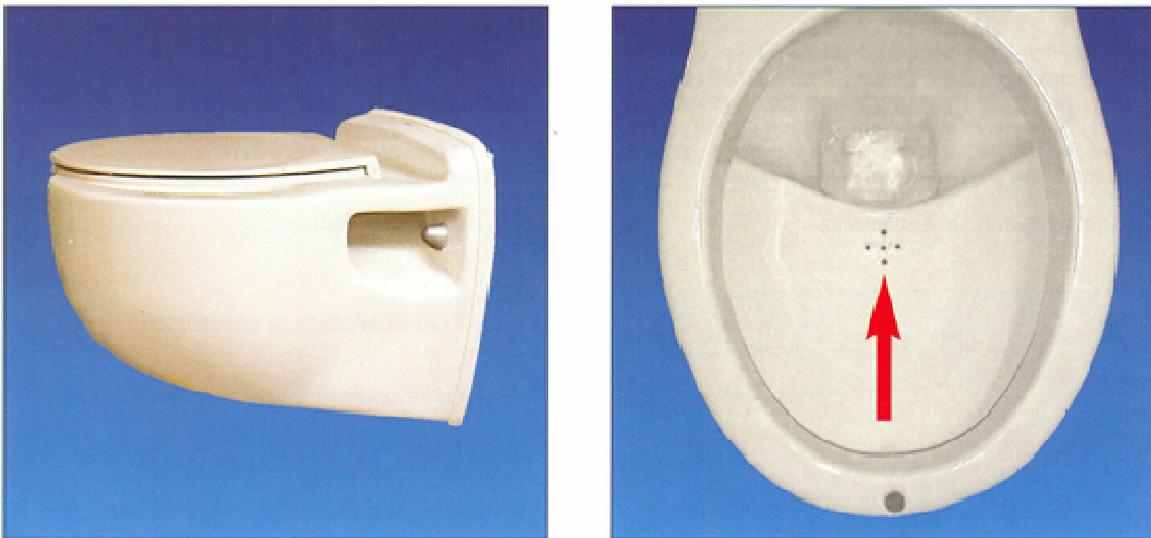
Das Reporting hierzu sollte in einem von GIZ und Roediger gemeinsam entwickelten Betriebstagebuch stattfinden. Ein solches Betriebstagebuch ist auch bei der Auswertung der aufgetretenen Störungen hilfreich.

Zeitgleich wurden durch die GIZ die eingebauten wasserlosen Urinale der Firma Keramag regelmäßig kontrolliert und die Ergebnisse dokumentiert, um auch hier über den kompletten Projektverlauf die Performance abbilden zu können.

### 3.1.2 Material und Methoden

#### 3.1.2.1 NoMix-Toilette und ihre Funktion

Die Spültrenntoilette (auch NoMix-Toilette genannt; für Details zur Klassifizierung siehe DWA (2008)) von Roediger ermöglicht ein unverdünntes Trennen von Urin und Braunwasser und damit eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Weiterverwertung des Urins. Sie ist damit ein wesentlicher Bestandteil des SANIRESCH-Gesamtkonzeptes und erlaubt eine effiziente Nährstoffgewinnung aus den menschlichen Ausscheidungen.



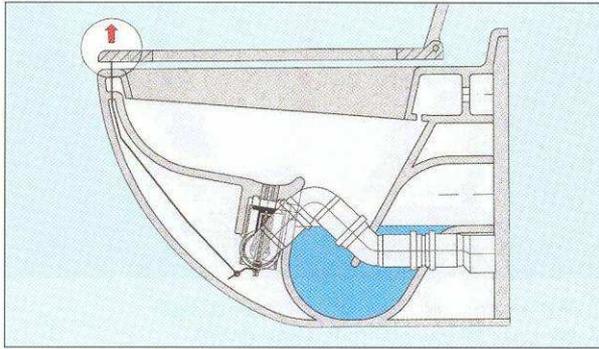
**Abbildung 2: Roediger NoMix-Toilette. Links: Seitenansicht; Rechts: Draufsicht, Pfeil zeigt auf den integrierten Urinablauf.**

Die Projektbeginn waren folgende Vor- und Nachteile der Roediger NoMix-Toilette bekannt. Die Hauptvorteile sind a) eine Reduktion der Spülwassermengen; zur Spülung der NoMix-Toilette wird ein sogenanntes Zweimengen-Spülsystem verwandt. Dies beinhaltet eine Spültaste die zwei individuell justierbare Spülwassermengen für das große und kleine Geschäft ermöglicht. Für die Fäzesspülung werden 6 l Spülwassermenge eingestellt und für die Urinspülung kann die Spülwassermengen zwischen 1 l bis 3 l eingestellt werden. Zur Einstellung müssen im Spülkasten am Frischwasserzulaufventil entsprechende Justierungen vorgenommen werden. b) Die NoMix-Toilette ermöglicht eine unverdünnte Urinableitung zur getrennten Verwertung. Dies geschieht durch die spezielle Ablauftechnik des Urins mittels eines Ventils in der NoMix-Toilette, die beim Spülvorgang das Wasser nicht in die Urinleitung gelangen lässt. So kann der Urin unverdünnt seiner Wiederverwertung zugeführt werden. Für Details hierzu siehe Abbildung 3.

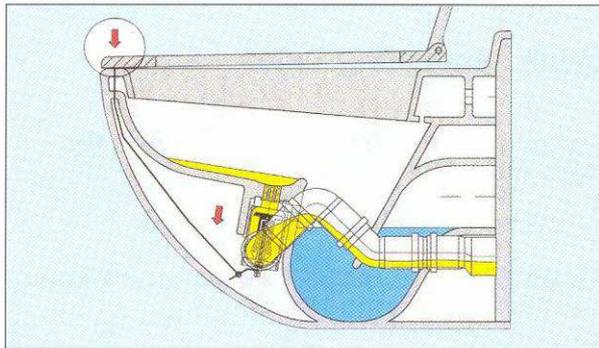
Die bekannten Nachteile waren a) eine schlechte Toilettenpapierentsorgung. Durch den vergrößerten vorderen Urinablaufteil mit Trennsteg zwischen Urin- und Fäkalteil (siehe Abbildung 2) im Porzellanbecken kommt es vor, dass das Papier, welches im vorderen Teil abgelegt wird, durch die geringere Wasserspülmenge nicht mit einmaligem Spülen ausgetragen wird. Da zusätzlich der hintere Bereich des WC-Beckens zur Fäzesentsorgung kleiner aus-

gebildet ist als bei den herkömmlichen Toilettenbecken, können auch hier bei der Papierentsorgung Probleme auftreten. Hier sind insbesondere die max. 3 l Wasserspülung der Urinspülung zu wenig, um das Papier beim ersten Spülvorgang zu entsorgen. Dadurch sind teilweise Mehrfachspülungen notwendig, die die Spülwassereinsparung zunichtemachen. b) Auch war bereits bekannt, dass die Toilette zu einer hohen Anfälligkeit durch Verkrustungen und Ablagerungen neigt. Da das Urinablaufventil aus bautechnischen Gründen sehr klein gehalten werden musste, besteht hier ein erhöhter Anfall von Störungen durch die Bildung von Urinstein im und um das Ablaufventil. Nähere Erläuterungen hierzu folgen im nächsten Abschnitt.

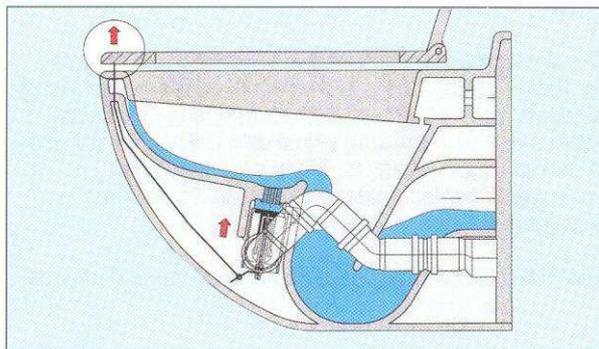
Die Bedienung ist vergleichbar mit einer konventionellen modernen Toilette (siehe auch Abbildung 3). Es ist für einen ordnungsgemäßen Betrieb zwingend notwendig, dass die NoMix-Toilette nur in sitzender Position benutzt wird. In sitzender Position wird über den Druck des Körpergewichts auf den Toilettensitz das Urinablaufventil über einen verbundenen Bowdenzug geöffnet und die getrennte Urinableitung gewährleistet. In die Toilette eingearbeitete Erhebungen leiten den Urin in die dafür vorgesehenen Öffnungen ab. Vorderer und hinterer Bereich der Toilettenschüssel sind voneinander getrennt. Sobald sich der Benutzer erhebt, schließt sich das Urinablaufventil. Die Spülung erfolgt wie bei einer konventionellen Toilette über ein 2-Tasten-System (kleine bzw. große Spülwassermenge). Papier und Fäkalien werden in den hinteren Ablauf gespült und gleichzeitig wird über die Urinablauföffnungen im Toilettenbecken das Urinablaufventil überspült.



Ruhezustand  
Das Ventil des Urin-Ablaufs ist geschlossen



Benutzung der Toilette  
Durch Setzen auf den Toilettensitz wird eine Mechanik betätigt, die den Verschluss des Urinablaufs öffnet. Urin wird über den separaten Ablauf weggeleitet.



Spülen der Toilette  
Durch Erheben vom Sitz wird der Urinablauf wieder geschlossen. Falls erforderlich, können Fäkalien und Papier mit unterschiedlichen Wassermengen in den hinteren Ablauf gespült werden.

**Abbildung 3: Funktionsabbildungen vor und während der Toilettennutzung sowie bei der Spülung.**

Nachfolgend dargestellt, in der Explosionszeichnung der NoMix-Toilette (Abbildung 4), sind die einzelnen Bauteile der Urinablauftechnik für die unverdünnte Abführung des Urins. Wesentliche Bestandteile sind der Bowdenzug (1) und der Ablauftrichter (8). Der Bowdenzug sorgt für das Öffnen und Schließen des Urinablaufventils. Durch das Setzen auf den WC-Sitz (siehe auch Abbildung 3) wird über eine Mechanik der Bowdenzug gestaucht, der durch diese Stauchung das Ablaufventil öffnet. Mit dem Erheben vom WC-Sitz wird der Bowdenzug wieder gestreckt und das Ablaufventil schließt wieder. Der Bowdenzug läuft versteckt im Porzellanrand des WC-Beckens. Im Ablauftrichter sitzt der Ventildeckel, der für den Ablauf des Urins sorgt. Der Ventildeckel öffnet bzw. schließt sich je nach Belastung auf den WC-Sitz.

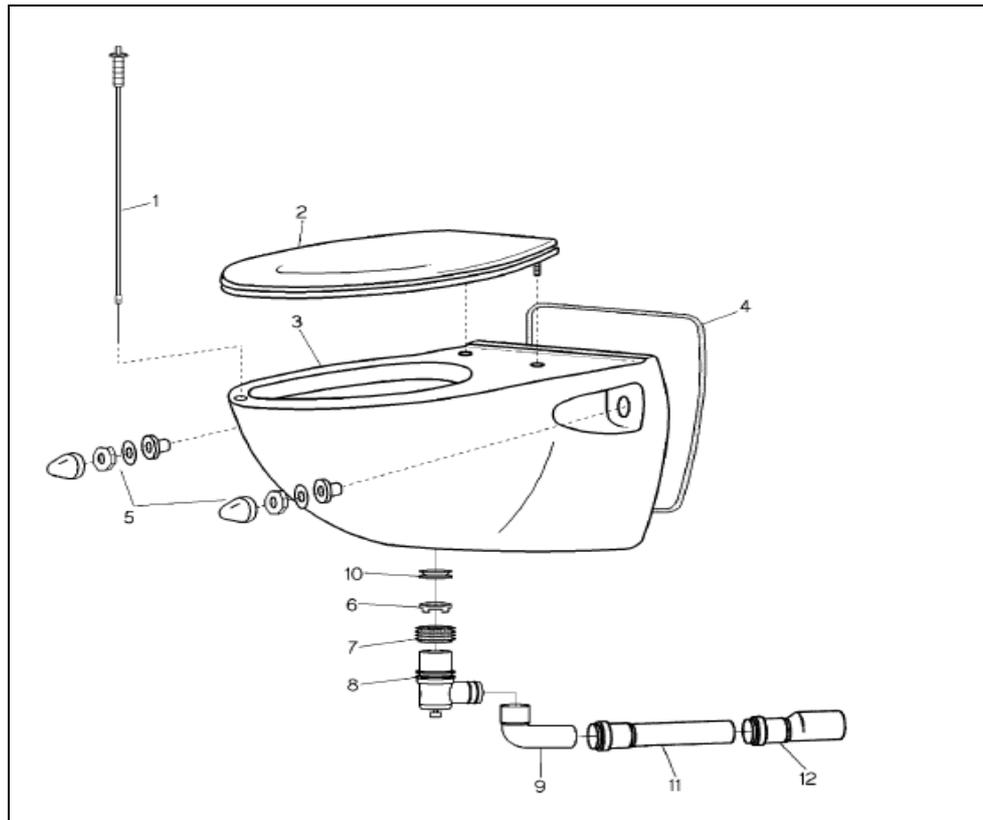


Abbildung 4: Explosionszeichnung der NoMix-Toilette.

Tabelle 1: Materialstückliste der NoMix-Toilette.

Pos.	Stück	Bezeichnung	Werkstoff
12	1	HT-Übergangrohr mit Dichtung DN 50 x 40	PVC
11	1	HT-Rohr mit Muffe und Dichtung DN 40, 150 mm lang	PVC
10	1	Gummidichtring für Abstandshalter / Trichter	NBR
9	1	Siphonwinkel ohne Dichtung DN 40, 90 Grad	PVC
8	1	Urinablauf komplett	PP
7	1	Spülrohrverbinder für Spülstutzen 55 mm	SBR
6	1	Abstandshalter / Trichter	PP
5	1	Befestigungssatz für Porzellan-WC	ABS, verz.
4	1	Wand Abschlussprofil	PVC weiß
3	1	Trenn-WC Porzellanbecken wandhängend	Keramik
2	1	WC-Sitz mit Deckel	Duroplast
1	1	Bowdenzug komplett	PP / VA

Für die Herstellung der WC-Sitze werden Kunststoff-Pressmassen verwendet, die eine gute Gebrauchstüchtigkeit aufweisen. Die Sitze sind von der Formgebung her leicht zu reinigen. Aufgrund einer hygienisch porenfreien Oberfläche werden für die Pflege milde, flüssige Haushaltsreiniger ohne Scheuerzusätze empfohlen. Auch das Porzellan WC-Becken sollte mit handelsüblichen flüssigen WC-Reinigern gereinigt werden, damit die Urinablaufventiltechnik nicht verstopft. Das Granulat von Pulverreinigern würde sich in den Urinablauföffnungen im vorderen Bereich des Beckens und auf den Ventildichtringen absetzen, die dann die Funktionstüchtigkeit der NoMix-Toilette erheblich beeinträchtigen würde. Nach dem Rei-

nigungsvorgang sollte die Roediger-Trenntoilette gespült und der überschüssige Reiniger entfernt werden.

Für den Benutzer nicht sichtbar bilden sich Urinsteinablagerungen an und in dem Urinablaufventil. Urinstein ist eine gelblich-braune kristalline Ablagerung und entsteht durch Ausfällungen des Urins in fester als auch pastöser Form. Die Bildung von Urinstein ist eine chemische Reaktion des Wassers mit dem Urin. Der im Wasser gelöste Kalk verbindet sich mit dem Urin und der Harnsäure als Katalysator zu einer unlöslichen Kalk-Magnesiaverbindung. Die dabei entstehenden Feststoffe bestehen aus den Mineralien Struvit, Hydroxylapatit und Kalzit. „Fest“ wird das Ganze erst durch einen hohen pH-Wert, der durch beteiligte Bakterien entsteht (Udert et al., 2003).

Um eine ordnungsgemäße Funktion des Urinablaufventils zu gewährleisten, müssen diese Ablagerungen regelmäßig entfernt werden. Das Urinablaufventil muss aus diesem Grund in einem regelmäßigen Turnus gereinigt werden. Für das SANIRESCH-Projekt haben sich die Projektbeteiligten auf eine monatlich stattfindende Reinigung geeinigt. In die Urinablauföffnungen im Toilettenbecken wird das Reinigungsmittel eingefüllt. Der Toilettensitz muss dazu fest herunter gedrückt werden, um das Urinablaufventil zu öffnen (Abbildung 3, Bild 2). So kann das Reinigungsmittel direkt in das Urinventil gefüllt werden. Die Reinigung erfolgte immer am Ende des Arbeitstages, um zu verhindern dass durch eine Toilettennutzung das Reinigungsmittel vorzeitig aus dem Ventil ausgetragen wird. Es wurden zwei unterschiedliche Reinigungsmittel getestet. Von Juli 2009 bis Juli 2011 wurde der Urin- und Kalksteinentferner auf Ameisensäurebasis von Mellerud verwendet. Dieses musste über einen längeren Zeitraum einwirken. Daher wurden immer Freitagabends 200 ml Flüssigkeit appliziert und Montagfrüh ausgespült. Seit dem August 2011 wird 10%-ige Zitronensäure genutzt. Davon werden jeweils 500 ml in das Ventil gefüllt und aufgrund der höheren Aggressivität der Säure bereits nach 30 min wieder ausgespült.

Um eine langfristige Überprüfung der technischen Zuverlässigkeit und Funktionstüchtigkeit, der Betriebssicherheit und die optimale Wartungshäufigkeit für die NoMix-Toiletten zu entwickeln, haben zu Projektbeginn diverse Gespräche mit dem technischen Dienst der GIZ zusammen mit dem Produktentwickler von Roediger Vacuum stattgefunden. In diesen Gesprächen haben sich die Beteiligten über die aktuelle Funktionstüchtigkeit der Toiletten ausgetauscht und mögliche Verbesserungen diskutiert. Die darin gewonnen Erkenntnisse wurden im nächsten Schritt in der Produktentwicklung von Roediger Vacuum im Einzelnen sondiert und geprüft. Die daraus gewonnenen möglichen Verbesserungen am Produkt wurden dann sukzessive in die Produktion übernommen, in die Toiletten der GIZ eingebaut und auf ihre tatsächliche Verbesserung hin überprüft.

### **3.1.2.2 Betriebstagebuch**

Das Betriebstagebuch wurde zusammen mit den am Projekt beteiligten Mitarbeitern der GIZ in Eschborn erstellt. Hierbei sollte in einer einzigen Liste sowohl die monatlichen Kontrollen, als auch die ½ jährlichen Wartungen einzutragen sein. Ferner war es das Ziel, möglichst alle

relevanten Datenerfassungen für eine Auswertung auf einem einzigen Blatt zu erfassen, um einen möglichst raschen Überblick erlangen zu können.

Hierzu wurde das Format DIN A3 gewählt. Im erstellten Betriebstagebuch (Details hierzu siehe Anlage 6.1) kann im oberen Teil erfasst werden, ob es sich um die monatliche Kontrolle bzw. um eine Wartung handelt. Ferner wird in den Kopfdaten das Datum und der bzw. die jeweiligen Sachbearbeiter erfasst. In den einzelnen Spalten sind die jeweiligen Etagen, in denen die WC-Körper verbaut sind erfasst und die auszuführenden Kontrolltätigkeiten, farblich unterschieden nach monatlicher Kontrolle bzw. Wartung. Des Weiteren ist es möglich zu den jeweiligen Etagen eventuelle Besonderheiten bzw. Auffälligkeiten in einer Kommentarspalte festzuhalten. Eine Legende erklärt, wie die Liste auszufüllen ist.

Es wurden alle Kontrollen und Wartungen der NoMix-Toiletten vom 01.01.2010 bis zum 30.06.2012 erfasst. Mit der Datenerfassung des Betriebstagebuchs wurde es durch die Auswertung der Daten machbar, die Lebensdauer bzw. Betriebsdauer der Urinablaufventile statistisch zu erfassen. Ferner konnte evaluiert werden, welche Bauteile am häufigsten getauscht bzw. ersetzt werden mussten. Hieraus konnten dann Rückschlüsse auf die am häufigsten aufgetretenen Störungen gezogen werden. Auch ist es hiermit möglich, diese Bauteile einer Qualitätsverbesserung zu unterziehen. Ein weiterer Aspekt lag darin, die Betriebszustände der Toiletten darzustellen. Über diese Auswertung ist es ebenso möglich, Ergebnisse zu den Ursachen der aufgetretenen Störungen zu erhalten. Diese Ergebnisse und deren Auswertung bieten dann die Möglichkeit zur Qualitätsverbesserung der Produkte und lassen Rückschlüsse zur Anfälligkeit der NoMix-Toilette im Betrieb zu.

Innerhalb der Aufzeichnungen gingen sechs Ventile aufgrund von Ausbauten vorzeitig aus der Nutzung. Parallel verblieben die eingebauten Ventile zu Ende des Betriebstagebuchs nach dem 30.6.2012 natürlich noch in der Nutzung. Daher wurde neben der tatsächlich erfassten Ventillebenszeit auch noch eine zweite aufgenommen, die die tatsächliche Ventillebenszeit unter der Annahme, dass alle verbauten und frühzeitig entfernten Ventile noch 180 Tage zusätzlich funktionieren, widerspiegelt.

Innerhalb des Projekts wurden nachfolgende Meilensteine realisiert, die als Grundlage für die Ergebnisevaluierung der Toiletten dienten:

- Januar 2010 – Einbringung der abgestimmten Verbesserungen bzw. Optimierungen in die Produktion der Zubehörteile bzw. des Toilettenbeckens zur NoMix-Toilette / hier geänderter Bowdenzug und Aufnahmefassung des Bowdenzuges.
- März 2010 – Überprüfung der Funktionszustände der Toilettenbecken
- Juni 2010 – Einbringung der abgestimmten Verbesserungen bzw. Optimierungen in die Produktion der Zubehörteile bzw. des Toilettenbeckens zur NoMix-Toilette / hier Bodentasse des Urinsiphons und Passsicherung des Bowdenzuges.
- August 2010 – Wartung der NoMix-Toiletten im Gebäude der GIZ. Überprüfung der Funktion der Urinablaufventile, Ersetzen von defekten Teilen an den Toilettenbecken.

- Dezember 2010 – Wartung der NoMix-Toiletten im Gebäude der GIZ. Überprüfung der Funktion der Urinablaufventile, Ersetzen von defekten Teilen an den Toilettenbecken.
- Januar 2011 – Einbringung der abgestimmten Verbesserungen bzw. Optimierungen in die Produktion der Zubehörteile bzw. des Toilettenbeckens zur NoMix-Toilette / hier Verbesserung der Abdichtung Urinablauf zum Becken (Spülrohrverbinder)
- Weitere Wartung der NoMix-Toiletten im Gebäude der GIZ. Überprüfung der Funktion der Urinablaufventile, Ersetzen von defekten Teilen an den Toilettenbecken: Februar 2011, April 2011, Juni 2011, August 2011, Oktober 2011, November 2011, April 2012.

### **3.1.2.3 Wasserlose Urinale**

Die eingebauten 23 wasserlosen Urinale der Firma Keramag wurden im Zeitraum vom 1.10.2009 bis 31.10.2012 durch die GIZ einmal monatlich auf Funktion und Sauberkeit kontrolliert. Hierdurch konnten die Nutzerrückmeldungen zu diesen Urinalen nochmals über die erhobenen Daten abgesichert werden.

Dazu wurden einmal monatlich sämtliche Urinale auf ihren Betrieb und ihre Funktionalität kontrolliert. Außerdem wurde jeweils der Geruchsstopper entnommen und auf seine Sauberkeit kontrolliert. Die Reinigungskräfte hatten Ersatzstopper zum Austausch, so dass sie einmal wöchentlich die Dreckigen entnahmen und die Gereinigten aus der Vorwoche dafür einsetzten. Anschließend wurde der Dreckige unter lauwarmem, fließendem Wasser gereinigt.

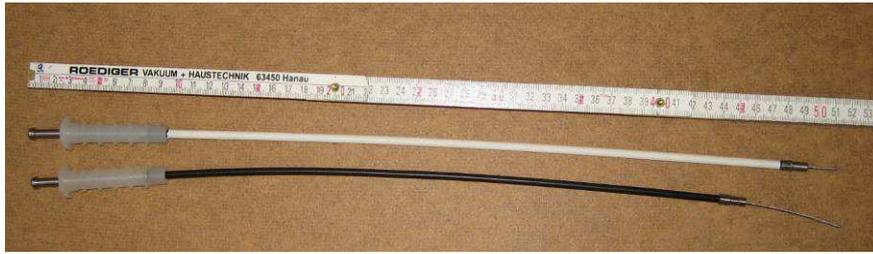
Durch diese engmaschige Kontrolle wurde eine gute Performance der Urinale sichergestellt. Bei auftretenden Problemen bzgl. der Sauberkeit wurden die Reinigungskräfte angesprochen und die Reinigungsroutine nochmals gemeinsam durchgegangen.

## **3.1.3 Ergebnisse und Diskussionen**

### **3.1.3.1 Produktverbesserungen**

Nachfolgend beschrieben sind die im Laufe des Projektes durchgeführten Verbesserungen am Produkt.

Der Bowdenzug wurde um ca. 20 mm verlängert (Abbildung 5), damit die Einfädung in die Trichtertasse des Urinablaufs einfacher möglich ist. Da der Bowdenzug durch diese Verlängerung am WC-Becken sichtbar wurde, ist die Farbe des Bowdenzuges geändert worden. Somit hebt er sich nicht vom weißen WC-Becken ab. Bis dato war der Bowdenzug schwarz. Die Einpressung der Stützhülse am Bowdenzug wurde in diesem Zusammenhang ebenfalls überarbeitet. Die Stützhülse wird jetzt mit dem Innenmaterial so verpresst, dass das Knicken zum Einfädeln weniger problematisch ist.



**Abbildung 5:** Hier ist die Verlängerung des neuen Bowdenzugs (weiße Ummantelung) um 2 cm gegenüber dem Alten (schwarzen) sichtbar.

Der Boden des Urinsiphons wurde an der Bodentasse abgerundet, damit sich Urinablagerungen nicht mehr so schnell bilden können. Hierdurch erhoffte man sich einen geringeren Wartungsaufwand der Ablaufsiphons. Dies kann man als erfolgreich und bestätigt ansehen, da lediglich 5 von 171 Nennungen eine Störung durch Urinverschlammung am Ventilboden aufgezeigt wurden (siehe hierzu Abbildung 14).



**Abbildung 6:** Blick auf die abgerundeten Innenkanten im Ventilkörper innen.

Die Aufnahmefassung des Bowdenzugs am Ablauftrichter wurde kegelförmig ausgebildet (Abbildung 7), um das Einfädeln des Bowdenzugs wesentlich zu erleichtern.



**Abbildung 7:** Die kegelförmig ausgebildete Aufnahmefassung für den Bowdenzug im Ventilkörper (Ansicht von unten, Aufnahmefassung rot markiert).

Die Stege der Passsicherung für den Bowdenzug (weißes Einpaßstück) wurden geändert. Bisher musste man immer die Passsicherung provisorisch mit Isolierband nacharbeiten.



**Abbildung 8: Urinablauftrichter mit der geänderten Passsicherung (Ansicht von der Seite, rot markiert) für den Bowdenzug.**

Das Spülverhalten der NoMix-Toilette sollte verbessert werden. Es sind teilweise Mehrfachspülungen notwendig, um im hinteren Bereich des Beckens eine effiziente Papierentsorgung zu erzielen (siehe hierzu auch Kapitel 3.6.2.2.3). Auch kommt es teilweise vor, dass Papier, welches im vorderen Bereich abgelegt wird, nicht über den aus Porzellan ausgebildeten Trennsteg zwischen Urin- und Fäkalteil gespült wird. Um das Spülverhalten zu verbessern, wurden die beiden Spülmengen auf das jeweils maximal mögliche Volumen gesetzt. Das heißt, die Spülwassermenge für die Fäkalspülung wurde auf 6 l je Betätigung und die Spülwassermenge für die Urinspülung wurde auf 3 l je Betätigung einjustiert.



**Abbildung 9: RoeVac NoMix-Toilette mit Kennzeichnungen: Rund: hinterer Beckenbereich; Rechteckig: vorderer Urinableitbereich.**

Um das Spülverhalten noch weiter zu verbessern, hätte es hierzu größerer Änderungen im Design des Toilettenbeckens bedurft. Dies wären vorrangig Änderungen in der Form und Gestaltung des vorderen, als auch des hinteren Spülbereiches des WC-Beckens gewesen. Diese notwendigen Veränderungen in den jeweiligen Spülbereichen für Urin und Fäkalien widersprechen jedoch den in der DIN EN 997 „WC-Becken und WC Anlagen mit angeform-

tem Geruchsverschluss“ geforderten einzuhaltenen Richtwerten. Es wäre hierzu notwendig, sich mit dem DIN Ausschuss in Verbindung setzen, um die Möglichkeit zu erörtern, für dieses Becken die Fertigungs-DIN Normen umgehen zu können. Ob dies wirklich möglich sein würde, bleibt fraglich, da eine DIN ein technisches Regelwerk, also eine Art Gesetzesvorlage ist. Ein solches Regelwerk zu umgehen, ist gleichbedeutend mit einem Gesetzesbruch.

Die Anfragen beim DIN-Ausschuss wurden jedoch aufgrund eines laufenden Patentstreites eingestellt. Gemäß der Rechtsabteilung von Roediger Vacuum GmbH ist es zurzeit nicht möglich, die Trenntoilette einer größeren Veränderung zu unterziehen bis der Patentstreit beigelegt ist. Es ist nicht möglich, in einem solchen laufenden Verfahren ein Enddatum zur Beilegung des Streits vorher zuzusagen. Leider konnte während der Laufzeit des Projektes der Patentstreit nicht beigelegt werden und somit wurden die notwendigen Weiterentwicklungen nicht angegangen.

Die Abdichtung durch den Spülrohrverbinder zum Urinablauf stellte immer wieder Probleme durch hervortretende Undichtigkeiten dar. Diese kamen u.a. durch die geringfügigen Abweichungen im Rohrdurchmesser, die beim Brennen der Keramik entstehen, zustande. Der Spülrohrverbinder wurde daraufhin mit zwei zusätzlichen Rollringen versehen, damit eine bessere Abdichtung erfolgt. Die Rollringe werden unterhalb der Dichtnasen eingesetzt.

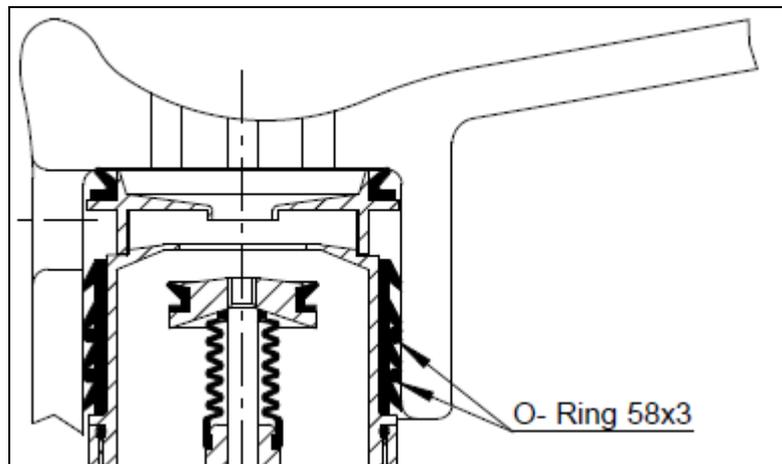


Abbildung 10: RoeVac Ablaufsiphon mit zwei zusätzlichen Rollringen zur Abdichtung.

### 3.1.3.2 Auswertung des Betriebstagebuchs

Die Zusammenfassung der jeweiligen Kontrollen bzw. Wartungen über den gesamten Zeitraum des Projektes an den Toiletten ist in der unten dargestellten Abbildung 11 erfasst worden.

Ventilnummer	Eingebaut	Ausgebaut	Lebensdauer (Tage)
1	defekt		
2	22.04.2010	15.11.2010	203
3	26.04.2010	20.12.2010	234
4	22.04.2010	17.09.2010	145
5	26.04.2010	19.04.2011	353
6	22.04.2010	15.11.2010	203
7	26.04.2010	11.08.2011	465
8	19.04.2011	07.11.2011	198
9	26.04.2010	14.06.2010	48
10	14.06.2010	läuft noch	
11	09.06.2010	10.02.2011	241
12	14.06.2010	läuft noch	
13	14.06.2010	19.04.2011	305
14	defekt		
15	14.06.2010	19.04.2011	305
16	14.06.2010	15.11.2010	151
17	17.08.2010	19.08.2011	362
18	17.08.2010	läuft noch	
19	17.08.2010	10.02.2011	142

Abbildung 11: Auswertetabelle zur Lebensdauer bzw. Betriebsdauer der Urinablaufventile.

Aus den in Abbildung 11 erfassten Daten lassen sich die nachfolgende Klassifizierung (Abbildung 12) der Ventile und ihre Lebensdauer nach Tagen aufzeigen.

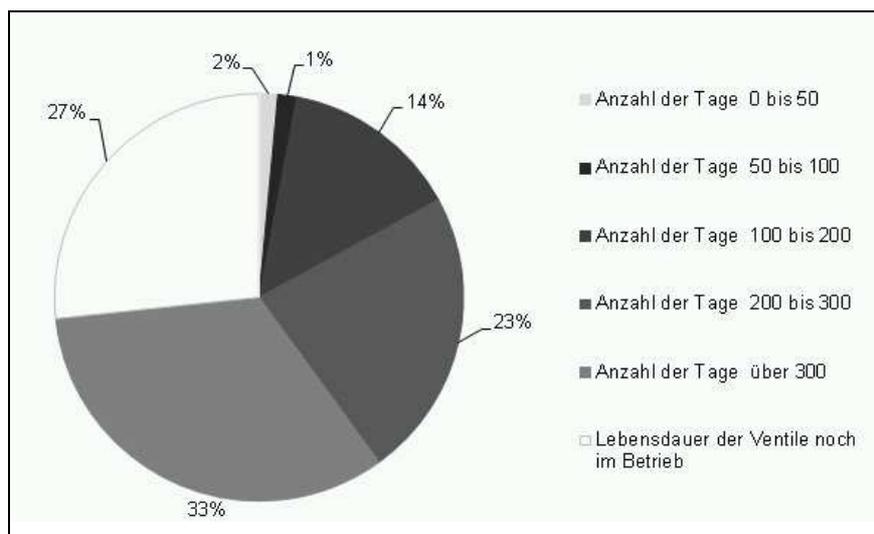


Abbildung 12: Prozentuale Lebens- bzw. Betriebsdauer der in den NoMix-Toiletten verbauten Urinablaufventile im erfassten Berichtszeitraum.

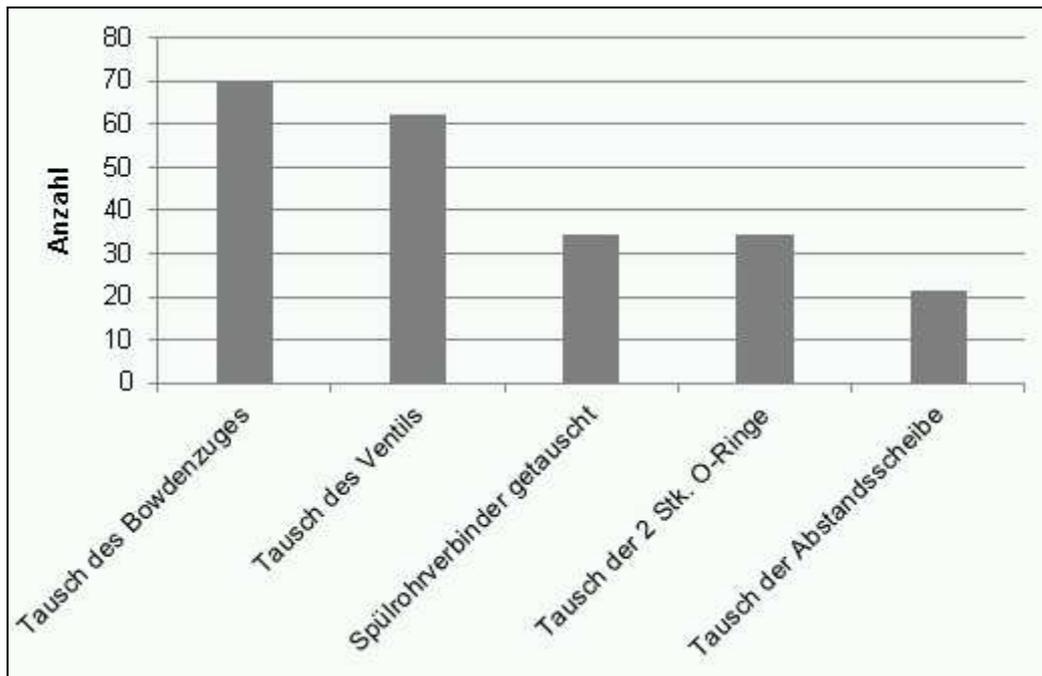
Im aufgezeigten Berichtszeitraum von 01.01.2010 – 30.06.2012 wurden insgesamt 93 Urinablaufventile gewechselt. Hieraus ergibt sich das oben abgebildete Diagramm zur Lebensdauer der Ventile. Die durchschnittliche Lebensdauer für den Berichtszeitraum beträgt 260 Tage. Hierin eingeschlossen sind 36 Ventile, die sich nach Ende der Aufzeichnungen noch in Betrieb bzw. in Funktion befinden sowie sechs Ventile, die frühzeitig durch Toilettenausbau entfernt wurden. Unter der Annahme, dass die noch verbauten und in Funktion befindlichen Ventile bis zum 31.12.2012 weiter funktionieren und auch die vorzeitig im Projektverlauf ausgebauten eine zusätzliche Lebenszeit dieser angenommenen 180 Tage besessen hätten, ergibt sich eine durchschnittliche Lebensdauer von 337 Tagen pro Ventil. Diese Annahme

kann man sicherlich als realistisch ansehen, da Abbildung 12 56%, das entspricht 76 Ventilen, eine Lebensdauer von 200 bis über 300 Tagen ausweist.

In der nachfolgenden Tabelle wurden die am häufigsten getauschten Bauteile erfasst. Hierzu wurden die aufgetretenen Störungen bzw. Probleme an den einzelnen Bauteile während der Wartung klassifiziert.

**Tabelle 2: Auswertung aller Wartungen zum Tausch von Bauteilen sowie Betriebszustand.**

<b>Grund der Wartung</b>	<b>Summe kaputter Teile</b>
Bowdenzug gerissen	4
Tausch des Bowdenzuges	70
Bowdenzug ausgehängt bzw. gelöst	6
Anlagerung am Bowdenzug	42
Ventil schließt nicht?	13
Ventil öffnet nicht?	16
Verkrustung des Ventils	23
Verkrustung am Faltenbalk	17
Undichtigkeit am Faltenbalk	2
Verschlammung am Ventilboden	5
Flüssigkeitsaustritt am Stift	36
Tausch des Ventils	62
Spülrohrverbinder (Dichtmanschette) verkrustet oder Auflösung	7
Spülrohrverbinder mit O-Ring	41
Spülrohrverbinder getauscht	34
Tausch der 2 O-Ringe	34
Verkrustungen am Ablaufteller (obere Dichtung)	10
Tausch von Abstandsscheibe	21

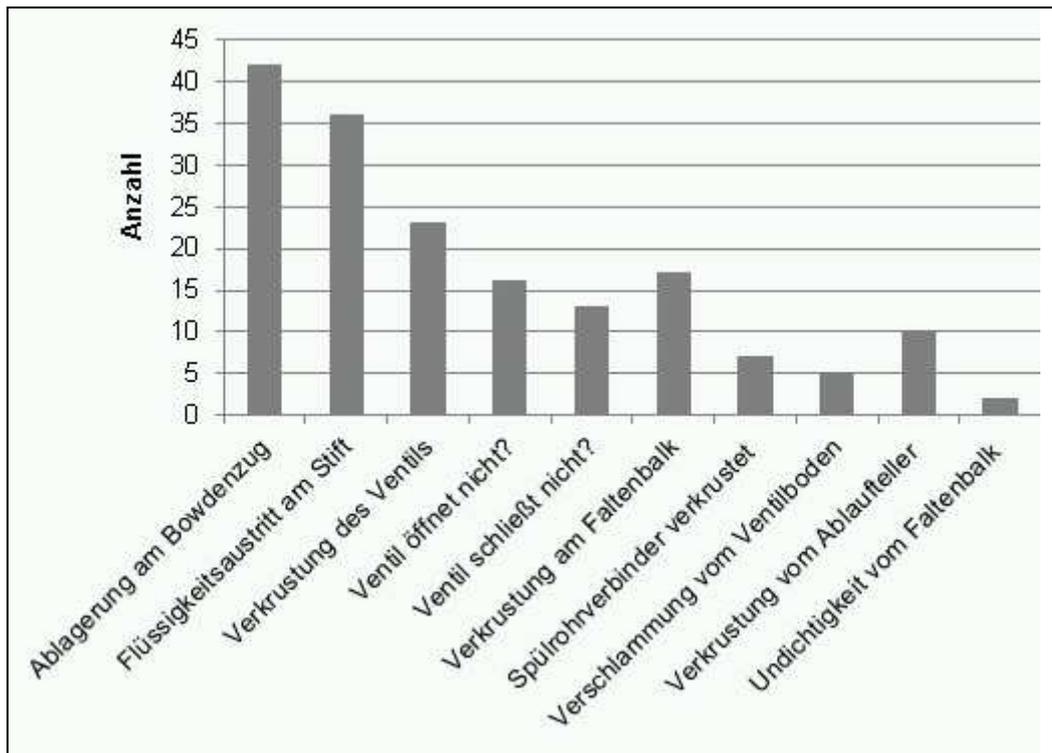


**Abbildung 13: Zusammenstellung für getauschte Bauteile der Auswertetabelle aus Abbildung 11.**

Im aufgezeigten Berichtszeitraum von 01.01.2010 – 30.06.2012 wurden insgesamt 221 Bauteile / Materialien gewechselt (Tabelle 2). Aus Abbildung 13 ist erkenntlich, dass der Bowdenzug mit 70 Auswechslungen und das komplette Ventil mit 62-mal am häufigsten gewechselt werden mussten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass diese beiden Bauteile die am meisten beanspruchten sind. Der Bowdenzug ist zuständig für das Öffnen des Urinablaufventils und wird mit jeder Benutzung der NoMix-Toilette mechanisch beansprucht. Mit jeder Nutzung der Toilette wird der Bowdenzug gestreckt und anschließend wieder gestaucht.

Beim Tausch eines kompletten Ventils ist leider nicht detailliert nachzuvollziehen, ob auch schlussendlich nur einzelne Bauteile des Ventils defekt waren und der Monteur aus Zeitgründen nur das komplette Ventil getauscht hat oder ob es sich tatsächlich um ein völliges Versagen des Ventils handelte. Wenn man die Auswertetabelle der Abbildung 14 genauer betrachtet, kann man zu der Schlussfolgerung kommen, dass die Störfälle bei einer Verkrustung des Ventils, einer Verkrustung des Faltenbalks, einer Undichtigkeit des Faltenbalks, einer Verschlammung am Ventilboden und der Flüssigkeitsaustritt am Stift (entspricht 49% aller Störfälle) häufig zum Austausch der kompletten Ventile (insgesamt 62 Materialwechsel) geführt haben.

Aus Tabelle 2 lässt sich neben dem jeweiligen Grund der durchgeführten Wartung auch eine Auswertung zu den bei der Wartung vorgefundenen Betriebszustände der NoMix-Toiletten entnehmen. Diese sind in Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14: Zusammenstellung der Betriebszustände der NoMix-Toiletten nach der Auswertungstabelle aus Abbildung 11.**

Im aufgezeigten Berichtszeitraum von 01.01.2010 – 30.06.2012 ergeben sich (siehe Abbildung 14) als häufigste Störfälle Urinsteinablagerungen und -verkrustungen. Diese sind leider trotz zusätzlicher monatlicher Reinigung mit Mellerud bzw. der Zitronensäure nicht zu vermeiden. Diese Problematik zeigt sich auch in öffentlichen Urinalen, wie in Bahnhöfen, Raststätten, Flughäfen und Restaurants die herkömmliche Sanitärbecken verwenden. Hier kann beobachtet werden, dass immer wieder einzelne Urinalbecken defekt sind. Es liegt die Vermutung nahe, dass sie verkrustet sind bzw. sich Ablagerungen gebildet haben, die das Abfließen des Urins verhindern.

Gemäß Aufzeichnungen sind insgesamt durch die Ablagerungen am Bowdenzug (42 Nennungen, 25%), Verkrustungen des Ventils (23 Nennungen, 13%), Verkrustungen am Faltenbalk (17 Nennungen, 10%), Spülrohrverbinder verkrustet (7 Nennungen, 4%), Verschammung am Ventilboden (5 Nennungen, 3%) und Verkrustungen am Ablaufsteller (10 Nennungen, 6%) 61% aller Betriebszustände, die ein Funktionsstörung aufweisen (insgesamt 104 von 171 Nennungen), auf die Urinsteinbildung zurück zu führen. Ungefähr die Hälfte aller Funktionsstörungen (46%; 78 von 171 Nennungen) sind auf die Ablagerungen am Bowdenzug (42 Nennungen, 25%) und auf den Flüssigkeitsaustritt am Stift (36 Nennungen, 21%) zurück zu führen. 22% der Betriebszustände (38 von 171 Nennungen) sind auf Undichtigkeiten zurückzuführen. Dies sind der Flüssigkeitsaustritt am Stift (36 Nennungen, 21%) und die Undichtigkeit am Faltenbalk (2 Nennungen, 1%). Die Anfälligkeit des Ventils zeigt sich bei 17% der Störungen (insgesamt 29 von 171 Nennungen). Hier ist zum einen das nicht Öffnen des Ventils (16 Nennungen, 9%) und zum anderen das nicht Schließen des Ventils (13 Nen-

nungen, 8%) festzuhalten. Dass hier auch Verkrustungen bzw. Ablagerungen durch die Urinsteinbildung die Ursache sind, liegt nahe, lässt sich jedoch nicht abschließend klären.

Es ist somit festzustellen, dass die Bildung von Urinstein und die damit einher gehende Bildung von Verkrustungen und Ablagerungen die häufigste Ursache für eine Anfälligkeit an den NoMix-Toiletten, respektive dem Urinablaufventil, ist. Das Urinablaufventil kann somit als sensibelstes und anfälligstes Bauteil der NoMix-Toilette identifiziert werden. Da über den kompletten Untersuchungszeitraum kein Defekt am Porzellanbecken selbst dokumentiert wurde, kann festgehalten werden, dass der Toilettenkörper an sich keine Schwachstellen aufweist.

### **3.1.3.3 Wasserlose Urinale**

Die Funktionalität der wasserlosen Urinale war sichergestellt. Bis auf Ermüdungserscheinungen der Geruchsverschlüsse, die sich durch einen schlechten und sehr langsamen Abfluss des Urins zeigten, traten keinerlei Probleme auf. Es zeigte sich, dass die Geruchsverschlüsse durch die in der GIZ entstehende Nutzungsregelmäßigkeit einmal jährlich auf Ermüdungserscheinungen hin zu prüfen sind bzw. wenn dies zu aufwendig ist, sollten einfach alle ausgetauscht werden.

Die Sauberkeit der Einsätze hängt stark von der Motivation der Reinigungskraft ab. Über den geprüften Zeitraum konnten 71% der Einsätze durchgehend als sauber und frei von jeglichen Urinablagerungen bezeichnet werden, bei 16% waren leichte Ablagerungen zu sehen und 12% waren so stark verschmutzt, dass man von einer schlechten bzw. nicht erfolgten Reinigung in der Woche vor der Kontrolle ausgehen kann.

Die Reinigung von wasserlosen Urinalen durch die Reinigungskräfte ist im normalen Betrieb möglich. Es zeigte sich jedoch, dass diese eine Einführung benötigen, da sie häufig diesen Urinaltyp nicht kennen. Die Einführung eines zweiten Geruchsverschlusses zum Tauschen ist angenehm (siehe auch Kapitel 3.6.2.2), da dadurch die Urinleitung nicht zu lange offen steht und es zu Geruchsemissionen in den Toilettenanlagen kommt.

### **3.1.4 Fazit**

Roediger Vacuum hat die Trenntoilette bereits im Jahr 2001 patentieren lassen und vertreibt diese Trenntoilette bereits seit Anfang 2002. Ziel war es, den spärlichen Erfolg des Produktes mit Ende des Projektes erheblich zu verbessern. Die Verkaufszahlen von 2002 bis heute 2012 sollten zukünftig im gleichen Zeitraum (also bis 2018) mindestens verdoppelt werden. Die Roediger Vacuum GmbH wollte ihren Fokus verstärkt auf Projekte der Privathaushalte und Bürogebäude in Deutschland legen. Hier wurde ein entsprechendes Potenzial gesehen, das Produkt anzubringen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Voraussetzung sich auf das Becken setzen zu müssen, um das Urinablaufventil zu öffnen, in diesen Bereichen der Privathaushalte und Bürogebäude gegeben ist. Leider hat hier auch das Projekt SANIRESCH gezeigt, dass nur wenige Frauen bereit sind, sich im Bürogebäude aus hygieni-

schen Gründen auf den Toilettensitz zu setzen. Für öffentliche Bereiche, wie Flughäfen, Bahnhöfe, Einkaufszentren etc. ist somit das Produkt gänzlich ungeeignet, da häufig zu beobachten ist, dass Männer in diesen Bereichen aus Schamgefühl oft die Urinale meiden und die Toilettenkabinen selbst nur für das Urinieren aufsuchen. Da davon auszugehen ist, dass sie im stehen urinieren, kommt der trennende Effekt der Toilette nicht zu tragen.

Das SANIRESCH-Projekt hat leider eindeutig belegt, dass eine erfolversprechende Vermarktung der Trenntoilette in der bisherigen Form nicht fortgesetzt werden kann. Die Vielzahl der Funktionsstörungen wie Ablagerungen und Verkrustungen durch Urinstein (104 von 171 Nennungen), Undichtigkeiten am Urinalablauf (38 von 171 Nennungen) sowie die Nichtfunktion des Ablaufventils (29 von 171 Nennungen) und die dadurch entstehenden hohen Instandhaltungskosten (siehe auch Kapitel 3.7.3.1) lassen eine nachhaltige Marktakzeptanz nicht erwarten. Die Roediger Vacuum GmbH wird die kommerzielle Vermarktung der Trenntoilette über den Abschluss des Forschungsprojektes SANIRESCH hinaus nicht weiter verfolgen.

Auch eine Konkurrenzfirma aus Schweden hat zum Jahre 2010 bereits die Produktion ihrer Toilette eingestellt. Ferner hat auch ein Unternehmen aus den Niederlanden eine Urin-Trenntoilette mit Wasserspülung entwickelt. Das Unternehmen hat jedoch die Produktion nach nur einem realisierten Projekt wieder eingestellt. Zukünftig gibt es nur noch die Unternehmen EnviroSystems (China) und BB Innovation & Co AB (Schweden) auf dem Markt, die eine Trenntoilette mit Wasserspülung anbieten.

Die Hauptgründe bei Roediger Vacuum für diese Entscheidung sind folgende. Aufgrund der durch die komplexe Bauform bedingten hohen Ausschussrate in der Produktion konnte trotz intensiver Bemühungen kein Sanitärkeramik-Hersteller für eine kontinuierliche Produktion gewonnen werden, zumal auch nur vergleichsweise geringe Stückzahlen von maximal 20 im Jahr zu erwarten sind. Hier sind nicht nur die geringen Stückzahlen, sondern vor allem die durch die oben erwähnte komplexe Bauform bedingten, hohen Ausschussraten bei der Produktion der Hauptgrund für die ablehnende Haltung der Hersteller. Eine nur chargenweise Produktion mit Einlagerung und eventuell wechselnden Herstellern, lässt aufgrund der dadurch entstehenden Kosten derzeit eine wirtschaftliche Vermarktung nicht zu.

Trotz der kontinuierlich vorgenommenen Verbesserungen ist das Gesamtsystem immer noch sehr wartungsintensiv und würde deshalb bei einer Vermarktung mit der Zielgruppe Privathaushalte hohe Unterhaltskosten insbesondere Fahrtkosten nach sich ziehen. Eine langfristige Marktakzeptanz ist deshalb nicht zu erwarten. Marktsegmente, die diese Unterhaltskosten reduzieren könnten, wie z.B. öffentliche Toilettenanlagen sind aufgrund des hohen Fehlbenutzungspotentials auch nicht geeignet, um die Aufwendungen für eine kommerzielle Vermarktung derzeit zu rechtfertigen.

Die Roediger Vacuum GmbH wird sich auch zukünftig in Forschungsprojekten engagieren, die auf die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in der Abwassertechnik abzielen. Im Fokus

unserer Entwicklungsbemühungen steht dabei die Vakuum-Sanitärtechnik, die bereits heute durch die Trennung von Schwarz- und Grauwasser die Wertstoffrückgewinnung aus dem Teilstrom Schwarzwasser ermöglicht. Im Vergleich zur Trennung von Urin und Brauwasser lässt sich mit der gemeinsamen Sammlung von Schwarzwasser durch Vakuum-Toiletten ein echter Wasserspareffekt erzielen und die automatisierbare gemeinsame Vergärung in einer Biogasanlage ermöglicht ebenfalls eine vollständige Rückgewinnung der Wertstoffe. Das als Nebenprodukt anfallende Biogas kann zur Energiegewinnung genutzt werden und ermöglicht bei einer richtigen Anlagen- und Projektdimensionierung einen energetisch neutralen Wasser- und Abwasserkreislauf.

## **3.2 Anlagentechnik (Verantwortlich: HUBER SE)**

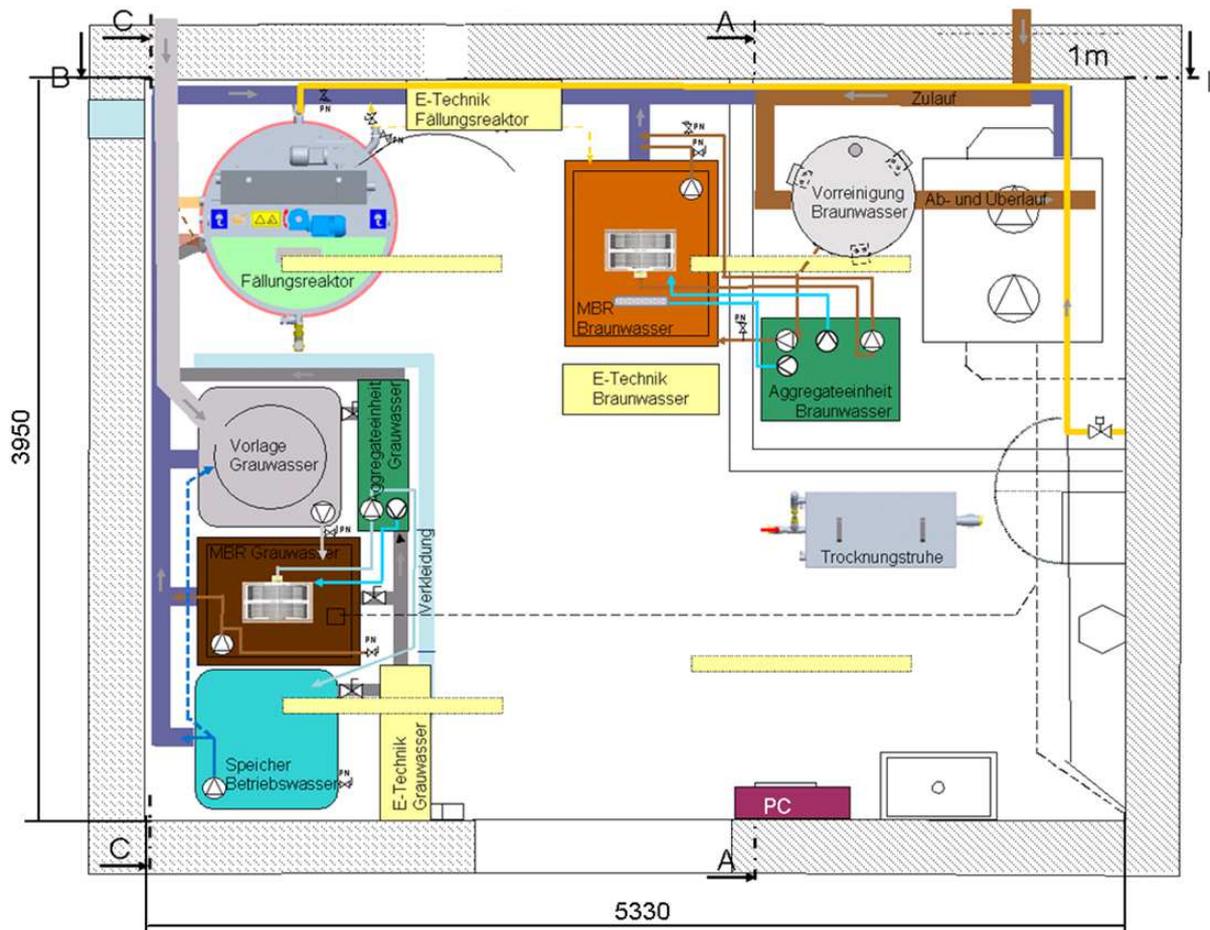
### **3.2.1 Ziele der Projektkomponente**

Der Schwerpunkt der Firma HUBER SE innerhalb des Projekts SANIRESCH lag bei der Verfahrens- und messtechnischen Optimierung der MBR-Anlagen (Membranbioreaktor) für die Bereitstellung von hygienisch einwandfreiem Betriebswasser aus Braun- und Grauwasser sowie der Weiterentwicklung eines MAP-Fällungsreaktors zur Urinbehandlung für die Rückgewinnung von Nährstoffen aus Urin. Eine zentrale Herausforderung innerhalb des Projekts war die Anpassung der Behandlungsanlagen in die bestehende Gebäudestruktur im Untergeschoss des GIZ-Hauptgebäudes. Hierbei wurde darauf geachtet, dass keine Geruchsbelästigungen beim Anlagenbetrieb entstehen und die Zugänglichkeit zur Anlagentechnik jederzeit gewährleistet ist. Darüber hinaus stand die Betriebsüberwachung der dezentralen Anlagen aus der Ferne im Mittelpunkt. Durch die Implementierung der optimierten Anlagentechnik im Haus 1 der GIZ wurde die Voraussetzung für die Schließung kleinräumiger Wasser- und Stoffkreisläufe in urbanen Gebieten am Beispiel eines Bürogebäudes geschaffen.

### **3.2.2 Material und Methoden**

Die Firma HUBER SE (HUBER) hat im Rahmen des Projekts drei Demonstrationsanlagen zur dezentralen Behandlung unterschiedlicher Abwasserströme (Abwasserseparation von Urin, Grau- und Braunwasser) im Untergeschoss des GIZ-Hauptgebäudes am Standort in Eschborn installiert und optimiert. Ziel der Firma HUBER war neben der Weiterentwicklung und Fertigung innovativer Technologien (MAP-Fällung und Membranbelebung incl. Vorreinigung) die Anpassung an die spezifischen Anforderungen für die Aufstellung der Technik in geschlossenen Räumlichkeiten (Abbildung 15):

- Urinbehandlung: MAP-Fällungsreaktor
- Braunwasserbehandlung: Vorlage mit integrierter mechanischer Vorreinigung und Membranbelebungsreaktor (MBR)
- Grauwasserbehandlung: Vorlage incl. Sieb, Membranbelebungsreaktor (MBR) und Permeat/Betriebswasserspeicher



**Abbildung 15: Draufsicht des Aufstellungsplans für den Aufstellungsraum im Untergeschoss des GIZ-Hauptgebäudes.**

Um einen störungsfreien Betrieb sicherzustellen, wurden die Anlagen technisch vollautomatisiert ausgeführt. Zusätzlich wurden alle Anlagen mit einer Datenfernübertragung und Störmeldung per SMS ausgestattet. Durch die online-Übertragung von Betriebszuständen lässt sich der Anlagenbetrieb aus der Ferne überprüfen. Die regelmäßige Kontrolle der Prozesse durch fachkundiges Personal erleichtert die frühzeitige Erkennung von ungünstigen Betriebszuständen und ermöglicht einen externen Zugriff auf die Prozesssteuerung durch den Betreuer. Dadurch können mögliche Stillstandzeiten auf ein Minimum reduziert werden.

Die aktuellen Raummaße des Behandlungsraums sind 5,33 m x 3,95 m mit einer Deckenhöhe von 2,6 m. Dies ergibt ein Raumvolumen von  $55 \text{ m}^3$ . Die Raumluft als auch die einzelnen Behandlungsanlagen sind an eine aktive Überdachentlüftung mittels eines Kanalventilators der Firma Helios angeschlossen. Die Anlage läuft normalerweise auf Stufe zwei, kann jedoch noch um drei Stufen höher eingestellt werden. Der Luftaustausch auf Stufe 2 beträgt  $1526 \text{ m}^3 \text{ h}$ . Somit wird die Raumluft 28 mal pro Stunde komplett ausgetauscht. Dies ist deutlich höher als der durch HUBER SE empfohlene und an anderen Anlagen erprobte Luftaustausch von 8-10 mal pro Stunde.

### 3.2.2.1 Urin

#### 3.2.2.1.1 Aufbau der MAP-Fällungsanlage

Der Urin wird mit Hilfe eines chemisch-physikalischen Prozesses im Fällungsreaktor behandelt. Dabei entsteht Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) in fester Form, welches als wertvolles Düngemittel für die Landwirtschaft gilt.

Mit Hilfe eines konstruktiv und verfahrenstechnisch angepassten Fällungsreaktors wird der gesammelte Urin behandelt (Abbildung 16). Der Reaktor besteht grundsätzlich aus einem Fällungsbehälter mit Rührwerk, einen Beutförderer als Dosierstation und einer Filtrations-einheit mit Filtersäcken. Nach Zugabe von Magnesiumoxid (MgO) entsteht Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) in fester Form, welches wertvolle Düngungseigenschaften vorweist.

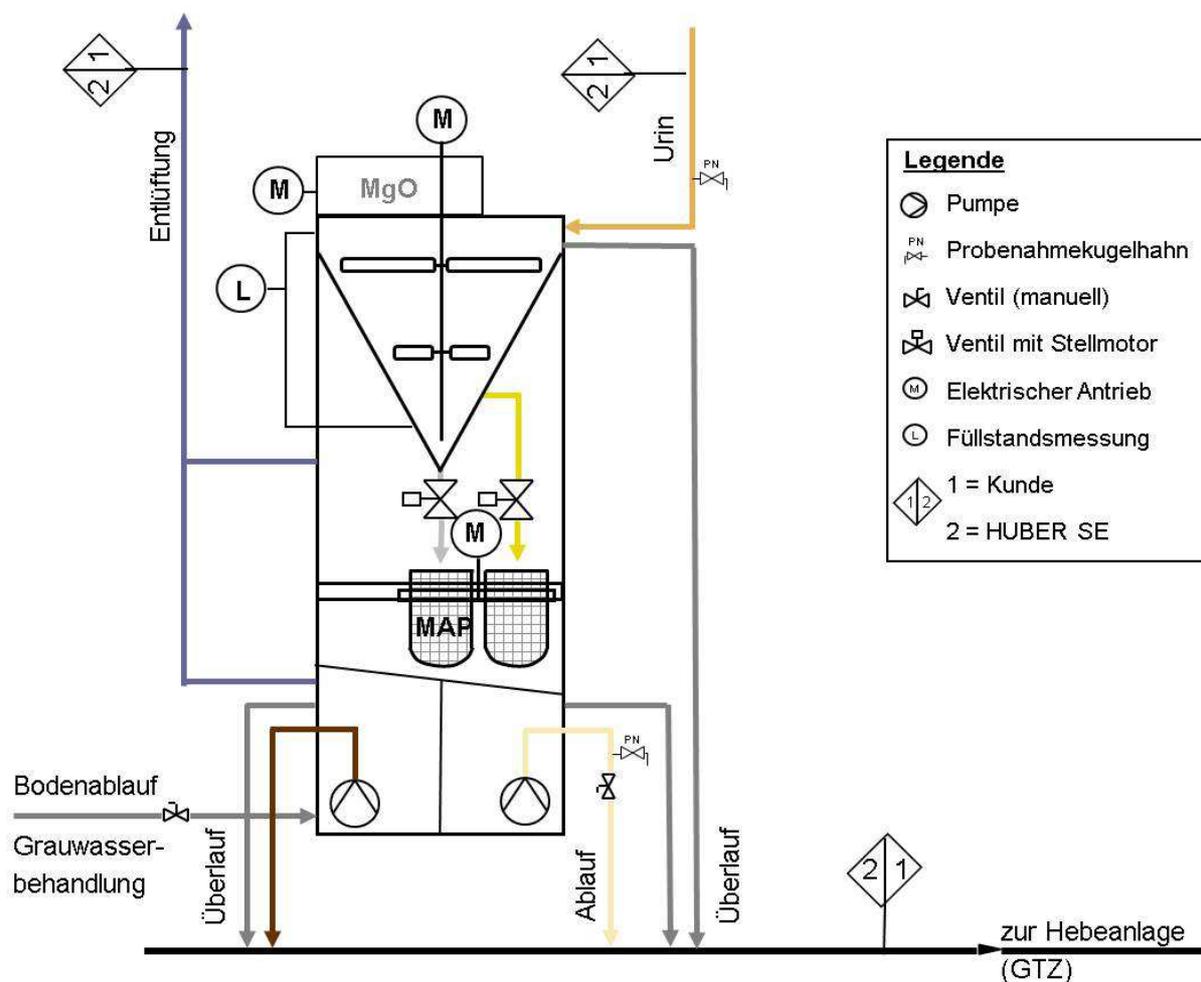


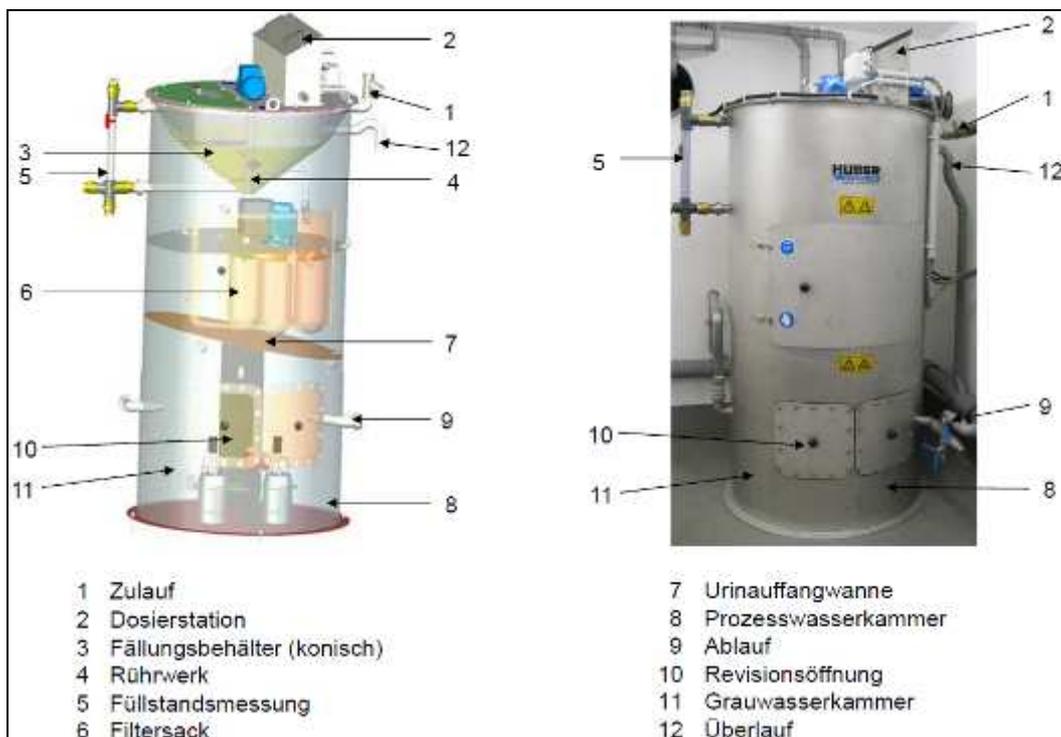
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Fällungsreaktors.

#### Fällungsreaktor

Der Fällungsreaktor setzt sich aus dem Fällungsbehälter mit Rührwerk und der Filtrations-einheit mit Filtersackrevolver sowie dem unten angeordneten Pumpsystem zusammen. Der

Fällungsbehälter besteht aus einem runden geschlossenen Edelstahltrichter und besitzt ein Fassungsvermögen von 50 l. Im oberen Bereich des Trichters befindet sich die 1 ½“ große Zulaufleitung. An der äußeren Behälterwand ist eine Füllstandsmessung (kapazitiver Sensor) angebracht. Am Deckel des Trichters ist neben dem Magnesiumoxid-Dosierer auch der Antrieb des Rührwerks installiert. Das Rührwerk selbst besteht aus einem Paddelrührwerk mit Stromstörern und befindet sich im Inneren des Trichters. Am Trichterboden sowie im unteren Viertel des Trichters befinden sich zwei Ablaufleitungen, welche mit Ventilen abgeschlossen sind.

Unterhalb der Absperrarmatur des Fällungsbehälters schließt sich die Filtrationseinheit an. Sie besteht aus einem elektrisch angetriebenen Filtersackrevolver mit fünf leicht zu demonstrierenden Filtersäcken. Unterhalb der Filtersäcke befindet sich das Ablaufsystem und ein Pumpsystem. Das Pumpsystem besteht aus einer Pumpstation (Tauchmotorpumpe mit Schwimmerschalter) für das Prozesswasser sowie aus einer Pumpstation für die Bodenabläufe der Grauwasseranlage. Jede Pumpstation ist durch eine Revisionsöffnung am Reaktormantel zugänglich. Die Abläufe der Pumpstationen sind durch Leitungen mit der bauseitigen Hebeanlage verbunden. Um die Geruchsbelästigung zu minimieren, ist der Reaktor mit zahlreichen Entlüftungen ausgestattet. Zusätzlich sind alle Kammern mit einem Überlauf Ad 50 versehen.

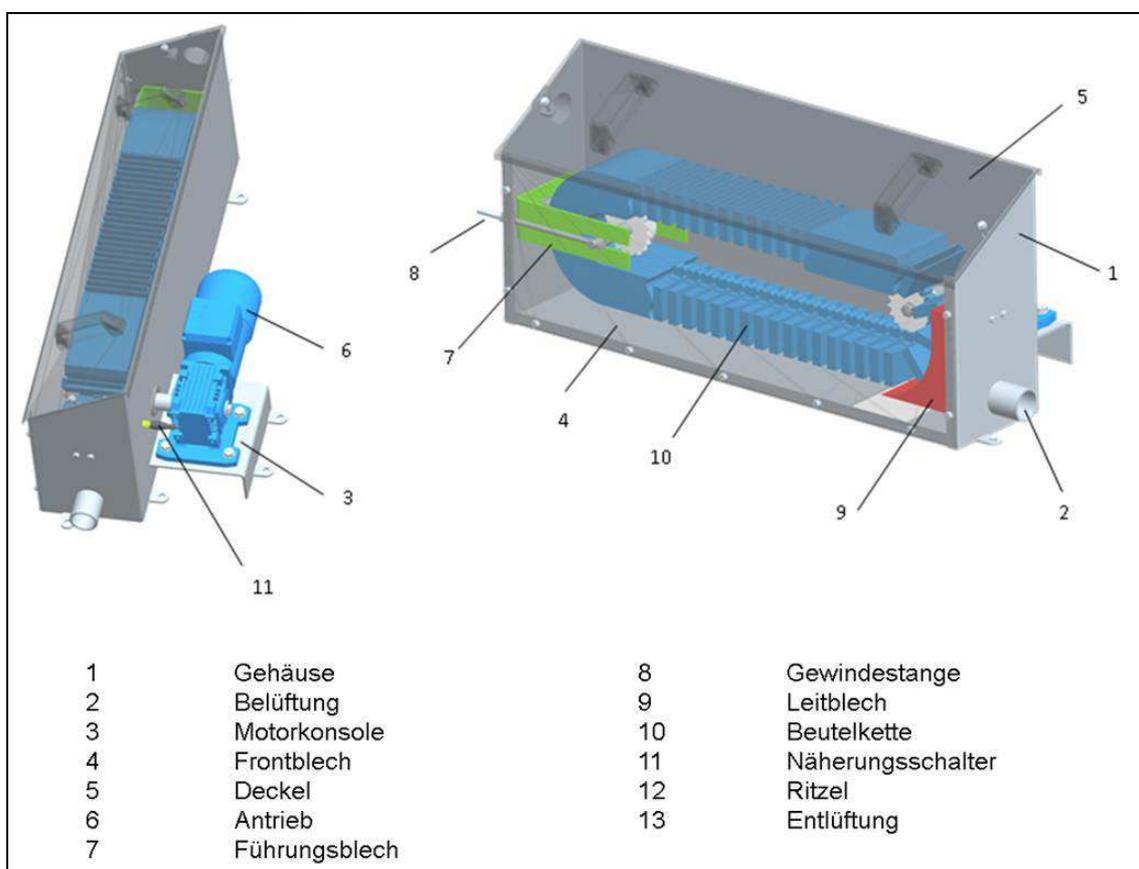


**Abbildung 17: Fällungsreaktor. Links: 3-D-Modell des Reaktors; Rechts: Installierter Reaktor im Keller des GIZ-Hauptgebäudes.**

### Magnesiumoxid-Dosierer

Der neu entwickelte Magnesiumoxid-Dosierer (Abbildung 18) besteht im Wesentlichen aus einem rechteckigen Gehäuse, der waagrecht angeordneten Beutelkette inklusive Antriebstei-

le und einem außen liegenden Motor. Das Gehäuse ist mit einem Deckel geruchsdicht verschlossen. Im Boden des Gehäuses befindet sich ein rechteckiger Auswurf. An den Seitenwänden sind Anschlüsse zur Be- und Entlüftung angebracht. Kernstück des Magnesiumoxid-Dosierers ist die Beutelkette mit insgesamt 48 Beutelhalter. Hierbei können alle Beutelhalter, des oben liegenden horizontalen Kettenstranges, mit insgesamt 20 senkrecht liegenden MgO-Beuteln bestückt werden (siehe auch Abbildung 20). In den Motor ist eine Antriebswelle eingebracht, an dessen Ende ein Ritzel befestigt ist. Ein zweites Ritzel sitzt an der anderen Seitenwand des Gehäuses zwischen dem Führungsblech. Über die beiden Ritzel verläuft die Beutelkette. Im motornahen Umlenkbereich der Kette ist in der Rückwand des Gehäuses ein Näherungsschalter angebracht; im Inneren des Gehäuses unterhalb der Beutelkette ist ein Leitblech befestigt.



**Abbildung 18: Magnesiumoxid-Dosierer in verschiedenen 3D-Ansichten (Frontblech und Deckel transparent dargestellt).**

### 3.2.2.1.2 Funktionsbeschreibung

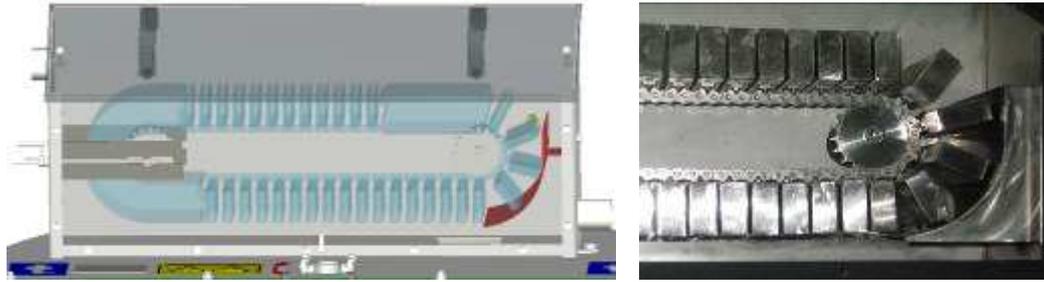
Der Reaktor arbeitet im Batchverfahren. Zu Beginn laufen bis max. 50 l Urin in den trichterförmigen Fällungsbehälter ein. Hierfür öffnet der in der Zulaufleitung montierte Schieber automatisch, dieser schließt wenn ein bestimmter Füllstand im Trichter erreicht wurde. Anschließend wird mit Hilfe des Magnesiumoxid-Dosierers eine definierte Menge von pulverförmigen MgO als Fällungsmittel zugegeben. Das Fällungsmittel ist in einer wasserlöslichen Folie aus Polyvinylalkohol (PVOH) verpackt. Durch Kontakt mit der Flüssigkeit löst sich der

thermoplastische Kunststoff innerhalb einer halben Minute auf und das Rührwerk vermischt das MgO mit dem Urin. Das Magnesium (gelöst) reagiert mit dem Phosphat (gelöst) und Teilen des Ammoniums (gelöst) und bildet MAP (fest). Nach einer Kristallisations- und Sedimentationszeit von ca. 3 h wird der flüssige Überstand über den ersten Filtersack des Filtersackrevolvers nach unten abgelassen. Anschließend wird das sedimentierte Fällungsprodukt über das andere Ventil in den zweiten Filtersack entleert. Die Flüssigkeit tropft hindurch und das MAP wird zurückgehalten. Nach jedem 4. Zyklus ersetzt der erste Filtersack durch automatische Drehung den zweiten Filtersack. Das unterhalb der Filtersäcke angebrachte Ablaufsystem fängt den restlichen Urin (Prozesswasser) auf, welcher in dieser Zeit aus den Filtersäcken entweicht, und leitet ihn in die Pumpstation für das Prozesswasser. Ist ein bestimmter Füllstand in der Kammer der Pumpstation erreicht wird durch den Schwimmerschalter die Tauchmotorpumpe angesteuert und das Prozesswasser automatisch zur bauseitigen Hebeanlage gefördert. Des Weiteren befindet sich, durch eine Trennwand separiert, eine zweite Pumpstation für die Bodenabläufe der Grauwasseranlage im unteren Teil des Fällungsreaktors. Bei Wartungsarbeiten an der Grauwasseranlage können die Bodenabläufe in die Pumpstation abgelassen werden; diese fördert dann automatisch zur bauseitigen Hebeanlage. Beide Pumpstationen können über die Revisionsöffnungen erreicht werden. Nach 18 Befüllungen werden die Filtersäcke aus der Halterung genommen und in eine Box zum restlichen Abtropfen gegeben.



**Abbildung 19:**  
**Links: Neue Filtersäcke (Nadelfilz) eingehängt in Filtersackrevolver; Rechts: Befüllte Filtersäcke (Nylon) eingehängt in Filtersackrevolver.**

Im Magnesiumoxid-Dosierer wird über ein auf der Motorwelle befestigtes Ritzel, die Beutelkette angetrieben. Ein Näherungsschalter gewährleistet, dass pro Urin-Charge nur jeweils ein Beutel in den Fällungstrichter eingebracht wird. Das ebenfalls im motornahen Umlenkbereich der Kette montierte Leitblech verhindert den verfrühten Auswurf der Beutel aus den Beutelhaltern und gewährleistet eine definierte Auswurfposition.



**Abbildung 20:** Links: 3-D-Modell des Magnesiumoxid-Dosierers; Rechts: Innenansicht der Dosierstation.

### 3.2.2.2 Grauwasserbehandlung

#### 3.2.2.2.1 Aufbau der Grauwasserbehandlung mittels MBR

Im Rahmen des Projekts wurde eine MBR-Anlage für die Aufbereitung von Grauwasser (Küchenspül- und Waschwasser) am Standort Eschborn zur Verfügung gestellt und im laufenden Betrieb verfahrenstechnisch, in enger Zusammenarbeit mit der THM, an die Randbedingungen angepasst (siehe auch Kapitel 3.3).

Die Reinigung von Grauwasser (fäkalfreies Waschwasser) erfolgt im Wesentlichen durch eine mechanische Vorreinigung und eine Membranbelebung. Bei der mechanischen Vorreinigung werden mit Hilfe eines Siebes größere Partikel und Haare entfernt. In der MBR-Stufe erfolgt der Abbau von Schmutzstoffen durch den Belebtschlamm und anschließender Ultrafiltration des biologisch gereinigten Grauwassers durch das Membranmodul (Abbildung 21). Durch die Membranultrafiltration (38 nm) kann die Anlage die mikrobiologische Qualität für Badegewässer nach der EU Richtlinie erreichen (siehe auch Kapitel 3.3.3.10 und 3.4.3.5).

Das gesamte Grauwasser wird durch ein neuartiges Siebelement (HUBER Turny, Abbildung 22) von größeren Feststoffen befreit. Eine extern angebrachte Spritzdüsenleiste, welche mit dem Permeat der Grauwasseraufbereitung betrieben wird, dient der Abreinigung des Siebs. Die Feststoffe werden dabei in die Kanalisation gespült.

Der Vorlagebehälter dient als Puffer für die während des Tages anfallenden, schwankenden Grauwassermengen. Von dort wird das Grauwasser mittels einer Beschickungspumpe in den mit Belebtschlamm gefüllten Membranbelebungsreaktor geleitet. Für die Filtration kommt ein Ultrafiltrationsmodul mit 3,5 m<sup>2</sup> Filtrationsoberfläche zum Einsatz. Ein unterhalb des Moduls angebrachter Rohrbelüfter wird über ein Gebläse mit Spülluft versorgt. Durch diesen kontinuierlichen, grobblasigen Spüllufteintrag wird eine Überströmung der Membrane erzeugt und eine Verblockung der Membranoberfläche verhindert. Für die biologischen Abbauprozesse und einer Durchmischung des Belebtschlammes wird über einen zusätzlichen Belüfter (feinblasig) am Beckenboden Sauerstoff eingetragen. Über die Permeatleitung gelangt das Permeat anschließend in den Betriebswasserbehälter (Speicher). Bei einem Mangel an Betriebswasser wird der Behälter automatisch mit Trinkwasser nachgespeist. Im Behälter be-

findet sich eine Pumpe, die die Spritzdüsenleiste zur Abreinigung des Siebelements, sowie die Spülung der Braunwasservorreinigung versorgt. Alle drei Behälter (Vorlagebehälter, MBR-Behälter und Speicherbehälter) besitzen einen Überlauf, der in die Sammelleitung zur Hebeanlage führt. Die gesamte Anlage ist geruchsdicht konzipiert.

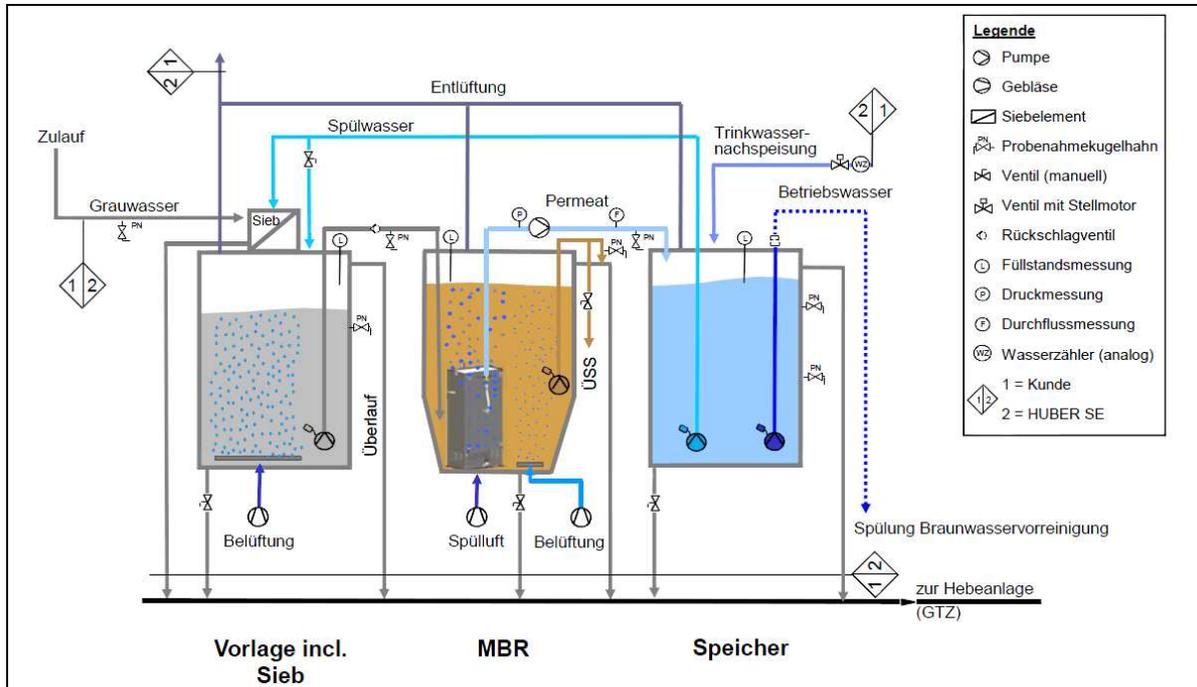
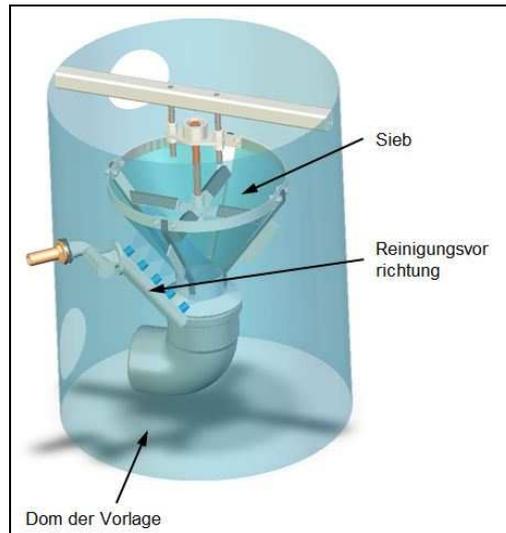


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Grauwasserbehandlung im GIZ-Gebäude, Haus 1.

### Siebelement

Die Filtereinheit (Abbildung 22) besteht aus einem Siebelement (Maschensieb 3 mm, Drahtdicke 0,5 mm) in Kegelstumpfform, das an einer zentralen Führung befestigt ist und sich frei drehen kann. Vier Stäbe, die mit Flügeln versehen sind, und in einem 60° Winkel aufgestellt sind, bilden zusammen mit den Metallringen für die Fixierung im unteren und oberen Bereich die Fassung des Filterelements. Am unteren Ring ist ein Schirm angebracht. Am oberen Ende der Halterungsstange ist die Filtereinheit mit einem axialen Rillenkugellager oberhalb eines Q-Rohres gelagert. Das Kugellager ist durch eine Hülse vor Spritzwasser geschützt. Eine extern angebrachte Spritzdüsenleiste ist mit fünf Flachstrahldüsen ausgestattet und wird mit Betriebswasser (Permeat aus dem Speicherbehälter) gespeist. Durch die am äußeren Rand angebrachte Zuleitung durchströmt das ungereinigte Grauwasser das schräg abfallende Maschensieb. Die Feststoffe werden im Sieb zurückgehalten, während das Filtrat nach außen in dem Dom gelangt und somit in den Vorlagebehälter fließt. Die zurückgehaltenen Grobstoffe werden nach einem festgelegten, zeitlichen Intervall durch die Spritzdüsenleiste abgereinigt. Diese Störstoffe gelangen über ein KG-Rohr am Konus in die Sammelleitung der Anlage (Zulauf Hebeanlage).



**Abbildung 22: Siebelement HUBER TURNY zur Entfernung von Grobstoffen und Haaren.**

### **Vorlagebehälter**

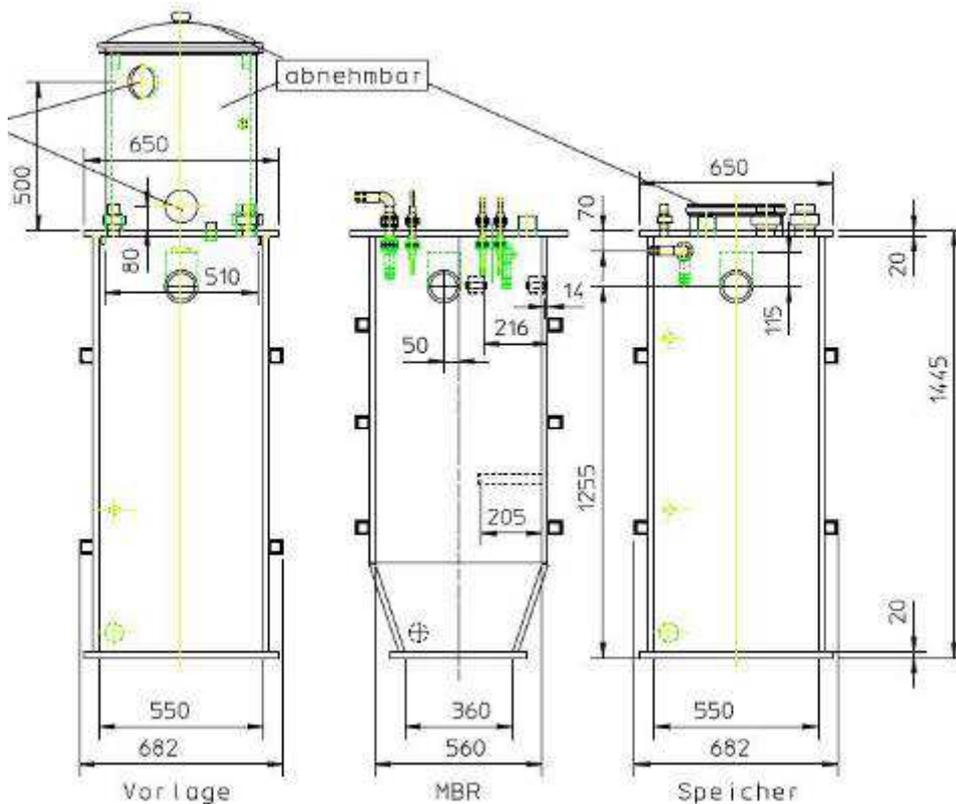
Der Vorlagebehälter (Abbildung 23) ist ein speziell für das Projekt gefertigter Polyethyln (PE) Behälter. Der Speicher hat einen gekapselten Dom, in welchem sich das Siebelement und die Spritzdüsenleiste befinden. Ferner sind ein Grundablass (2"), ein Zu- und Überlauf (beide 4") vorgesehen. Der Behälter ist mit einer Entlüftung ausgestattet, um Geruchsbelästigungen zu vermeiden. Der Behälter ist aus PE gefertigt und mit zusätzlichen Verstärkungen (PE-Stahl-Rahmen) ausgeführt. Er verfügt über ein Speichervolumen von etwa 490 l bei einem Raumbedarf von ca. 2170 x 600 x 700 mm. Eine Höhenniveaumessung (Typ Vegawell 52) sowie ein Spülwasseranschluss sind an der Behälteroberkante befestigt. Es befinden sich Probenahmemöglichkeiten (Kugelhahn) am Zulauf, dem Vorlagebehälter sowie an der Beschickungsleitung zum MBR-Behälter (Abbildung 21).

### **Membranbelebungsreaktor und Speicherbehälter für Permeat**

Der Membranbioreaktor besteht aus einem Belebungsbecken mit einem integrierten Membranfiltrationsmodul. Der kundenspezifische Behälter besteht aus PE und ist am unteren Teil konisch zulaufend. Durch einen PE-Stahl-Rahmen werden unerwünschte Verformungen vermieden. Um Geruchsbelästigungen zu vermeiden ist der Behälter gekapselt ausgeführt. Das Volumen der Biologie beträgt maximal 0,5 m<sup>3</sup> bei einem Raumbedarf von ca. 1400 x 560 x 730 mm. Die Anschlüsse für die Permeat- und Belüftungsschläuche ist an der Oberseite angeordnet. Zudem ist eine Höhenniveaumessung vom Typ Vegawell 52 installiert.

Es sind eine Entlüftung sowie ein Grundablass (2"), ein Zu- und Überlauf (beide 4") vorgesehen. Zur Anwendung kommt ein spezielles Membranfiltrationsmodul mit einer Ultrafiltrationsmembran (3,5 m<sup>2</sup> Membranfläche), welches direkt im Belebungsbecken untergetaucht ist. Die Abreinigung des Moduls erfolgt über ein Spülluftgebläse.

Das Permeat wird durch die Membrane über die Permeatpumpe abgesaugt. Der Transmembrandruck und der Durchfluss des Permeats werden erfasst und online überwacht. Für den Überschussschlammabzug ist eine Überschussschlammpumpe installiert. Diese ist mit der Ablaufleitung des Behälters, welche in die Kanalisation führt, verbunden. Ein Probenahme-kugelhahn befindet sich ebenfalls in der Leitung.



**Abbildung 23: Vorlage-, MBR- und Speicherbehälters. Schnitt B-B.**

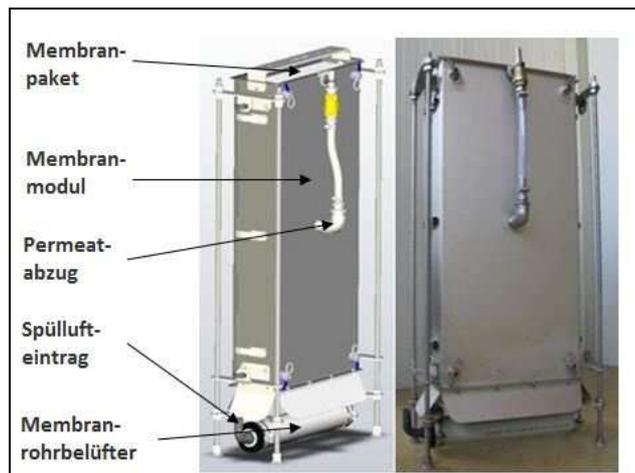
Bauteile des Membranfiltrationsmoduls und deren Funktionen:

- Einhausung für die Moduleinheit (Abbildung 24):  
Die Einhausung ist aus Edelstahl gefertigt und stellt einen robusten Schutz für das Membranmodul gegen Beschädigungen dar. An der Einhausung sind die Leitung für den Permeatabzug sowie ein Spülluftanschluss und eine Kette (am Haltegriff) für Montagearbeiten angebracht.
- Ultrafiltrationsmembranmodul:  
Über das Membranmodul erfolgt die Trennung von Belebtschlamm und Klarwasser. Die Membranmodule bestehen aus einzelnen Ultrafiltrationsmembrantaschen aus Polyethersulfon (PES). Die Trenngrenze beträgt ca. 38 nm bei 3,5 m<sup>2</sup> Filtrationsoberfläche. Durch die geringe Porengröße werden neben den Feststoffen auch alle Bakterien und nahezu alle Viren und Keime zurückgehalten.
- Membranrohrbelüfter zur Abreinigung der Membranoberfläche:  
Der grobblasige Membranrohrbelüfter (Abbildung 24) dient der Verteilung der Spülluft, die eine Abreinigung der bei der Membranfiltration entstehenden Deckschichten

bewirkt und den aufkonzentrierten Schlamm von der Membranoberfläche entfernt. Der Eintrag der Spülluft erfolgt über ein Gebläse.

- Membranrohrbelüfter für zusätzlichen Sauerstoffeintrag im MBR-Behälter (für biologische Abbauprozesse):

Der feinblasige Rohrbelüfter gewährleistet eine ausreichende Sauerstoffversorgung für die biologischen Abbauprozesse. Der Eintrag der Prozessluft erfolgt über ein Gebläse in den am Behälterboden angebrachten, zusätzlichen Rohrbelüfter.



**Abbildung 24: Darstellung mit Beschreibung des Ultrafiltrationsmoduls.**

Der Speicherbehälter (Abbildung 23) ist ein speziell angefertigter gekapselter Behälter mit einem Grundablass (2"), ein Zu- und Überlauf (beide 4"). Zudem ist der Behälter mit einer Entlüftung ausgestattet, um Geruchsbelästigungen zu vermeiden. Der Behälter ist aus PE gefertigt und mit zusätzlichen Verstärkungen (PE-Stahl-Rahmen) ausgeführt. Er besitzt ein Speichervolumen von ca. 490 l bei einem Raumbedarf von ca. 1620 x 600 x 700 mm: Die Kapazität entspricht der maximal möglichen, täglichen Permeatmenge von 0,5 m<sup>3</sup>. Das Material PE genügt den Anforderungen für Trinkwasser. Eine Höhenniveaumessung vom Typ Vegawell 52 ist an der Behälteroberseite befestigt. Ebenso ist ein Anschluss für die automatische Trinkwasser Nachspeisung vorgesehen. Im Behälter befindet sich eine Pumpe, welche für die Reinigung des Siebelements, den Vorlagebehälter und für den Ablauf der Brauwasservorreinigung vorgesehen ist. An diesen Punkten wird das Grauwasserpermeat im Projekt als Servicewasser wiedergenutzt. Am unteren Ende des Speichers befindet sich der Bodenablauf.

### 3.2.2.2 Funktionsbeschreibung

#### Siebelement

Zur Entfernung von Störstoffen wie Haare, Textilfasern und abfiltrierbare Stoffe wird das Grauwasser durch ein Siebelement mechanisch vorbehandelt. Durch diese Vorreinigung werden Ablagerungen im Vorlagebehälter und Verzopfungen der Membran auf ein Minimum reduziert.

Die Beschickung erfolgt tangential von einem KG-Rohr (Durchmesser 110 mm) in den oberen Bereich des Siebelements, so dass eine Siebung von innen nach außen erfolgen kann. Durch das Aufprallen des Zulaufstroms auf das Netz und die Flügel setzt sich das Siebelement in Bewegung, wodurch immer neue Siebfläche dem zuströmenden Grauwasser zur Verfügung steht. Durch ein Kugellager wird eine kontinuierliche Rotation ermöglicht. Die zurückgehaltenen Störstoffe bewegen sich durch die Rotation und das nachströmende Zulaufwasser nach unten zum unteren Ring, wo sie schließlich über eine Ablaufleitung entsorgt werden.

Der am unteren Ring angebrachte Schirm leitet das außen am Netz ablaufende Wasser neben dem Ablaufrohr vorbei und mindert damit den Wasserverlust. Eine extern angebrachte Spritzdüsenleiste, die im Intervallbetrieb arbeitet, dient der gründlichen Reinigung der Siebfläche. Durch die Anordnung der Leiste wird eine gegenläufige Rotation des Siebelements erzeugt und somit die komplette Oberfläche während der Rückspülung abgereinigt.

### **Vorlagebehälter**

Der Vorlagebehälter dient der Pufferung von hydraulischen Spitzen sowie der Sicherstellung der kontinuierlichen Beschickung der Membranmodule im MBR-Behälter. Die Reinigung des Behälters kann über ein mit Betriebswasser betriebenes Spülsystem an der Behälteroberkante erfolgen, welches bei Wartungsarbeiten manuell aktiviert wird. Mit der Beschickungspumpe wird das Grauwasser in den Membranbelebungsreaktor geleitet. Der Füllstand wird mit Hilfe der Höhenniveaumessung ermittelt und in der Steuerung angezeigt. Bei zu niedrigem Füllstand wird die Beschickungspumpe abgestellt, um ein Trockenlaufen zu verhindern. Ein Rückschlagventil in der Leitung zum Membranbelebungsreaktor verhindert das Rückfließen von Belebtschlamm in den Vorlagebehälter.

### **Membranbelebungsreaktor und Speicherbehälter für Permeat**

Über das Membranmodul erfolgt die Trennung von belebtem Schlamm und Klarwasser. Durch eine Permeatpumpe wird ein Unterdruck an die Membranplatten angelegt. Somit wird das gereinigte Abwasser (Permeat) durch die Membranen filtriert und aus dem System abgezogen. Der grobblasige Membranrohrbelüfter dient der Verteilung der Spülluft. Durch die Strömung des Luft/Schlammgemisches zwischen den Membranplatten werden die Oberflächen der Membranen kontinuierlich gereinigt und eine Deckschichtbildung weitestgehend verhindert. Der feinblasige Rohrbelüfter gewährleistet eine ausreichende Sauerstoffversorgung für die biologischen Abbauprozesse im MBR-Behälter. Beide Rohrbelüfter werden über Gebläse mit Luft versorgt.

Das Niveau in der Anlage wird über eine Höhenniveaumessung (Typ Vegawell 52) erfasst. Über zwei Schaltpunkte, auf welche die Niveaumessung eingestellt ist, wird der Anlagenbetrieb im Normalmodus betrieben. Bei einer Unterschreitung des unteren Niveaus, geht der Anlagenbetrieb in den Sparmodus über. Den zwei Stufen sind jeweils charakteristische Laufzeiten der Aggregate (Pumpe, Belüfter) hinterlegt, um den wechselnden Bedingungen gerecht zu werden.

Die Spülluft kann optional intermittierend betrieben werden, läuft jedoch parallel mit der andauernden Filtration. Die Belüftungsparameter können vom Fachpersonal gegebenenfalls optimiert und bedarfsgerecht angepasst werden. Durch diese Betriebszustände kann die Anlage in Zeiten mit geringem Zufluss energiesparend betrieben werden. Die biologische Reinigungsstufe ist zur vollständigen Nitrifikation ausgelegt und wird kontinuierlich betrieben. Das Permeat ist dank der Ultrafiltration nahezu keimfrei.

Der Speicherbehälter dient als Speichertank für das Betriebswasser. Hieraus wird das Spülwasser für das Siebelement, den Vorlagebehälter und für die Spülung der Brauwasservorreinigung mittels einer Pumpe entnommen. Die Trinkwassernachspeisung erfolgt direkt in den Speicherbehälter nach DIN EN 13077 und DIN EN 13076. Sie wird in Abhängigkeit des Speicherfüllstandes gesteuert. Der Füllstand wird mit Hilfe einer Höhenniveaumessung vom Typ Vegawell 52 bestimmt.

### **3.2.2.3 Braunwasserbehandlung**

#### **3.2.2.3.1 Aufbau der Braunwasserbehandlung mittels MBR**

Die bei der GIZ realisierte Braunwasserbehandlung erfolgt durch einen Membranbioreaktor nach vorheriger Entfernung der Grobstoffe durch eine Separationseinheit. Durch die Membranultrafiltration (38 nm) kann die Anlage die mikrobiologische Qualität für Badegewässer nach der EU Richtlinie erreichen. Die Braunwasserbehandlung erfolgt durch einen Membranbioreaktor (MBR) nach vorheriger Entfernung der Grobstoffe mittels optimierter Separationseinheit. In der MBR-Stufe werden biologisch „abbaubare“ Stoffe abgebaut und mit Hilfe der Ultrafiltration Feststoffe und Bakterien sowie nahezu alle Viren zuverlässig zurückgehalten.

Die Brauwasservorreinigung besteht aus einem Edelstahl-Zylinder (Speichervolumen ~400 l) mit integriertem Siebkorb (3 mm Lochblech). Das Filtrat fließt in den Edelstahlzylinder, welcher als hydraulischer Puffer und zur kontinuierlichen Beschickung der MBR-Anlage dient. Um eine Durchmischung der Vorlage vor der Beschickung zu gewährleisten ist der Zylinder mit einem Rührwerk ausgestattet. Der Feststoffaustrag erfolgt über eine im Siebkorb gefasste Schneckenwendel mit Bürste. Der Austrag gelangt über einen Abwurfschacht mit angeschlossener Leitung zur Hebeanlage (Pumpstation).

Im MBR-Behälter kommt ein Ultrafiltrationsmodul mit 3,5 m<sup>2</sup> Filtrationsoberfläche zum Einsatz. Bei geringem Unterdruck wird das biologisch gereinigte Brauwasser durch die Membrane (nominelle Porengröße von 38 nm) abgesaugt. Aufgrund der Porengröße der Membrane werden alle Partikel inklusive Bakterien sowie die meisten Viren zurückgehalten. Ein kontinuierlicher, grobblasiger Spüllufteintrag unterhalb der Membranmodule erzeugt eine Überströmung der Membrane und verhindert eine Verblockung der Membranoberfläche. Für die biologischen Abbauprozesse wird über zwei zusätzliche Belüfter (feinblasig) am Beckenboden Sauerstoff eingetragen.

Beide Behälter (Braunwasservorreinigung und MBR-Behälter) besitzen einen Überlauf, der in die Sammelleitung zur Hebeanlage führt. Im Zulauf und oberhalb des Austragsschachtes der mechanischen Vorreinigung ist eine Spülvorrichtung vorgesehen. Die gesamte Anlage (Abbildung 25) ist geruchsdicht konzipiert.

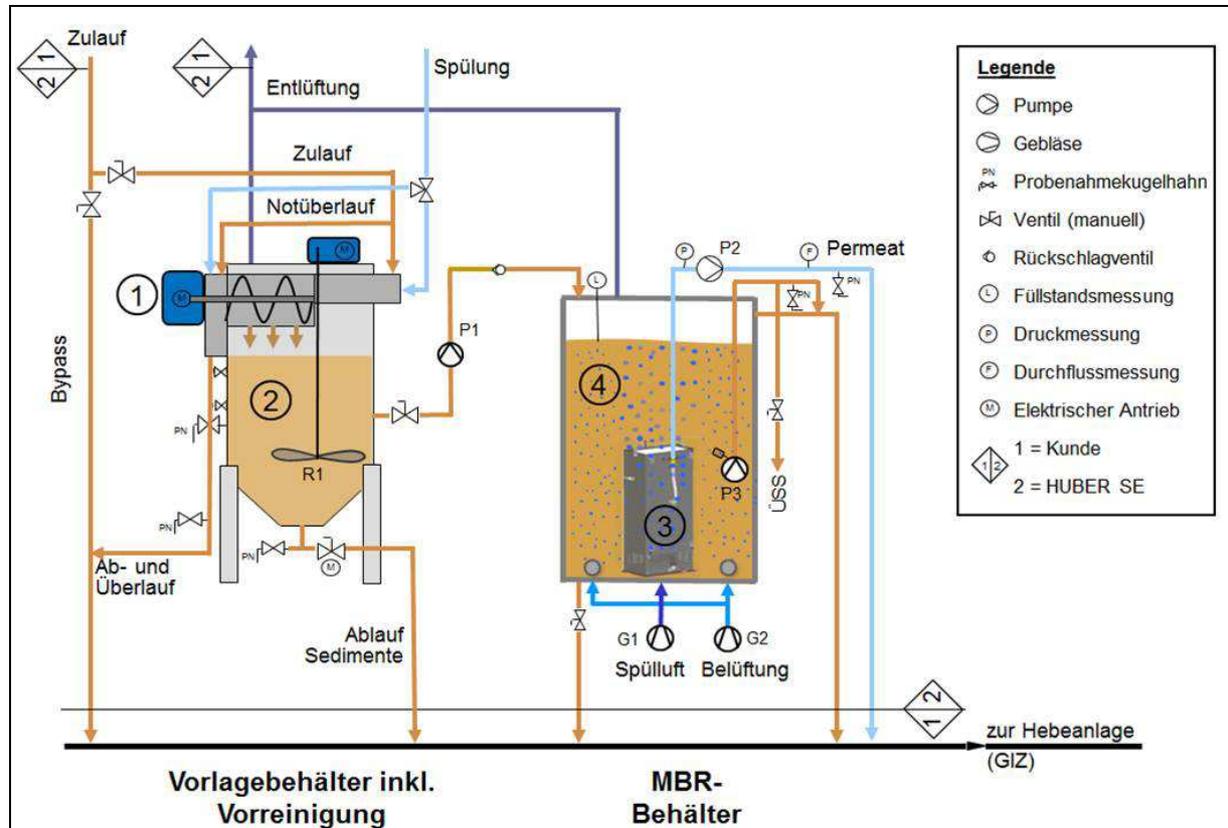


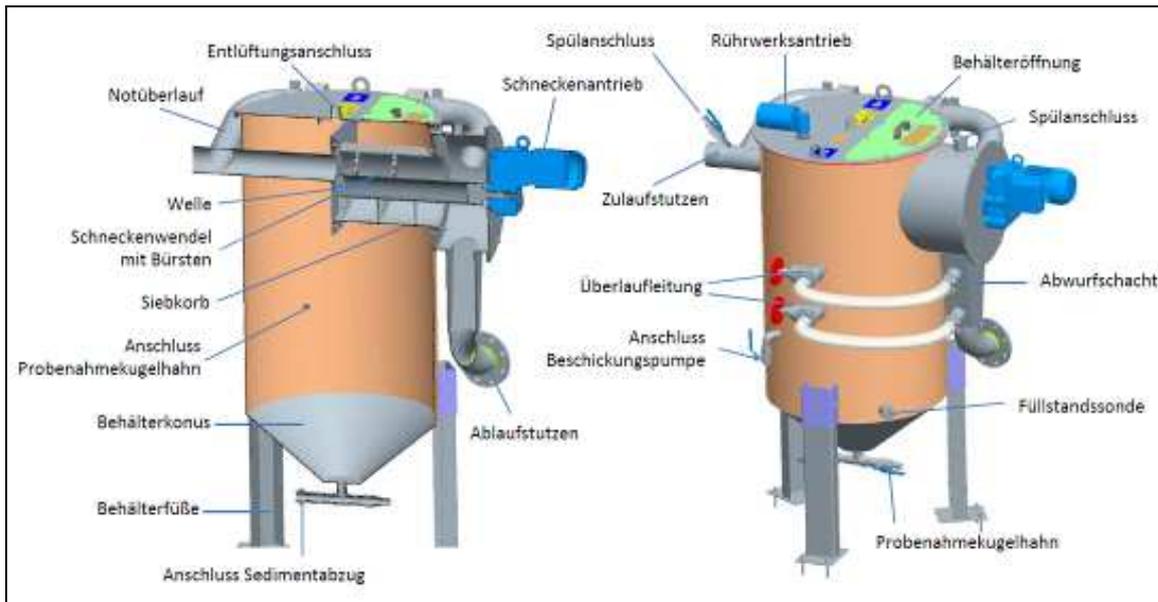
Abbildung 25: Schematische Darstellung der Braunwasserbehandlung im GIZ-Gebäude, Haus 1.

### Braunwasservorreinigung

Die Braunwasservorreinigung besteht aus einem Edelstahl-Zylinder (V2A) mit integriertem Siebkorb und einem Flüssigkeitsvolumen von ca. 400 Liter. Im oberen Bereich des Behälters befindet sich ein waagrecht eingebauter Siebkorb, der mit einem 3 mm Lochblech ausgestattet ist. In dessen Inneren befindet sich eine Transportschnecke, deren Schneckenwendel mit einer Bürste bestückt ist und deren Welle von einem außen angebrachten Getriebemotor angetrieben wird. Eine geschlossene Rohrleitung verbindet im Inneren des Behälters den Siebkorb mit dem Zulaufstutzen an der äußeren Behälterwand. Auf dem Zulaufstutzen ist schräg ein Spülanschluss angebracht. An der gegenüberliegenden Behälterwand befindet sich ein Abwurfschacht, an den die Ablaufleitung mit Probenahmestelle (Kugelhahn) angeschlossen ist. Der Abwurfschacht ist ebenfalls mit einem Anschluss für eine Spülvorrichtung ausgestattet. Ein Notüberlauf, der oberhalb des maximalen Füllstandniveaus außerhalb des Behälters verläuft, verbindet den Zulaufstutzen mit dem Abwurfschacht.

Der untere Bereich des Behälters besteht aus einem konusförmigen Trichter, an dessen oberen Ende ein Füllstandsensoren eingebaut ist. Am Boden des Trichters sind der automatische

Sedimentabzug (mittels eines elektrischen Kugelhahns) und ein Probenahmekugelhahn angebracht. In der zylinderförmigen Behälterwand befinden sich ein weiterer Probenahmekugelhahn sowie der Anschluss der Beschickungspumpe, sowie zwei Überlaufleitungen die über Kugelhähne geschlossen sind. Der Edelstahlzylinder ist geruchsdicht abgeschlossen, mit einem zusätzlichen Entlüftungsanschluss sowie einer Kontrollöffnung, die mit einer Abdeckung abschließbar ist. Im Inneren des Behälters befindet sich ein leicht seitlich versetztes, senkrecht angebrachtes Rührwerk, das über einen Getriebemotor am Behälterdeckel angetrieben wird.



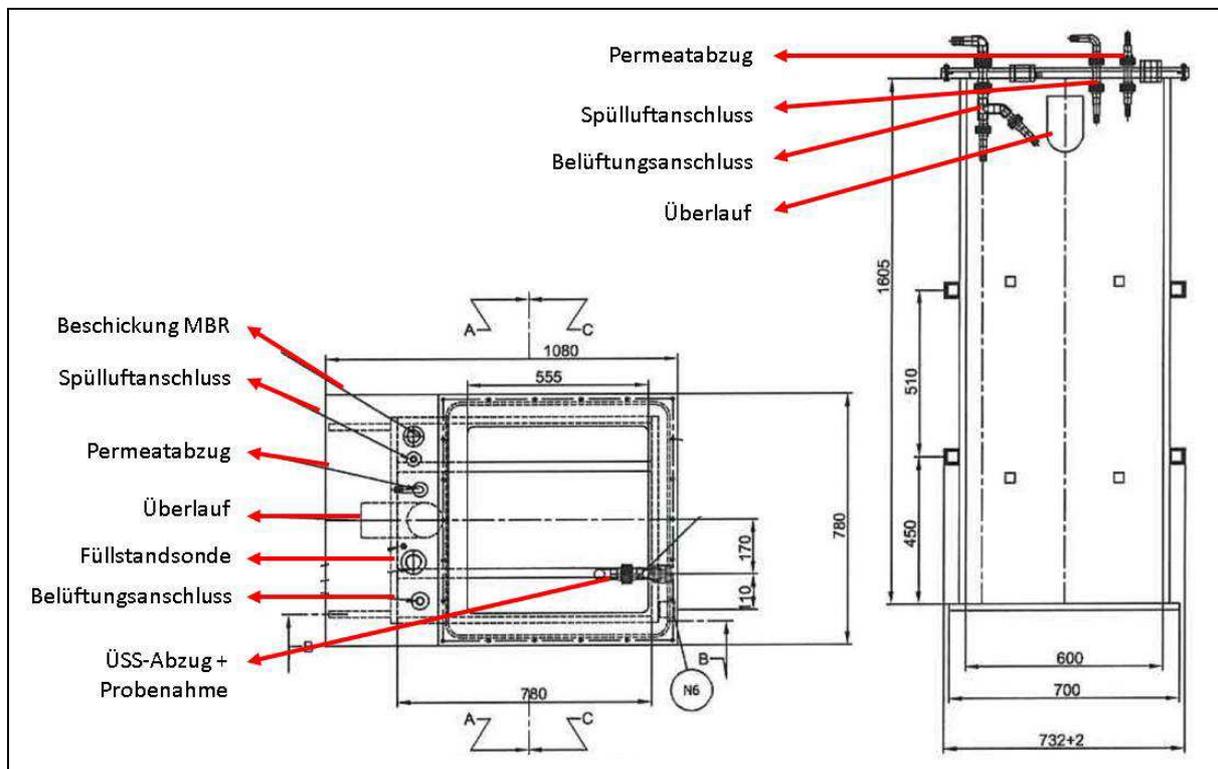
**Abbildung 26: Aufbau der Brauwasservorreinigung.**

### Membranbelebungsreaktor

Der Behälter für den Membranbelebungsreaktor besteht aus PE und wurde projektspezifisch angefertigt. Er ist gekapselt ausgeführt und ist mit mehreren Verstrebungen aus (PE-Stahl-Rahmen) ausgestattet, um unerwünschte Verformungen zu verhindern. Das Volumen der Biologie beträgt max. 0,7 m<sup>3</sup> bei einem Raumbedarf von ca. 1600 x 1080 x 730 mm. Die Anschlüsse für die Permeat- und Belüftungsschläuche sind oben am Behälter angebracht. Eine Höhenniveaumessung, eine Entlüftung sowie ein Überlauf für die Installation sind am Behälter vorgesehen.

Es kommt die gleiche Ultrafiltrationsmembran mit 3,5 m<sup>2</sup> Membranfläche wie bei der Grauwasserbehandlung zur Anwendung, welche direkt im Belebungsbecken untergetaucht ist. Die Trenngrenze der Membrane liegt ebenfalls bei ca. 38 nm. Das Modulgehäuse des Filtrationsmoduls ist aus Edelstahl gefertigt und stellt einen robusten Schutz für das Membranmodul gegen Beschädigungen dar. An der Einhausung ist auch der Anschluss für den Permeat-abzug angebracht.

Unterhalb des Filtrationsmoduls befindet sich eine Belüfterlanze für die Spülluft. Zusätzlich ist neben dem Modul am Behälterboden eine zweite Belüftungsvorrichtung für die Sauerstoffversorgung der Biologie installiert. In der Permeatleitung befinden sich eine Permeatpumpe, ein Probenahmekugelhahn und ein Rückschlagventil. Außerdem sind in der Leitung Messarmaturen für die Druck- und Durchflussmessung integriert.



**Abbildung 27: MBR-Behälter der Braunwasserbehandlung. Draufsicht und Schnitt C-C.**

Für den Überschussschlammabzug ist im Behälter eine Überschussschlammpumpe installiert, die mit der Ablaufleitung zur bauseitigen Hebeanlage und darüber in die Kanalisation verbunden ist. Ein Probenahmekugelhahn befindet sich ebenfalls in der Leitung. Eine Beschickungspumpe dient der Substratförderung vom Auffangbehälter der Vorreinigungsstufe in den Behälter des Membranbelebungsreaktors.

### 3.2.2.3.2 Funktionsbeschreibung

#### Braunwasservorreinigung

Das ankommende Braunwasser wird über einen Zulaufstutzen in den Siebkorb gespült. Die Feststoffabtrennung erfolgt über das zylinderförmige Lochsieb mit einem Lochdurchmesser von 3 mm. Ein großer Teil der Flüssigphase wird in dem darunter liegenden Vorlagebehälter aufgefangen, der mit dem Rührwerk vor der Beschickung des MBRs durchmischt wird. Die zurückgehaltenen Feststoffe (Fäzes und Toilettenpapier) werden über die integrierte Transportschnecke, welche intervallweise betrieben wird, automatisch aus dem Inneren des Siebrohres entfernt und zusammen mit der restlichen Flüssigphase in die Ablaufleitung transportiert. Die Bürsten auf der Schneckenwendel reinigen beim Transport zusätzlich den Siebkorb.

Über den in Fließrichtung angebrachten Spülanschluss am Zulaufstutzen lassen sich mögliche Ablagerungen bei gleichzeitigem Schneckenbetrieb manuell aus dem Innenraum des Siebkorb entfernen. Als Spülmedium wird das Permeat aus der Grauwasserbehandlung genutzt. Zusätzlich gewährleistet eine große Bypass-Leitung einen sicheren Verstopfungsschutz für den Fall, dass im Siebkorb eine Verblockung vorliegen sollte und die Spritzdüse nicht ausreicht, um die Blockade zu lösen. Über einen weiteren Spülanschluss oberhalb des Abwurfschachtes wird die Ablaufleitung zusätzlich gespült. Alle abgesetzten Störstoffe werden einmal pro Tag durch kurzzeitiges Öffnen des automatischen Sedimentabzugs entfernt.

Über einen Entlüftungsanschluss im Behälterdeckel ist die Separationseinheit an die zentrale Entlüftungsanlage angeschlossen, um Geruchsbelästigungen zu vermeiden. Eine Öffnung im Behälterdeckel, die mit einem Abdeckblech geschlossen ist, ermöglicht eine Kontrolle der Siebkorb oberfläche auf Verschmutzungen. Über zwei Überlaufleitungen kann der maximale Behälterfüllstand manuell dem Substratbedarf der MBR-Anlage angepasst werden. Mögliche Füllstandsoptionen sind: Siebkorbunterkante (400 l); Überlaufleitung I (350 l), Überlaufleitung II (280 l).

### **Membranbelebungsreaktor**

Die Beschickungspumpe beschickt den Membranbioreaktor intervallweise aus dem Speicherbehälter der Vorreinigung. Die Füllstandsonde oberhalb des Behälterkonus der Vorlage dient als Trockenlaufschutz für die Beschickungspumpe, die bei einem zu niedrigem Füllstand stoppt.

Über das Membranmodul erfolgt die Trennung von belebtem Schlamm und Klarwasser. Durch eine Permeatpumpe wird ein leichter Unterdruck an die Membranen angelegt. Somit wird das gereinigte Abwasser (Permeat) durch die Membranen filtriert, aus dem System abgezogen und zur bauseitigen Hebeanlage geleitet. Eine Permeatwiedernutzung im Gebäude erfolgt nicht aufgrund des bereits anfallenden und als Servicewasser genutzten Grundwassers. Der grobblasige Rohrbelüfter dient der Verteilung der Spülluft. Durch die Strömung des Luft/Schlammgemisches zwischen den Membranen werden die Oberflächen kontinuierlich gereinigt und eine Deckschichtbildung weitestgehend verhindert. Die feinblasigen Rohrbelüfter gewährleisten eine ausreichende Sauerstoffversorgung für die biologischen Abbauprozesse im MBR-Behälter. Beide Rohrbelüfter werden über je ein Gebläse und einem Luftschlauch mit Luft versorgt.

Das Niveau in der Anlage wird über eine Höhenniveaumessung vom Typ Vegawell 52 erfasst. Über zwei Schaltpunkte, auf welche die Niveaumessung eingestellt ist, wird der Anlagenbetrieb im Normalmodus betrieben. Bei einer Unterschreitung des unteren Niveaus, geht der Anlagenbetrieb in den Sparmodus über. Den zwei Stufen sind jeweils charakteristische Laufzeiten der Aggregate (Pumpe, Belüfter) hinterlegt, um den wechselnden Bedingungen gerecht zu werden. Die Spülluft kann optional intermittierend betrieben werden, läuft jedoch parallel mit der andauernden Filtration. Die Belüftungsparameter können von Fachpersonal

gegebenenfalls optimiert und bedarfsgerecht angepasst werden. Durch diese Betriebszustände kann die Anlage in Zeiten mit geringem Zufluss energiesparend betrieben werden.

Die biologische Reinigungsstufe ist zur vollständigen Nitrifikation ausgelegt und wird kontinuierlich betrieben.

### 3.2.3 Ergebnisse und Diskussionen

#### 3.2.3.1 Anlageninbetriebnahme

##### 3.2.3.1.1 Installation der Urinanlage

Der neu konzipierte Fällungsreaktor samt Datenfernübertragung und Fernüberwachung wurde in Zusammenarbeit mit der GIZ und der THM installiert (Abbildung 28) und erfolgreich in Betrieb genommen.



Abbildung 28: Transport des Fällungsreaktors.

##### 3.2.3.1.2 Installation der Grauwasseranlage

Im Vorfeld der Installation erfolgte ein kompletter Funktionsaufbau (Testbetrieb mit Wasser) aller Anlagenteile mit Steuerung am Standort in Berching (Abbildung 29). Nach der Montage der Anlage am Standort in Eschborn wurde diese zusammen mit den Projektpartnern erfolgreich in Betrieb genommen (Abbildung 30).



**Abbildung 29: Testbetrieb der Grauwasseranlage im Werk der HUBER SE.**



**Abbildung 30: Links: Grauwasseranlage im Kellerraum des GIZ-Hauptgebäudes; Rechts: Innenansicht des Membranbelebungsreaktors.**

### **3.2.3.1.3 Installation der Brauwasseranlage**

Im Vorfeld der Installation erfolgte der Aufbau der Brauwasservorreinigung und Durchführung erster Vorversuche im Werk von HUBER SE. Während einer Anlagenbesichtigung durch die Projektpartner (THM/GIZ) mit anschließender Anlagenschulung und Vorführung konnten mögliche Optimierungen gemeinsam erläutert werden.

Ein Testbetrieb der Brauwasservorreinigung am Standort Eschborn und die Durchführung erster, kleinerer Testreihen mit Brauwasser trugen zur Optimierung der Randbedingungen bei (Abbildung 31).



**Abbildung 31: Links: Vorführung der Brauwasservorreinigung im Werk der HUBER SE; Rechts: Vorübergehender Betrieb der Brauwasservorreinigung in Eschborn.**

Nach der Montage der MBR-Anlage (incl. Steuerung) am Standort in Eschborn wurde ein kompletter elektrischer und mechanischer Funktionstest mit Klarwasser durchgeführt. Anschließend wurde die Anlage mit Belebtschlamm angeimpft und die komplette Brauwasseranlage in Betrieb genommen (Abbildung 32). Während der Inbetriebnahme wurden die Projektpartner an der Anlagentechnik geschult, und gemeinsam wurden alle notwendigen Parameter erläutert, eingestellt und für die Einfahrphase angepasst.



**Abbildung 32: Brauwasser-MBR (von links: Membranbioreaktor, Schaltschrank und Brauwasservorreinigung).**

### 3.2.3.2 Anlagenoptimierungen

Im Rahmen des Projekts erfolgten unterschiedliche Optimierungen der Anlagentechnik, um einen optimalen und störungsfreien Betrieb gewährleisten zu können. Der konstruktive und verfahrenstechnische Optimierungsbedarf wurde im Testbetrieb unter Praxisbedingungen ermittelt. Alle Änderungen führten letztendlich zu einer Verbesserung des Anlagenbetriebs.

#### Urinbehandlung → Verbesserung des Austrag an Störstoffen

Das gesamte Urinleitungsnetz des Eschborner GIZ-Hauptgebäudes ist durch Nistfliegen besiedelt. In die Urinzulaufleitung ist vor dem Einlauf in den Reaktor ein Schrägsitzschmutzfang

integriert, welcher im Urin enthaltene größere Partikel im Reaktorzulauf abscheiden soll. Bei Auftreten einer großen Anzahl von Nistfliegenpuppen in Kombination mit Urinablagerungen verstopfte das Maschensieb vollständig, wodurch der Urinzulauf verhindert war. In Abstimmung mit THM und der GIZ wurde die Zulaufleitung modifiziert. Es erfolgte der Einbau eines zusätzlichen größeren Schmutzfangs (siehe Kapitel 3.3.3.7) sowie eines durchsichtigen Rohres für die optische Kontrolle der Ablagerungen (bauseitige Leistung der GIZ) im Zulauf. Durch Reinigung des neuen Schmutzfangs in regelmäßigen Zeitabständen konnten Verstopfungen verhindert werden.

#### Braunwasserbehandlung → Optimierung der mechanischen Vorreinigung

Nach einem zweiwöchigen Testbetrieb der Anlagentechnik zur Braunwasserbehandlung in Eschborn erfolgte die Anpassung der mechanischen Vorreinigung. Um einen optimalen Betrieb der kleinen Siebschnecke gewährleisten zu können, wurde die Schneckenwendel um eine Wendel erweitert, so dass die Feststoffe direkt in den Ablauf fallen und sich nicht kurz davor anhäufen können. Dadurch wurde ein optimaler Feststoffaustrag erzielt und das Verstopfungsrisiko auf einem Minimum reduziert. Im Zuge dieser Optimierung wurde der nach oben offene Siebkorb durch zwei Bleche abgedeckt. Dadurch kann der organische Aufwuchs verhindert werden.

#### Braunwasserbehandlung → Veränderung der Beschickungsleitung und automatischer Sedimentabzug

Eine weitere Optimierung stellte die Veränderung der Beschickungsleitung vom Vorlagebehälter in den MBR-Behälter dar. Die Beschickung des MBR-Behälters erfolgte ursprünglich vom Behälterboden der Vorlage. Aufgrund von starken Ablagerungen feiner Sedimente (v.a. im Eintrittsbereich (Stutzen) der Beschickungsleitung) wurde die Beschickungsleitung seitlich an den Vorlagebehälter auf mittlerer Höhe verlegt, um einen stark erhöhten Schmutzeintrag in den MBR, vor allem bei jedem Beschickungsstart, zu verhindern.

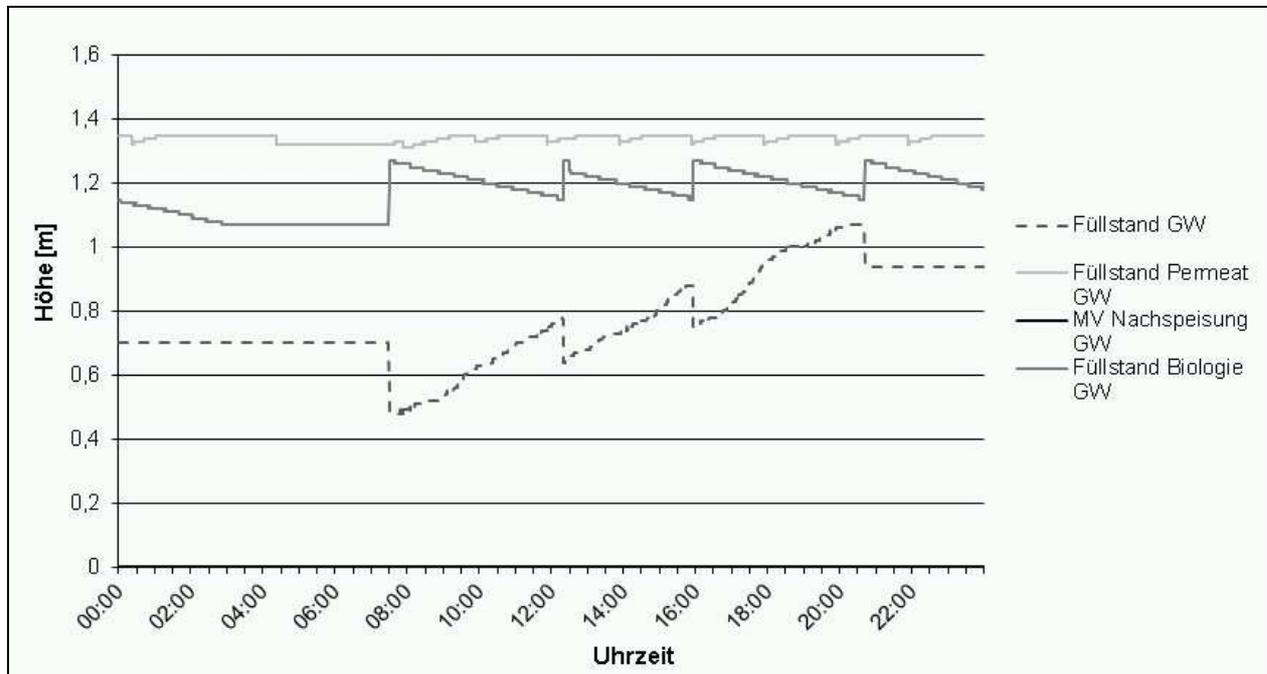
Für die Entfernung der Sedimente am Boden des Vorlagebehälters wurde ein automatischer Sedimentabzug installiert. Hierfür wurde ein zeitlich gesteuerter Kugelhahn eingebaut, welcher durch kurzzeitiges Öffnen ( $1 \times d^{-1}$ ) den Austrag der abgelagerten Sedimente (v.a. im Stutzen) gewährleistet.

#### Grau- und Braunwasserbehandlung → Automatischer Überschussschlammabzug

In Abstimmung mit der THM konnte ein automatisierter Überschussschlammabzug (ÜSS-Abzug) von den MBR-Behältern umgesetzt werden. Die Steuerung der ÜSS-Pumpe erfolgt über die jeweilige Steuerungseinheit. Die Laufzeit der Pumpe und somit die Entnahmemenge des Belebtschlammes wurde auf der Basis von bekannten Betriebsdaten (z.B. Zunahme Trockensubstanz- (TS) Gehalt) eingestellt. Zur Verhinderung eines Nachlaufens des Belebtschlammes nach Abschluss des Pumpvorgangs erfolgte ein Umbau der Entleerungsleitungen.

### 3.2.3.3 Betrieb

Ziel war es einen stabilen Betrieb der Anlagen zu gewährleisten. Alle Anlagen werden vor Ort durch die Projektpartner THM und GIZ betreut. Zusätzlich können die Daten der Prozessabläufe via Datenfernübertragung von HUBER sowie der THM und GIZ abgefragt werden (siehe auch Abbildung 33).



**Abbildung 33: Höhenstände der Grauwasserbehandlungsanlage der HUBER SE; Abfrage der Daten vom 23.05.2012. GW = Grauwasser.**

Störmeldungen der Anlagen werden per SMS dem Anlagenhersteller und Betreiber (THM/GIZ) automatisch gesendet. Während der Einfuhrphase der jeweiligen Anlagen (~ drei Monate) erfolgte eine zusätzliche Dokumentation mit einhergehender Auswertung durch HUBER. Dadurch konnte, in enger Abstimmung mit den Projektpartnern, ein optimaler, den unterschiedlichen Anforderungen angepasster Anlagenbetrieb sichergestellt werden. Im Verlauf der Untersuchungen am Standort Eschborn (durch die THM, siehe auch Kapitel 3.3.3) konnten sowohl die Funktionalität der Anlagen im vollautomatischen Betrieb, als auch die Reinigungsleistung der Anlagen bestätigt werden.

Auch die Raumentlüftung funktionierte gut. Da sich der Behandlungsraum direkt neben den Aufzugsschächten befand, bestand die Befürchtung, dass sich ggf. entstehende Gerüche sehr schnell im ganzen Gebäude verbreiten, sollten sie den Raum verlassen. Dies ist nicht aufgetreten. Mit der installierten Raumentlüftung konnte die Geruchsentwicklung jederzeit neutralisiert werden. Da der Austausch des Luftvolumens deutlich über dem durch HUBER SE empfohlenen lag, war dies auch nicht anders zu erwarten.

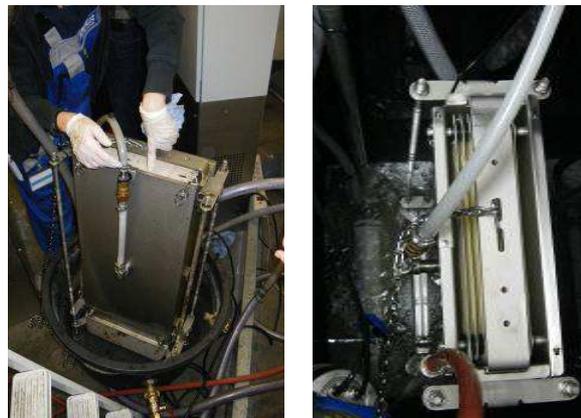
### 3.2.3.4 Wartung

Alle Anlagen wurden im Zuge von halbjährlichen Intervallwartungen am Standort Eschborn durch einen HUBER Servicetechniker komplett gewartet und überholt. Die Arbeiten beinhalteten u.a. die Überprüfung aller Aggregate auf Funktionalität, allgemeine Wartungsarbeiten, Prüfung und Nachjustierung von Einstellungen, Messung und Protokollierung der Stromaufnahme (Abbildung 34) mit SOLL/IST-Vergleich aller Aggregate sowie Unterstützung des Betreibers vor Ort.



**Abbildung 34: Links: Messung der Stromaufnahme am Schaltschrank der Urinbehandlung; Rechts: Wartungsarbeiten am Fällungsreaktor.**

Zusätzlich wurden sämtliche Ersatzteile sowie hilfreichere, externe Anlagenkomponenten für die Reinigung der Ultrafiltrationsmembranen bereitgestellt. Im Rahmen eines gemeinsamen praktischen Trainings wurde während einer Intervallwartung eine chemische Reinigung des Membranmoduls der Grauwasseranlage (Abbildung 35) in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern (THM/ GIZ) durchgeführt. Somit konnte auch der wichtige Aspekt des Capacity Buildings und den damit verbundenen Erfahrungs- und Know-how-Austausch innerhalb des Projekts zum wiederholten Male umgesetzt werden.



**Abbildung 35: Links: Ausgebautes Membranmodul mit leichten Verschmutzungen; Rechts: Gereinigtes Membranmodul wieder eingebaut im MBR-Behälter.**

### 3.2.3.5 Rückbau

Zum Projektende wurden Ende November 2012 die Versuchs- und Demonstrationsanlagen des SANIRESCH-Projekts durch die Firma HUBER komplett rückgebaut. Hierbei handelt es sich um folgende Anlagenteile:

- Urinbehandlung: MAP-Fällungsreaktor
- Grauwasserbehandlung: Vorlage-, MBR- und Speicherbehälter mit Steuerungseinheit
- Braunwasserbehandlung: Vorlagebehälter mit integrierter Vorreinigung und MBR-Behälter mit Steuerungseinheit

Die Entlüftungsleitungen von den Behältern bis zur Entlüftungseinheit/Absaugvorrichtung wurden entfernt. Der Rückbau sah ebenfalls die Entfernung der Permeat- und Spülleitungen sowie aller Zu-, Ab- und Überlaufleitungen ab den Raumeintritt/Behälteraustritt bis zur Druckerhöhungsanlage vor. Nicht vom Rückbau betroffen sind von der GIZ installierte Vorrichtungen und Leitungen wie z.B. Leitung Trinkwassernachspeisung, Sprinklervorrichtungen mit Leitungen, Druckerhöhungsanlage mit dazugehörigem Leitungsnetz, Absaugvorrichtung, etc. Der MAP-Fällungsreaktor wird nach Projektende zu Forschungszwecken von der RWTH Aachen weiter genutzt. Die Anlage zur Grauwasserbehandlung steht für didaktische Zwecke am Campus der Hochschule Amber zur Verfügung. Die Anlagenkomponenten zur Braunwasserbehandlung sollen bei Bedarf für offene Fragestellungen bei HUBER eingesetzt werden.

### 3.2.4 Fazit

Besondere Herausforderungen im Rahmen des Projekts für die Umsetzung der von HUBER SE verantworteten Aufgaben waren die Integration der Anlagentechnik zur Behandlung der einzelnen Abwasserströme in die bestehende Gebäudestruktur der GIZ sowie die Betriebsüberwachung der dezentralen Anlagen aus der Ferne.

Für die Installation der gesamten Anlagentechnik zur Behandlung der einzelnen Abwasserströme stand ein Kellerraum mit einer kleinen Grundfläche (21 m<sup>2</sup>, Abbildung 15) im Untergeschoss von Haus 1 der GIZ zur Verfügung. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse war die Integration der Behandlungsanlagen samt dazugehörigen Leitungen in die bestehende Gebäudestruktur eine besondere Herausforderung. Bei der Planung wurde daher darauf geachtet, dass die Zugänglichkeit zur Anlage für Wartungsarbeiten, Beprobungen sowie Besichtigungen jederzeit gewährleistet ist. Alle Anlagenkomponenten wurden darüber hinaus gekapselt ausgeführt, um unerwünschte Geruchsbelästigungen während des Betriebs zu vermeiden. Die Installationsarbeiten im Untergeschoss des Gebäudes erfolgten unter Berücksichtigung aller relevanten technischen DIN-Normen. So wurden bspw. die Leitungen entsprechend ihres Mediums gemäß DIN 2403 sorgfältig gekennzeichnet und die Speicherbehälter lichtundurchlässig ausgeführt, um das Risiko einer Verkeimung auf ein Minimum zu reduzieren. Zum Einsatz kamen bevorzugt modulare Anlagenkomponenten, welche hinsichtlich ihrer Größe und Ausführung an die besonderen Randbedingungen im Kellerraum des Bürogebäudes angepasst wurden.

Im Rahmen dieses Projekts war die Technische Hochschule Mittelhessen (THM) für den Betrieb der gesamten Anlagentechnik im Haus 1 der GIZ zuständig. Um eine Überwachung des automatisierten Anlagenbetriebs aus der Ferne zu ermöglichen, wurden die Steuerungen aller Behandlungsanlagen mit einer Datenfernübertragung samt Störmeldung per SMS ausgestattet. Mit dieser Übertragungstechnik war es möglich, auf die Betriebsdaten der dezentralen Anlagen von einer externen Betriebswarte aus zuzugreifen und die Betriebszustände auszuwerten. Unerwünschte Stillstandzeiten der Anlagentechnik sowie aufwändige Serviceeinsätze konnten somit auf ein Minimum reduziert werden. Durch online-Übertragung wichtiger Parameter wie Höhenstände (Abbildung 33), Betriebsdruck oder Durchfluss ließ sich der Betrieb bspw. der Grauwasserbehandlungsanlage kontinuierlich überprüfen. Die Datenauswertung in regelmäßigen Abständen ermöglichte eine gezielte Kontrolle der Betriebsweise und ließ es zu, dass gewisse Trends, wie z.B. eine unerwünschte Zunahme des Transmembrandrucks frühzeitig erkannt werden konnten.

Mit der Installation der Anlagen zur Behandlung der einzelnen Abwasserströme im Haus 1 der GIZ hat HUBER zur Implementierung von NASS in bestehenden Gebäuden erfolgreich beigetragen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde letztendlich die Voraussetzung für die Schließung kleinräumiger Wasser- und Stoffkreisläufe in urbanen Gebieten am Beispiel eines Bürogebäudes geschaffen. Das Demonstrationsvorhaben kann für zukünftige Anwendungen in sogenannten „Green Buildings“ als Maßstab gelten. Durch Nachweis eines nachhaltigen Umgangs mit der Wasserressource lassen sich Umweltzertifikate im Bereich der „Green Buildings“ erwerben, welche den Wert einer Immobilie steigern. Das Interesse von Banken, Investoren und Nutzern für besonders wassereffiziente Gebäude wächst weltweit, insbesondere in wasserarmen Regionen wie z.B. in den Vereinigten Arabischen Emiraten. Dies konnte auch nochmals in der Analyse der internationalen Übertragbarkeit belegt werden. Neben einer konsequenten Nachhaltigkeit lassen sich mit zertifizierten Immobilien auch Vorteile wie ein verbessertes Image sowie niedrige Betriebskosten, siehe hierzu auch die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse, erzielen.

### 3.3 Betrieb und Überwachung (Verantwortlich: TH Mittelhessen)

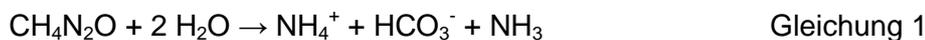
#### 3.3.1 Ziele der Projektkomponente

Diese Projektkomponente war mit dem Betrieb und der Überwachung, sowie der Optimierung der drei Anlagen betraut. Hierzu gehörten die Überwachung mittels Fernwirktechnik, die Beseitigung von Störungen, regelmäßige Kontrollen, sowie die Wartung der Anlagen. Weiterhin wurden abwassertechnische Basisparameter des Urins, Braun- und Grauwassers analysiert, Verbrauchsmaterial nachgefüllt und gewonnene Daten ausgewertet. Die Optimierung beinhaltete die verfahrenstechnische Verbesserung der Anlagen, sowie die Einstellung der darin stattfindenden chemischen Abläufe und der damit verbundenen Grundparameter und Verfahrensabläufe. Hierzu wurden teilweise Laborversuche durchgeführt und diese im Anschluss auf den großtechnischen Maßstab der Anlagen übertragen.

#### 3.3.2 Material und Methoden

##### 3.3.2.1 Verfahrenstechnische Beschreibung des MAP-Fällungsprozesses

Der durch wasserlose Urinale und Trenntoiletten gesammelte Urin wird zunächst in einem von vier Sammel tanks, mit einem jeweiligen Fassungsvermögen von 2 m<sup>3</sup> gespeichert. Durch die Hydrolyse des im Urin enthaltenen Harnstoffs (Gleichung 1) steigen der pH-Wert (≥ pH 9) und die Ammoniumkonzentration an.



In der von HUBER SE entwickelten Fällungsanlage (siehe auch Kapitel 3.2) können pro Fällungszyklus bis zu 50 l Urin behandelt werden. Als Fällmittel wird das kostengünstige technische Magnesiumoxid (Honeywell GmbH) mit einem Stöchiometriefaktor  $\beta$  von 1,5 (siehe auch Kapitel 3.3.3.1.1) eingesetzt. Nach der Zugabe des Magnesiumoxids über eine Dosiereinheit, folgt eine Rührphase mit alternierenden Rühr- und Pausenintervallen von jeweils 30 s über drei Minuten. Die Dosierung des Magnesiumoxids bedingt folgende Fällungsreaktion (Gleichung 2):



Die anschließende Sedimentation dauert 90 min. Das gebildete MAP wird im Konus des trichterförmigen Fällungsraumes gesammelt. Der behandelte Urin wird nach Ablauf der Sedimentationszeit in Polypropylen-Filter (Schwegmann Filtrations-Technik GmbH), mit einer Porenweite von 10 µm, abgeleitet (Abbildung 36).

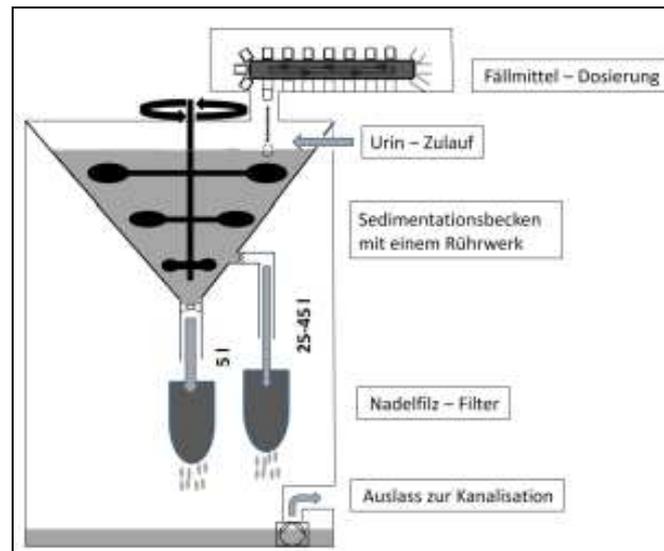


Abbildung 36: Schematische Darstellung des MAP-Fällungsreaktors.

Für Versuchszwecke wurde neben dem technischen auch analytisches Magnesiumoxid (Merck KGaA eingesetzt. Einer ausgiebigen Nutzung stand jedoch der weitaus größere Kostenfaktor entgegen (siehe auch Kapitel 3.3.3.2).

### 3.3.2.2 Betriebsweise der Membranbioreaktoren

Die MBR (für Details zu den Anlagen siehe Kapitel 3.2) wurden i.d.R. mit einer gleichbleibend niedrigen Schlammbelastung (BTS) von  $0,1 \text{ kg CSB kg}^{-1} \text{ TS}^{-1} \text{ d}^{-1}$  betrieben. Hierzu wurde auf Grundlage der gemessenen CSB-Konzentration ( $\text{CSB}_{\text{ZULAUF}}$ ) im Zulauf und der Biomassekonzentration im Belebungsbecken ( $\text{TS}_{\text{BB}}$ ), das resultierende Permeatvolumen ( $V_{\text{PERMEAT}}$ ) berechnet und eingestellt (siehe Gleichung 3,  $V_{\text{BB}}$  = Volumen des Belebungsbeckens).

$$V_{\text{PERMEAT}} = \frac{\text{BTS} \cdot \text{TS}_{\text{BB}} \cdot V_{\text{BE}}}{\text{CSB}_{\text{ZULAUF}}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Ziel war ein störungsfreier, stabiler Betrieb trotz stark schwankender Zuläufe (siehe hierzu Kapitel 3.3.3.8). Dies war insbesondere in der Einfahrphase von Bedeutung, damit die Mikroorganismen sich an die Abwasserzusammensetzung anpassen konnten.

Üblicherweise werden Membranbelebungsreaktoren mit Biomassekonzentrationen (TS-Gehalten) von ca.  $12 \text{ g l}^{-1}$  betrieben (Pinnekamp 2006; Melin 2007). Aus Gründen der Betriebsstabilität wurden in Abstimmung mit HUBER SE beide MBR mit einem konstanten TS-Gehalt von  $4 \text{ g l}^{-1}$  (Grauwasser) und  $8 \text{ g l}^{-1}$  (Braunwasser) betrieben.

### 3.3.2.3 Analysenverfahren

Die Analysen der abwassertechnisch relevanten Parameter des Grau- und Braunwassers, sowie des Urins erfolgten mittels Küvettentests der Firma Hach Lange. Die verwendeten

Küvettenarten sind in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgelistet. Die Bestimmung des Kaliums im Urin wurde mittels Ionenchromatographen bestimmt.

**Tabelle 3: Auflistung der zur Analyse verwendeten Küvettentests von Hach Lange.**

Parameter	Braunwasser		Grauwasser		Urin
	Zulauf	Permeat	Zulauf	Permeat	
CSB	LCK 514	LCK 414	LCK 514	LCK 414	
TN <sub>b</sub>	LCK 338		LCK 238		
NH <sub>4</sub> -N	LCK 303	LCK 304	LCK 303	LCK 304	LCK 304
NO <sub>2</sub> -N	LCK 341				
NO <sub>3</sub> -N	LCK 339	LCK 340	LCK 339	LCK 340	
P <sub>ges</sub> /PO <sub>4</sub> -P	LCK 350				LCK 350

Die Messbereiche der Küvettentests sind nachfolgend aufgelistet:

- LCK 514: 100-2000 mg CSB l<sup>-1</sup>
- LCK 414: 5-60 mg CSB l<sup>-1</sup>
- LCK 338: 20-100 mg TN<sub>b</sub> l<sup>-1</sup>
- LCK 238: 5-40 mg TN<sub>b</sub> l<sup>-1</sup>
- LCK 303: 2,5-60 mg NH<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>
- LCK 304: 0,02-2,5 mg NH<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>
- LCK 341: 0,05-2 mg NO<sub>2</sub> l<sup>-1</sup>
- LCK 339: 1-60 mg NO<sub>3</sub> l<sup>-1</sup>
- LCK 340: 22-155 mg NO<sub>3</sub> l<sup>-1</sup>
- LCK 350: 6-60 mg PO<sub>4</sub> l<sup>-1</sup>

Die Probenahme erfolgte beim Urin direkt am Tank, immer bei vollem Tank bevor dieser zur MAP-Produktion genutzt wurde. Im Falle des Braunwassers wurde anfangs zweimal die Woche, später alle 2 Wochen einmal eine Probe genommen. Es handelt sich dabei um Stichproben. Ort der Probenahmen war die Vorreinigung und die Permeatleitung. Im Grauwasser wurde genauso beprobt, jedoch wurden hier die Stichprobe des unbehandelten Abwassers der Vorlage entnommen.

### 3.3.3 Ergebnisse und Diskussionen

#### 3.3.3.1 Grundlegende Verfahrensparameter der MAP-Fällung

##### 3.3.3.1.1 Stöchiometriefaktor $\beta$

Ein wichtiger Einflussfaktor bei der Fällung ist die Übersättigung der Lösung mit dem Fällmittel MgO (Stöchiometriefaktor  $\beta$ , auch  $\beta$ -Faktor genannt). Magnesium-Ammonium-Phosphat ist ein äquimolares Gemisch aus Magnesium, Ammonium und Phosphat. Demnach wäre ein Faktor von 1,0 für die Fällung ausreichend. Um das Reaktionsgleichgewicht in Richtung des Fällungsproduktes MAP zu verschieben, muss das Fällmittel MgO jedoch im Überschuss zugegeben werden. Der Stöchiometriefaktor orientiert sich an der Konzentration des in der

Matrix gelösten limitierenden Bindungspartners. In diesem Fall bezieht sich die Berechnung auf die Konzentration des Phosphats, da die Ammoniumkonzentration deutlich höher ist.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb muss die Überdosierung so gering wie möglich gewählt werden. Aus Abbildung 37 wird deutlich, dass ab einem  $\beta$ -Faktor von 1,5 kaum eine weitere Steigerung der Ausfällung möglich ist. Deshalb wurde für den Betrieb der Anlage ein  $\beta$ -Faktor von 1,5 gewählt.

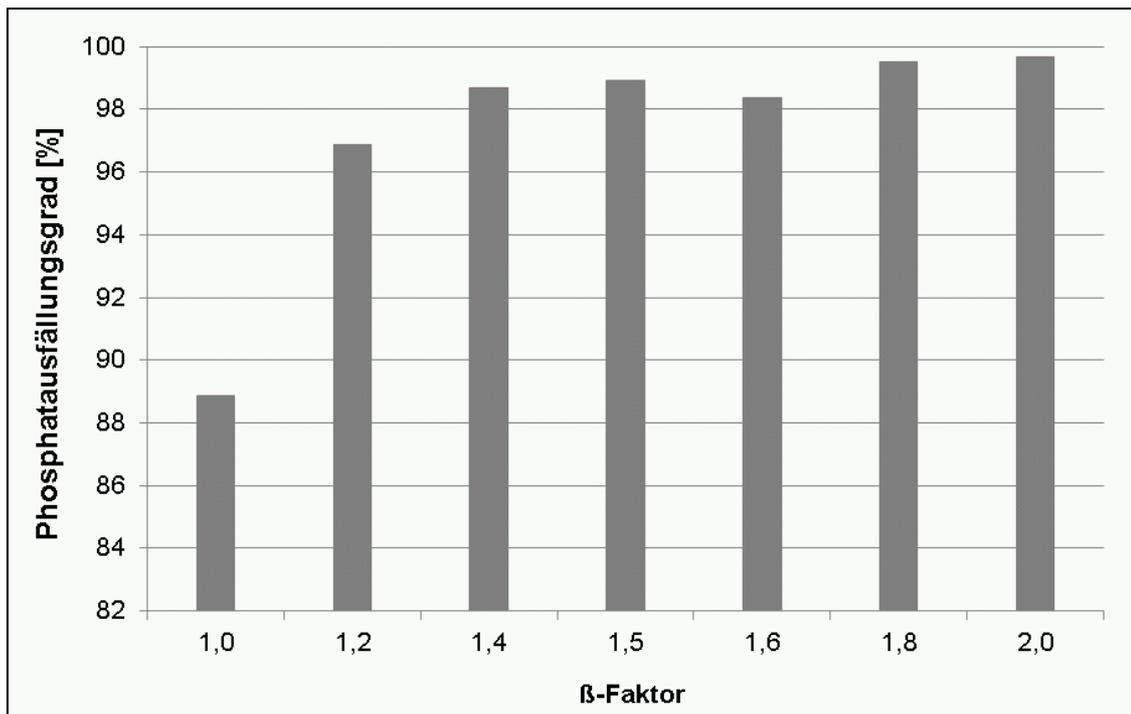


Abbildung 37: Darstellung des Phosphatausfällungsgrads in Abhängigkeit vom  $\beta$ -Faktor.

### 3.3.3.1.2 Sedimentationszeit

Die Sedimentationszeit wurde zunächst im Labor untersucht. Hierzu wurden in regelmäßigen Intervallen nach Beginn der Reaktion Proben entnommen und auf ihren Phosphat- und Magnesiumgehalt analysiert. Diese Versuche wurden anschließend auf den Reaktor übertragen, um die erhaltenen Erkenntnisse zu verifizieren. Die Versuche haben gezeigt, dass der Hauptanteil der Fällungsreaktion innerhalb der ersten 30 bis 90 min nach dem Rühren stattfindet (Abbildung 38). Da nach 90 min Sedimentation nur noch geringfügige Veränderungen festgestellt werden konnten, war es möglich die ursprünglich zu Betriebsbeginn festgelegte Sedimentationszeit von 180 min auf 90 min zu reduzieren. Dies ermöglichte die Anlage mit annähernd dem doppelten volumenbezogenen Durchsatz zu betreiben.

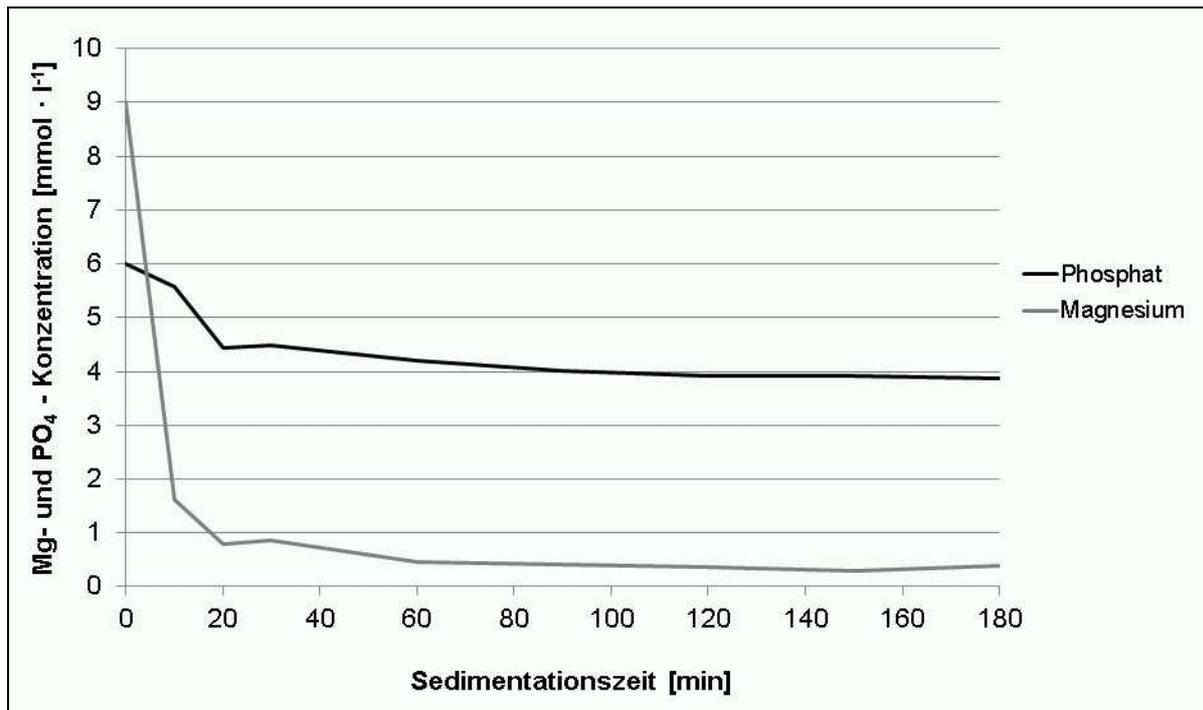


Abbildung 38: Phosphat- und Magnesiumkonzentration in Abhängigkeit der Sedimentationszeit.

### 3.3.3.2 Kalkulation des Urinverbrauchs und der möglichen MAP-Menge bei Auslastung der MAP-Fällungsanlage

Im Zeitraum vom 19.5.2011 bis zum 19.10.2012 wurden die täglich anfallenden Urinmengen über Messsonden gemessen und durch die Fernüberwachung übermittelt. Pro Werktag wurden durchschnittlich 170 l Urin gesammelt (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Durchschnittlicher Urinanfall pro Werktag durch alle eingebauten NoMix-Toiletten und 23 wasserlose Urinale.

Zeitraum	Einheit	19.05.2011 bis 30.07.2012	31.07.2012 bis 19.10.2012
Betriebene NoMix-Toiletten	Anzahl	37	33
Durchschnittlicher Urinanfall	l d <sup>-1</sup>	171	170
Standard-abweichung	l d <sup>-1</sup>	29	43

Die Laufzeit einer Charge, bestehend aus 20 Behandlungszyklen an der MAP-Fällungsanlage, beträgt 45 Stunden. Pro Behandlungszyklus werden, je nach Phosphorgehalt im Zulauf, 30 bis 40 l Urin behandelt, dies entspricht 50 bis 67 Zyklen pro Urintank. Bei kontinuierlichem Betrieb des Fällungsreaktors ist es möglich einen Urintank, mit einem Fassungsvermögen von 2000 l, pro Woche abzuarbeiten. Da 12 Werktage benötigt werden, um einen Urintank zu befüllen, war es bei den gegebenen Umständen nicht möglich, den Fällungsreaktor im Dauerbetrieb zu betreiben.

Die MAP-Produktion pro Woche bzw. Urintank würde bei der erzielten Phosphor-Ausfällungsrate von 65% bei technischem MgO zwischen 1,4 und 2,6 kg liegen (bei 0,7 bis 1,3 g MAP pro behandeltem Liter Urin und einem Urintankvolumen von 2000 l). Theoretisch möglich wären, bei einem nahezu vollständigen Rückgewinn, Mengen von 2,8 und 3,4 kg.

### 3.3.3.3 Bilanzierung des Fällungsverfahrens

Die Bilanzierung eines Speichertanks (2000 l) mit den zuvor genannten Parametern zeigt, dass 97% des gelösten Phosphats durch die MAP-Fällung mit analytischem MgO gewonnen werden können (Abbildung 39) (Röhrich et al., 2012). Verwendet man hingegen kostengünstiges, technisches MgO reduziert sich die Ausbeute auf ca. 65%. Für den regulären Betrieb des Fällungsreaktors wurde aus Kostengründen technisches Magnesiumoxid verwendet.

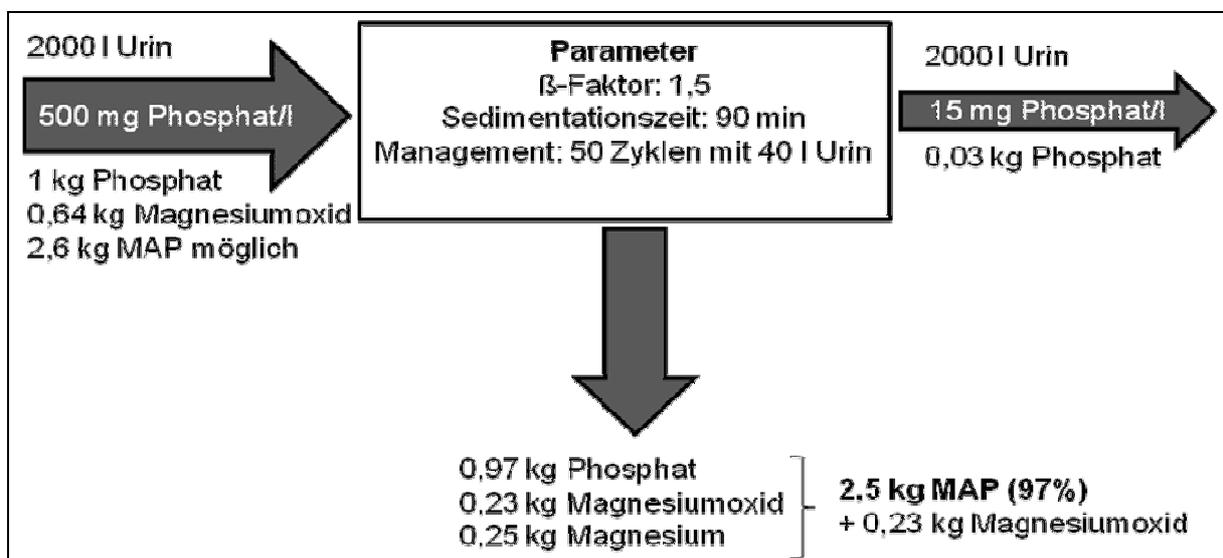


Abbildung 39: MAP-Bilanz eines Speichertanks (2000 l) bei Fällung mit analytischem MgO (Röhrich et al., 2012).

Pro Kilogramm analytisches Magnesiumoxid fallen Kosten von 600 € an, wohingegen ein Kilogramm technisches Magnesiumoxid nur 20 € kostet (Th. Geyer, 2012). In der Literatur werden Fällungsraten von über 90% mit Magnesiumoxid als Fällmittel und Urin als Phosphatquelle angegeben. Antonini et al. (2009) erzielte, mit einem Stöchiometrieffaktor von 1,5 eine Rückgewinnungsrate von 98%. Abegglen (2008) erreichte eine Phosphatausfällung von mehr als 95% durch die Zugabe von Magnesiumoxid mit einem Stöchiometrieffaktor von 1,8 (Etter et al., 2011). Pro behandeltem Liter Urin konnten im vorliegenden Projekt mit technischem Magnesiumoxid als Fällungsmittel, abhängig von der Phosphorkonzentration im Urin, 0,7 bis 1,3 g MAP gewonnen werden. Durch die Verwendung des analytischen MgO wären Erträge von 1,4 bis 1,7 g MAP l<sup>-1</sup> Urin möglich gewesen.

### 3.3.3.4 Zusammensetzung der beiden Düngeprodukte: Urin und MAP

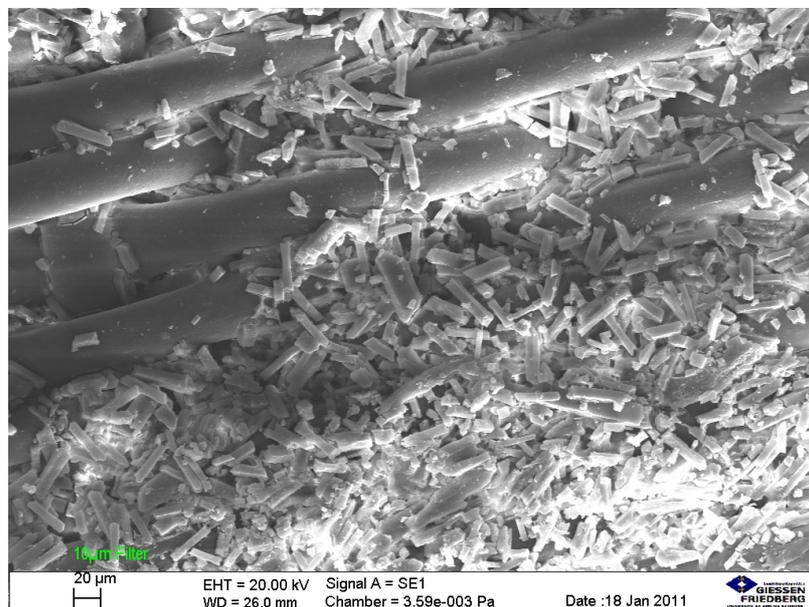
Der in dem Bürogebäude gesammelte Urin wies durchschnittlich eine Phosphorkonzentration von 187 mg l<sup>-1</sup> auf (minimal 108 mg P l<sup>-1</sup>, maximal 253 mg P l<sup>-1</sup>), eine Ammoniumkonzentration von 3034 mg l<sup>-1</sup> und eine Kaliumkonzentration von 1393 mg l<sup>-1</sup>. Das gebildete MAP weist

im gewaschenen Zustand eine molare P : N : Mg-Zusammensetzung von 1 : 1 : 1 auf (Analysen von RWTH Aachen, siehe auch Kapitel 3.4.3.2). Im ungewaschenen Zustand ist, durch die Überdosierung, ca. 30% mehr Magnesium nachweisbar. Abbildung 39 zeigt das gewonnene MAP nach der Entfernung aus einem Filtersack.



**Abbildung 40:** MAP direkt nach der Entfernung aus einem Filtersack abgefüllt in Flaschen.

Durch Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) konnten die MAP-Kristalle deutlich bildlich dargestellt werden (siehe Abbildung 41).



**Abbildung 41:** Rasterelektronenmikroskopaufnahme des MAP mit typischen Kristallformen.

Im Zuge der REM-Aufnahmen konnte gleichzeitig eine Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) des MAP durchgeführt werden (siehe Abbildung 42). Die EDX-Analyse ermöglicht eine Übersicht der atomaren Verhältnisse der in der Probe enthaltenen Elemente (siehe Tabelle 5). Allerdings konnte das Element Stickstoff mit diesem Verfahren, wegen einer Störung des Gerätes, nicht detektiert werden.

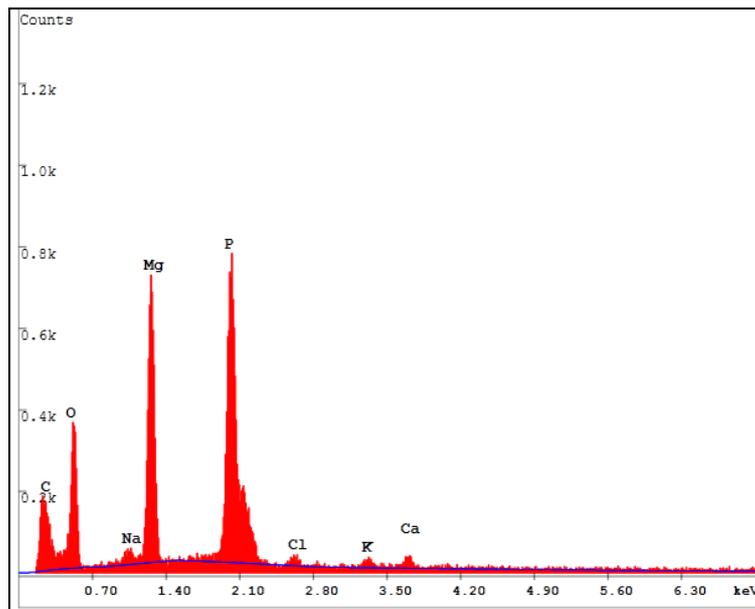


Abbildung 42: Energiedispersive Röntgenanalyse des MAP.

Tabelle 5: Messwerte der energiedispersiven Röntgenanalyse.

Messwertgruppen	Element	Atomare Prozente
Diagramm in Abbildung 42	Mg	7,29
	P	6,15
Durchschnittswert aller durchgeführten Analysen	Mg	6,8
	P	6,1

Die Ergebnisse zeigen, dass durchschnittlich ca. 10% mehr Magnesium im ungewaschenen MAP enthalten ist als stöchiometrisch erwartet. Diese Messungen decken sich weitestgehend mit den durch die RWTH Aachen mittels induktiver gekoppelter Plasma-Atom-Emissionssepektrometrie (DIN EN ISO 11885) gewonnenen Analyseenergebnissen des MAP (siehe hierzu auch Kapitel 3.4.3.2). Die Abweichungen der prozentualen Magnesiumüberdosierung der EDX-Analyse und der Ergebnisse der RWTH-Aachen, sind darauf zurückzuführen, dass für die Analyse mittels EDX nur eine sehr kleine Teilprobe entnommen wurde.

### 3.3.3.5 Betrieb der MAP-Fällungsanlage

Der MAP-Fällungsreaktor bedurfte intensiver Betriebs- und Wartungsarbeit. Eine Charge besteht aus 20 Produktions-Zyklen, mit bis zu 50 Liter Urin. Für eine Charge waren folgende Arbeiten nötig:

- **Austausch der Filterbeutel:**  
Die in den vorangegangenen Fällungsreaktionen zur Abscheidung des abgesetzten MAP verwendeten Filterbeutel wurden aus dem Reaktor entnommen und in die Abtropftruhe gehängt. Die Filtersäcke aus der Abtropftruhe wurden zur Trocknung in einen auf 40°C temperierten Trockenschrank eingelegt. Die getrockneten Säcke wurden zur weiteren Behandlung bereitgestellt. Die neuen Filterbeutel wurden gewogen, beschriftet und anschließend in den Reaktor eingehängt. Der Arbeitsaufwand für diese Tätigkeit betrug pro Charge ca. 20 min. Eine vereinfachte Darstellung dieses Vorgangs ist in Abbildung 43 aufgezeigt.
- **Reinigung der getrockneten Filterbeutel:**  
Die aus dem Klimaschrank entnommenen Filterbeutel wurden gewogen, von dem getrockneten MAP befreit und anschließend entsorgt. Der Arbeitsaufwand pro Filtersack betrug ca. 30 min, somit konnte pro Charge mit 1,5 h kalkuliert werden. Das gewonnene MAP wurde anschließend für die Verwendung durch die Projektpartner bereitgestellt: Universität Bonn – Düngeversuche; ISA, RWTH Aachen – Analytik; GIZ – Öffentlichkeitsarbeit.
- **Reinigung des Siebkorb:**  
In der Urinzulaufleitung, zwischen Reaktor und Lagertanks, befand sich zur Abscheidung von eventuell im Urin enthaltenen Schmutzstoffen ein Siebkorb. Vor der Behandlung einer neuen Charge musste dieser, zur Kontrolle und zur Vermeidung von Störungen, entnommen und unter fließendem Wasser gereinigt werden (Arbeitsaufwand ca. 20 min pro Charge).
- **Magnesiumoxid-Beutel:**  
Als Fällmittel wurde pulverförmiges Magnesiumoxid (MgO) verwendet. Zur leichteren Dosierung wurden 14 g MgO in wasserlösliche Folienbeutel aus Polyvinylalkohol eingewogen. Aus dem als nächstes zu behandelnden Urinlagertank wurde eine Probe entnommen und der Phosphatgehalt des Urins bestimmt. Mittels einer stöchiometrischen Berechnung, dem Überschussfaktor  $\beta$  von 1,5 und den 14 g MgO wurde das benötigte Urinvolumen berechnet und am Fällungsreaktor eingestellt. Pro Lagertank wurden 60 dieser Beutel benötigt (Arbeitsaufwand der Herstellung der 60 Beutel betrug ca. 3 h). Pro Charge wurden 20 MgO-Beutel in die Dosiereinheit des Reaktors eingelegt (Arbeitsaufwand für die Neubestückung ca. 5 min).
- **Überprüfung der Antriebe und Bauteile am Reaktor:**  
Vor jeder Behandlung einer neuen Charge wurden folgende Bauteile und Antriebe des Fällungsreaktors auf ihre Funktionalität überprüft: der Zulaufschieber, der Füllstandsensord und das Füllstandrohr, der MgO-Dosierer, das Magnetventil und der Zwei-Wege Kugelhahn, der Rührer und die Ablaufpumpe. Hierdurch sollte eine frühzeitige Erkennung von Problemen und ein reibungsloser Betrieb ermöglicht werden (Arbeitsaufwand ca. 15 min pro Charge).

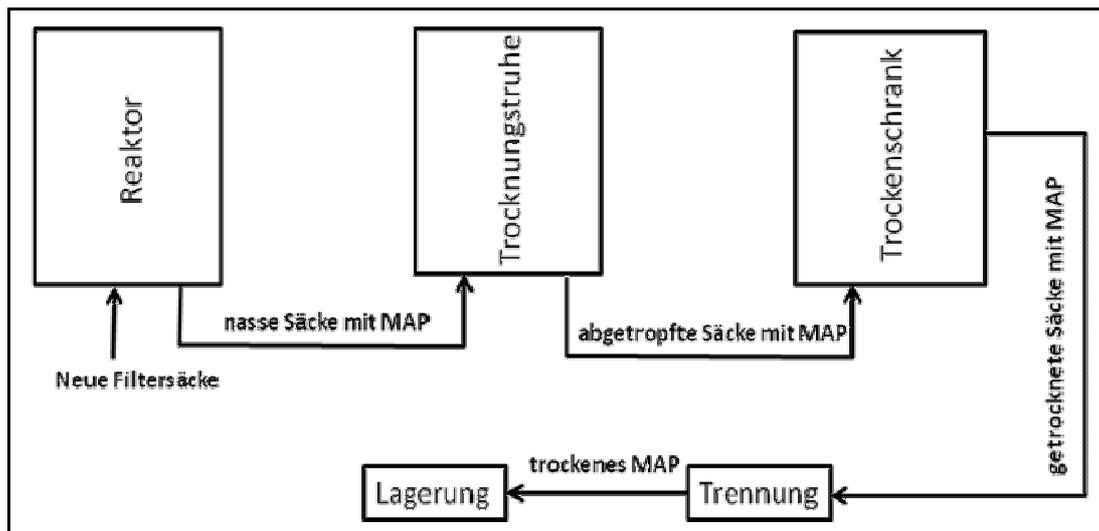


Abbildung 43: Darstellung des Austauschprozesses der Filtersäcke.

Zusätzlich standen einmal wöchentlich bei kontinuierlichem Reaktorbetrieb folgende Arbeiten an:

- Reinigung der Abtropftruhe:  
In der Auffangwanne der Abtropftruhe wurde der aus den Filtersäcken abgetropfte Urin gesammelt, dieser musste einmal pro Woche, teilweise auch zweimal, abgelassen werden. Um Geruchsprobleme zu vermeiden, wurde zusätzlich mit Wasser nachgespült (Arbeitsaufwand ca. 20 min).
- Reinigung des Arbeitsraumes:  
Im Hinblick auf die durch das behandelte Medium möglicherweise auftretenden Geruchsprobleme, das feinstaubige MAP, welches sich bei der Entleerung im ganzen Raum verteilt, die speziellen hygienischen Anforderungen durch den Umgang mit Abwasser in Innenräumen und aufgrund der vielen durch die GIZ durchgeführten Führungen, wurde der Arbeitsraum einmal in der Woche gereinigt (Arbeitsaufwand ca. 30 min).

Die Wartung des MAP-Fällungsreaktors beinhaltet ebenfalls, zur Vermeidung von Betriebsstörungen, die Beseitigung von Ablagerungen und Verkrustungen innerhalb des Reaktors. Hierbei wurden der Fällungsraum, der Zwei-Wege-Hahn, das Membranventil sowie die Filterkammer mit Zitronensäure gereinigt und anschließend mit Wasser nachgespült. Die Reinigung erfolgt, je nach Aufkommen von Ablagerungen, in verschiedenen Zeitintervallen, mindestens jedoch alle 3 Wochen. Der Zeitaufwand beträgt hierfür 3,5 h.

### 3.3.3.6 Fällversuche mit unterschiedlichen Filtertypen

#### 3.3.3.6.1 Vergleich verschiedener Filtermaterialien

Für die Abscheidung des gebildeten Magnesium-Ammonium-Phosphats wurden Polypropylen-Filtersäcke (Nadelfilz-Säcke) verwendet. Da diese nach einmaligem Gebrauch entsorgt werden müssen, wurde eine umweltfreundlichere und kostengünstigere Alternative gesucht. Neben den ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten wurde dabei auch die Arbeits erleichterung berücksichtigt. Polypropylen ist vom Filtrationsverhalten einem Raumfilter äh-

lich, d.h. dass sich im Material gewisse Anteile des Filterkuchens ablagern und dadurch bei der späteren Gewinnung verloren gehen. Die Reinigung des Filters und damit die Gewinnung des Struvits (dem Fällungsprodukt) sind relativ aufwendig. Der Filtersack muss aufgeschnitten und ausgekratzt werden. Dabei entstehen starke Staubemissionen vor denen sich das Personal mit Mund- und Augenschutz schützen muss. Für die gründliche Reinigung eines Filters sind ca. 30 min Arbeitszeit anzusetzen.

Als Alternative wurde das Material Polyamid, bekannter unter dem Namen Nylon, verwendet. Polyamid ist im Gegensatz zu Polypropylen ein Flächenfilter. Des Weiteren kann der Filter mehrfach wiederverwendet werden. Die Reinigung dieser Filterart ist ohne großen Aufwand möglich. Das Innere des Filters wird nach außen gestülpt und das abgeschiedene MAP kann mit einem Schaber abgestreift werden. Der Arbeitsaufwand für die Reinigung eines Filters beträgt ca. 10 min.

Zu Beginn verliefen die Versuche mit den Polyamidfiltern ohne Probleme. Das Filtrationsverhalten und das Rückhaltevermögen waren vergleichbar mit Polypropylenfiltern, welche bereits in früheren Versuchen zur MAP-Fällung von HUBER SE verwendet worden waren (HUBER SE, 2010). Nach einer gewissen Zeit staute sich der in die Filter eingeleitete Urin, unabhängig von der Verwendungsdauer der Filter (neu als auch gebraucht) jedoch auf und lief über. Das ursächliche Problem dieser Beobachtung konnte nicht gefunden werden. Wie nachstehend in Kapitel 3.3.3.6.2 beschrieben, wurden Untersuchungen zur Ursachenforschung durchgeführt.

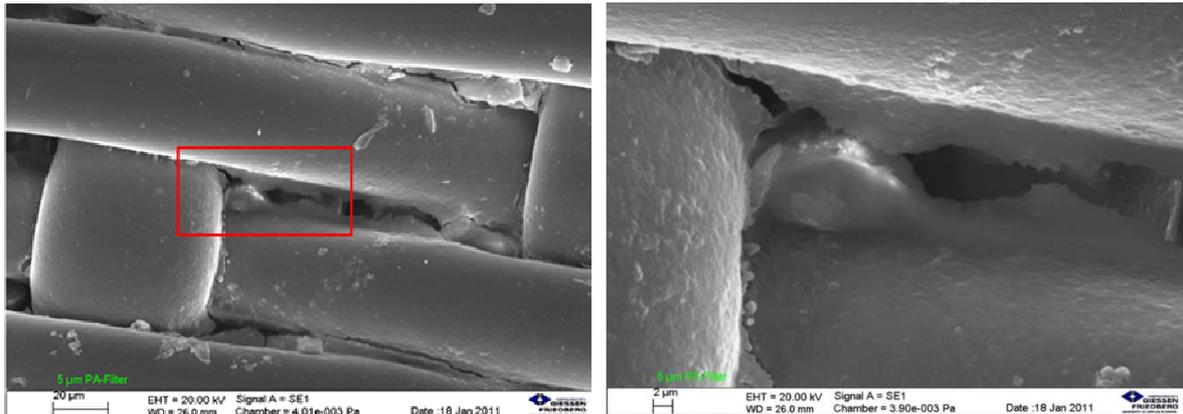


**Abbildung 44:** Links: Filtersack aus Polypropylen mit MAP belegt; Rechts: Filtersack aus Polyamid mit MAP belegt.

### 3.3.3.6.2 Versuche zur Ursachenfindung der aufgestauten Filtersäcke

Um der Ursache des Überlaufens der Nylonfiltersäcke auf die Spur zu kommen, wurden die überlaufenden Filtersäcke unter dem REM betrachtet, die Filtersäcke wurden mit unterschiedlichen Urinchargen befüllt sowie wurde nach Ablagerungen im Leitungssystem gesucht, die zu den Verblockungen geführt haben könnten.

Zur Ursachenfindung der überlaufenden Polyamid-Filtersäcke wurden Aufnahmen des Filtermaterials mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) gemacht. Dabei wurden Filtersäcke untersucht, die dieses Phänomen gezeigt haben. In Abbildung 49 ist links eine verklebte Pore zu sehen, rechts eine stärkere Vergrößerung des umrahmten Teilstücks. Diese Verklebungen deuten auf eine Blockade dieser Filterpore hin. Sie sind jedoch keinesfalls auf der gesamten Filterfläche auszumachen; nur ein geringer Prozentsatz weist diesen Zustand auf. Daher kann davon ausgegangen werden, dass dieser Verklebungen den Ablauf des gefällten Urins verlangsamt, nicht jedoch dass es sich dabei um die eigentliche Ursache handelt.



**Abbildung 45: REM-Aufnahmen eines 5 µm-Polyamid-Filtersacks mit Verklebungen der Poren, rechts in einer höheren Vergrößerung des roten Ausschnitts. Die Größenskala ist jeweils unten links im Bild angegeben.**

Zur Differenzierung der plötzlich auftretenden Problematik mit den Polyamid-Filtersäcken wurden Versuche am Fällungsreaktor mit Urin aus unterschiedlichen Tanks und Behandlungsphasen gemacht. Zum einen wurde unbehandelter Urin der zuvor ohne Fällung das System komplett durchfloss, durch neue Filtersäcke geleitet. Dies führte ebenfalls zu einem Überlaufen der Säcke. Als zweite Variante wurde Urin direkt aus den Lagertanks in einen Kanister gefüllt und direkt ohne Durchfluss des Systems durch die Säcke gefiltert. Dieser Urin passierte ohne auftretende Komplikationen das Material. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Urinleitungen zwischen den Lagertanks und dem Fällungsreaktor, der Reaktor oder Ablagerungen in beiden ursächlich für die auftretenden Probleme sind. Eine Vermutung war, dass sich in den Leitungen Fällungsprodukte bilden, welche das Filtrationsverhalten der Filtersäcke negativ beeinflussen.

Da die Urinleitungen für die Komplikationen mit den Polyamidsäcken verantwortlich sein könnten, wurde der Versuch unternommen durch Spülung der Leitungen mit Wasser und damit Ausschwemmung der mobilen Ablagerungen das Problem zu beheben. Ein gereinigter Urintank wurde mit Trinkwasser gefüllt und dieses durch die Urinleitungen zum Reaktor geschickt. Das Wasser wurde durch einen Polypropylen-Filtersack geleitet, um eventuell ausgeschwemmtes Material aufzufangen und später sichtbar zu machen. Nach mehreren hundert Litern Spülwasser wurden neue Polyamid-Säcke in den Reaktor eingehängt, um zu überprüfen, ob diese weiterhin überlaufen. Das in die Polyamid-Säcke eingeleitete Wasser (eingeleitet in den Reaktor über die nun gespülte Urinleitung) führte zu den gleichen Kompl-

kationen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass nicht der Urin ursächlich für das Anstauen der Filtersäcke ist, sondern die Ursache am Leitungssystem liegt. Eventuell finden in der Urinleitung chemische bzw. biologische Reaktionen statt, die ursächlich für die auftretenden Probleme sind.

### 3.3.3.7 Betriebsstörungen an der MAP-Fällungsanlage

Neben den erwähnten Problemen mit den überlaufenden Filtersäcken (Kapitel 3.3.3.6) sind als einzige Störungen durch im Lüftungssystem lebende Fliegen aufgetreten. Dabei handelt es sich um die Puppen von Larven, die zur Gruppe der Nistfliegen (*Milichiidae*) gehören. Höchstwahrscheinlich handelt es sich um die Gattung *Desmometopa* oder *Leptometa*. In die Zulaufleitung des Reaktors ist ein Schrägsitzschmutzfang zur Abscheidung von im Urin enthaltenen Fest- und Störstoffen integriert (siehe auch Abbildung 46). Die im Lüftungssystem lebenden Fliegen bedingten teilweise massive Störungen im Betrieb, indem die Fliegenpuppen das Sieb des Schmutzfangs zusetzen und dieses verstopfen.

Um den Reinigungs- und Wartungsaufwand des Siebes zu verringern, wurde ein Siebkorb mit einem größeren Fassungsvermögen (alter: 62 ml; neuer: 1000 ml) in die Zulaufleitung integriert (siehe Abbildung 46, rechts). Durch den zusätzlichen Filter konnten auch die in den Urintanks und -leitungen ausgefallenen Phosphatverbindungen verstärkt abgeschieden werden (siehe Abbildung 46, rechts). Eine Verwertung dieser Fällungsprodukte war allerdings durch die starke Verunreinigung mit Fliegenlarven nicht möglich.



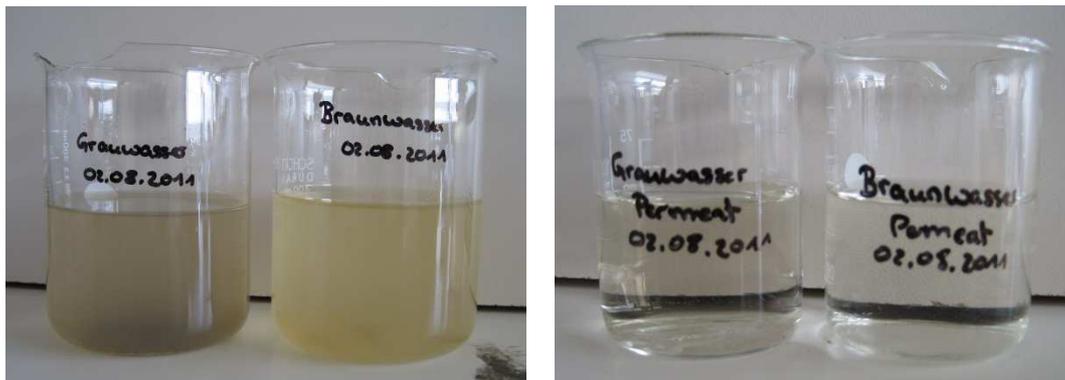
**Abbildung 46:** Vor dem MAP-Fällungsreaktor eingebauter Schmutzfang. Links: gereinigter (alter; Mitte: belegter alter Schrägsitzschmutzfang mit den länglichen, gelblich bis dunkelbraunen Larvenhüllen; Rechts: befüllter Siebkorb mit abgeschiedenen Fällprodukten im Bodensatz.

Die Fliegenpuppen werden mit dem Urin aus den Lagertanks in die Urinleitung transportiert und am Sieb gemeinsam mit größeren organischen Partikeln abgeschieden. Tritt eine größere Mengen der Puppen auf einmal auf, setzt sich der Schmutzfang sofort zu, so dass kein weiterer Zulauf von Urin in den Fällungsreaktor stattfindet und die Fällung bis zur manuellen Reinigung des Schmutzfangs unterbrochen werden muss. Durch die Integration des zusätzlichen Filterkorbes war es möglich, Betriebsstörungen durch den verblockten Schrägsitz-

schmutzfang zu vermeiden. Eine verbesserte Filtrationseigenschaft der Filter wurde jedoch nicht erreicht.

### 3.3.3.8 Analytik und Verfahrensparameter der Membranbioreaktoren

In Abbildung 47 sind die Braun- und Grauwasserzulaufe sowie Permeate abgebildet. Man erkennt deutlich, dass die im Zulauf noch vorhandene Färbung in den Permeaten kaum noch sichtbar ist (siehe hierzu auch Tabelle 12). Besonders im Hinblick auf die spätere Wiederverwendung als Brauchwasser (Bewässerungs-, Toilettenspülwasser) ist die Entfärbung ein wichtiger Aspekt für eine positive Nutzerakzeptanz.



**Abbildung 47: Links: Zulauf des Grauwasser-MBR (links) und des Braunwasser-MBR (rechts); Rechts: Permeat der MBR: Grauwasser (links), Braunwasser (rechts).**

In den Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die chemischen Parameter des Grauwasser- und Braunwasserzulaufs sowie der Permeate gegenübergestellt. Das Nährstoffverhältnis C : N : P des Grauwassers lag i.d.R. bei 100 : 2 : 1, das Verhältnis des Braunwassers bei 100 : 9 : 1. Bezogen auf den CSB erreichte der Grauwasser-MBR eine Reinigungsleistung von 96%, der Braunwasser-MBR von 97%.

Das Braunwasser erscheint, im Vergleich zu anderen Publikationen, bezogen auf den CSB-Gehalt im Zulauf geringer belastet (DWA, 2008). Eine mögliche Ursache liegt in der Art des Abwasseranfalls, der Vorbehandlung bzw. der Fest-Flüssig-Trennung (siehe hierzu Kapitel 3.2.2.3.1). Das Abwasser wird bis auf wenige Meter nur vertikal bis zu den Anlagen transportiert, so dass kaum eine Durchmischung durch z.B. Pumpen über eine längere horizontale Strecke stattfindet. Die Feststoffe werden nach Eintritt in das Siebelement der Vorreinigung durch eine Schnecke erfasst und entfernt. Die in den Feststoffen enthaltenen Fäkalien werden nahezu unverändert ausgetragen ohne mit dem Wasser durchgemischt zu werden. Hierdurch kommen die relativ niedrigen Nährstoffgehalte in der Wasserphase zustande.

Die Zusammensetzung des Grauwassers entspricht weitestgehend den in der Literatur publizierten Ergebnissen für leicht verschmutztes Grauwasser (DWA, 2008), weil das in dem vorliegenden Projekt anfallende Grauwasser nur aus Handwaschbecken und Teeküchen stammt.

**Tabelle 6: Chemische Parameter des Grauwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 12.07.2011 bis zum 30.09.2012.**

Parameter	Einheit		Zulauf		Permeat	
<b>CSB</b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	650	n = 67	28,4	n = 62
		min	295		17,2	
		max	1455		39,5	
		σ	230		4,55	
<b>TN<sub>b</sub></b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	15,1	n = 57	12,2	n = 58
		min	5,36		5,00	
		max	35,8		25,7	
		σ	5,89		4,68	
<b>NH<sub>4</sub>-N</b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	0,54	n = 38	0,02	n = 36
		min	0,02		0,01	
		max	1,94		0,13	
		σ	0,53		0,03	
<b>NO<sub>2</sub>-N</b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	0,12	n = 37	0,05	n = 37
		min	0,02		0,01	
		max	0,32		1,04	
		σ	0,08		0,17	
<b>NO<sub>3</sub>-N</b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	0,71	n = 38	7,50	n = 35
		min	0,23		0,20	
		max	3,23		20,0	
		σ	0,50		4,94	
<b>P<sub>ges</sub></b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	8,02	n = 61	5,37	n = 56
		min	0,94		1,12	
		max	19,93		9,97	
		σ	4,50		1,75	
<b>PO<sub>4</sub>-P</b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	5,33	n = 38	5,21	n = 36
		min	0,89		1,11	
		max	17,36		9,93	
		σ	3,38		1,85	

**Tabelle 7: Chemische Parameter des Braunwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 30.08.2011 bis zum 30.09.2012.**

Parameter	Einheit		Zulauf		Permeat	
CSB	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	778	n = 65	22,4	n = 58
		min	29,9		13,8	
		max	1,88		39,8	
		σ	279		5,51	
TN <sub>b</sub>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	66,8	n = 53	70,5	n = 52
		min	13,4		24,9	
		max	190		170	
		σ	27,53		22,09	
NH <sub>4</sub> -N	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	29,9	n = 34	0,30	n = 33
		min	0,32		0,01	
		max	61,2		4,40	
		σ	21,67		0,88	
NO <sub>2</sub> -N	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	1,32	n = 36	0,94	n = 35
		min	0,05		0,01	
		max	3,12		5,94	
		σ	0,88		1,61	
NO <sub>3</sub> -N	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	1,88	n = 35	62,7	n = 33
		min	0,23		0,23	
		max	4,21		94,4	
		σ	1,11		19,74	
P <sub>ges</sub>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	7,86	n = 51	6,68	n = 49
		min	2,29		1,26	
		max	16,01		19,6	
		σ	2,65		3,95	
PO <sub>4</sub> -P	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	4,92	n = 35	7,00	n = 36
		min	1,54		1,26	
		max	9,87		19,83	
		σ	1,81		4,24	

Die Membranmodule der MBR werden permanent mit Luft überströmt, um ein Verstopfen der Membranen durch Ablagerungen zu verhindern. Unter diesen Bedingungen kann Stickstoff nicht gezielt entfernt werden. Eine Denitrifikation, die Umwandlung von Nitrat zu elementarem, gasförmigen Stickstoff bedingt eine Abwesenheit von Sauerstoff (anoxische Verhältnisse), die in den beschriebenen Anlagen nicht erreicht werden. Daher findet lediglich eine Oxidation des Ammoniums zu Nitrat (Nitrifikation) statt. Die Anlagen wurden auf eine vollständige Nitrifikation (die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat) ausgelegt.

Zu Beginn des Betriebes waren im Grauwasser sehr hohe Konzentrationen an Phosphat enthalten. Erste Vermutungen wiesen auf die innerhalb des Gebäudes verwendeten phosphathaltigen Spülmaschinenreiniger hin. In mehreren Analysen wurden die Geschirreiniger auf ihren Phosphatgehalt untersucht; dabei ergaben sich Phosphatgehalte von ca. 5500 mg

pro Spülmaschinentab. Nach einer Umstellung auf phosphatfreie Reiniger durch die GIZ konnte eine abnehmende Tendenz in den Phosphatkonzentrationen (Tabelle 8) beobachtet werden. Die Umstellung erfolgte Mitte Juli 2011, ab Mitte September 2011 waren die phosphathaltigen Reiniger weitestgehend verbraucht.

**Tabelle 8: Gesamt-Phosphatwerte des Grauwasserzulaufs unterschieden in die Zeiträume vor, während und nach der Umstellung auf phosphatfreie Spülmaschinenreiniger.**

Zeitraum	Gesamt-Phosphatkonzentration [mg l <sup>-1</sup> ]			
	Ø	min	max	n
Vor der Umstellung	36,3	26,2	49,2	11
Während der Umstellung	29,4	9,9	44,3	12
Nach der Umstellung	13,3	6,3	20,7	11

Die Tabelle 9 und Tabelle 10 stellen die physikalischen Parameter des Zulaufs, der Biologie und des Permeats der Grau- und Braunwasser-MBR dar.

**Tabelle 9: Physikalische Parameter des Grauwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 12.07.2011 bis zum 30.09.2012. n.n. = nicht nachweisbar.**

Parameter	Einheit		Zulauf	Biologie	Permeat	Anzahl Messungen
pH	[-]	Ø	7,5	8,2	8,3	n = 55
		min	7,1	7,5	7,5	
		max	8,6	8,5	8,6	
O <sub>2</sub>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	1,58	8,31	8,75	n = 55
		min	0,23	4,44	5,01	
		max	4,64	12,02	11,9	
T	[°C]	Ø	18,6	18,2	18,5	n = 55
		min	8,4	8,1	8,1	
		max	23,0	23,1	23,3	
Lf	[µS cm <sup>-1</sup> ]	Ø	954	958	968	n = 55
		min	828	825	825	
		max	1113	1075	1465	
AFS/TS	[g l <sup>-1</sup> ]	Ø	0,18	5,3	n.n.	n = 34/63
		min	0,01	3,0	n.n.	
		max	0,58	7,3	n.n.	

**Tabelle 10: Physikalische Parameter des Braunwasser-MBR aus dem Zeitraum vom 30.08.2011 bis zum 30.09.2012. n.n. = nicht nachweisbar.**

Parameter	Einheit		Zulauf	Biologie	Permeat	Anzahl Messungen
pH	[-]	Ø	8,5	7,8	7,9	n = 51
		min	7,7	7,3	7,1	
		max	8,9	8,4	8,5	
O <sub>2</sub>	[mg l <sup>-1</sup> ]	Ø	3,22	6,68	8,35	n = 52
		min	0,33	0,65	3,68	
		max	8,56	10,5	11,2	
T	[°C]	Ø	18,6	18,0	18,40	n = 54
		min	10,4	9,0	8,3	
		max	23,2	23,3	23,0	
Lf	[µS cm <sup>-1</sup> ]	Ø	1481	687	2440	n = 52
		min	1475	1041	2610	
		max	1497	1089	2640	
AFS/TS	[g l <sup>-1</sup> ]	Ø	0,439	8,4	n.n.	n = 37/52
		min	0,172	3,5	n.n.	
		max	0,960	12,4	n.n.	

### 3.3.3.9 Flux und Permeabilität der MBR

Die für Membranbelebungsreaktoren typischen Kennwerte der Flux und die Permeabilität sind für beide Anlagen spezifisch in den folgenden Diagrammen dargestellt. Bei der Berechnung des Brutto-Flux werden, anders als beim Netto-Flux, die Pausenzeiten nicht einbezogen. Diese Kenngröße bezieht sich auf den tatsächlichen Betrieb der Anlage. Die Permeabilität wird auf Grundlage des Brutto-Flux berechnet.

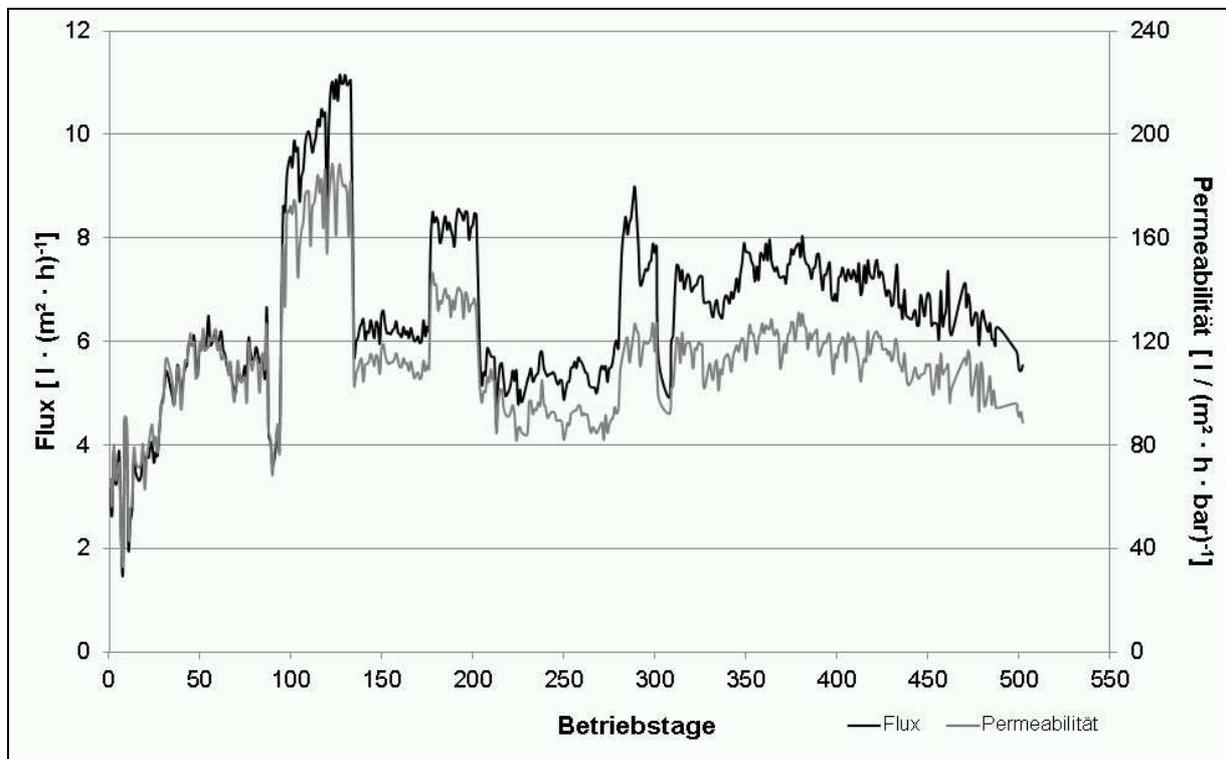
Die Verläufe der Kurven (Abbildung 48 und Abbildung 49) zeigen, dass die hier gewählte Betriebsweise sehr gut zur Deckschichtkontrolle geeignet ist. Normalerweise wird eine abfallende Tendenz von Flux und Permeabilität über der Zeit bei Membranbelebungsanlagen beobachtet (Pinnekamp. 2006; Melin. 2007).

Die Verläufe der gezeigten Diagramme (Abbildung 48 und Abbildung 49) sind auf die sehr geringe Belastung der Membranen zurückzuführen. Theoretisch möglich wäre ein maximaler Flux von 30 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (über 4 h) und ein Flux von 15 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (über die restlichen 20 h) (Schlapp, HUBER SE, 2012, mündliche Kommunikation). Flux und Permeabilitäten sind in Tabelle 11 aufgelistet, zusätzlich sind der Tagesdurchsatz und der Transmembrandruck aufgeführt. Die Belastung der Grauwassermembran war so gering, da nicht mehr Grauwasser zur Verfügung stand. Im Falle der Braunwasser-MBR wurde die geringe Belastung zugunsten eines stabilen Betriebs gewählt.

**Tabelle 11: Auflistung des Flux, der Permeabilität, des Tagesdurchsatzes und des Transmembrandrucks der Grau- und Braunwasser-MBR.**

	Parameter	Einheit	Ø	min	max
Grau- wasser	Tagesdurchsatz <sup>1</sup>	[l d <sup>-1</sup> ]	327	107	652
	Flux	[l m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ]	6,6	1,6	11,2
	Permeabilität	[l m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup> ]	114	34	189
	Transmembrandruck	[bar]	57	45	72
Braun- wasser	Tagesdurchsatz <sup>1</sup>	[l d <sup>-1</sup> ]	327	107	652
	Flux	[l m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ]	6,6	1,6	11,2
	Permeabilität	[l m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup> ]	114	34	189
	Transmembrandruck	[bar]	57	45	72

<sup>1</sup> Beim Braunwasser liegt der behandelte Tagesdurchsatz deutlich unter dem tatsächlich anfallenden. Dieser konnte nur in ersten Vorabbeobachtungen ungefähr geschätzt werden. Es werden Tagesmengen um 2.000 l Braunwasser für einen Strang (50% der angeschlossenen Toiletten) vermutet. Beim Grauwasser wurde das komplett anfallende Wasser behandelt.



**Abbildung 48: Flux und Permeabilität des Grauwasser-MBR in Abhängigkeit von der Zeit.**

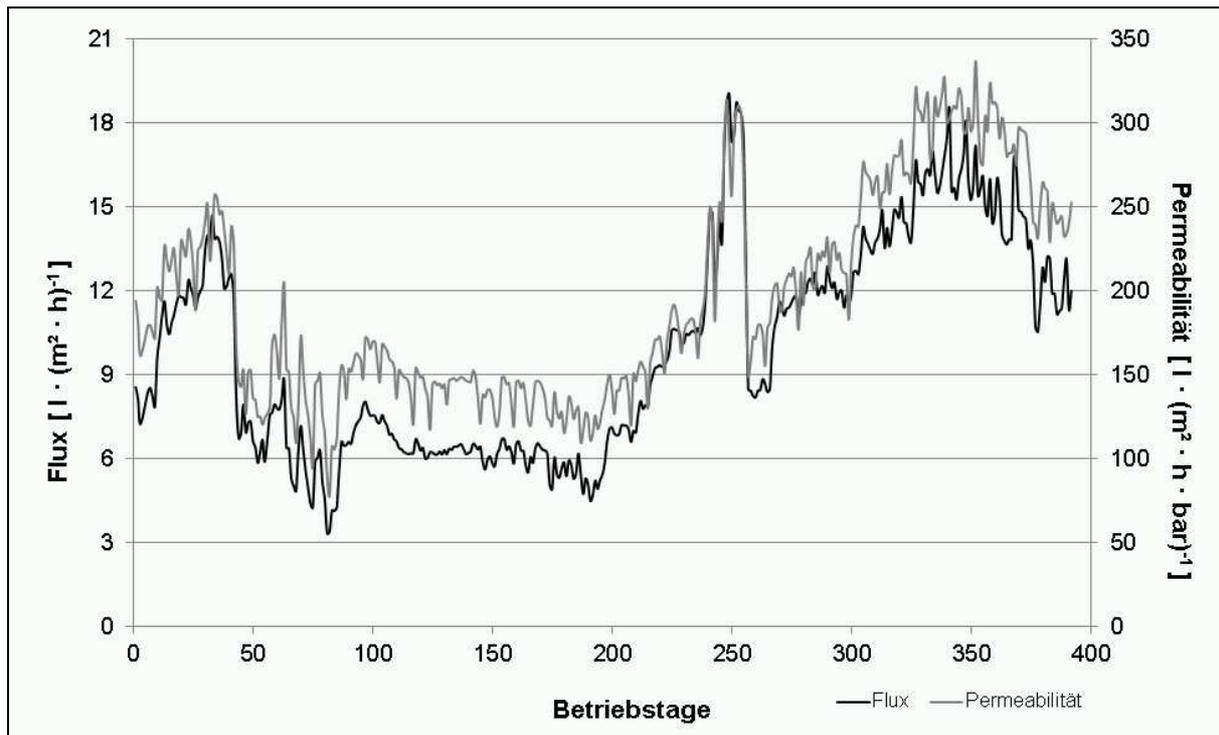


Abbildung 49: Flux und Permeabilität des Braunwasser-MBR in Abhängigkeit von der Zeit.

### 3.3.3.10 Einordnung der Permeate nach Qualitätskriterien

Im Vordergrund der Grau- und Braunwasserbehandlung steht die Wiederverwendung des gewonnenen Permeats. Die spezifischen hygienischen Anforderungen an die Qualität richten sich nach der geplanten Nutzung. Als relevante Qualitätsparameter gelten in der Regel die BSB<sub>5</sub>-Konzentration (Speicherfähigkeit), die Trübung (ästhetische Belange) und die mikrobiologische Belastung (gesundheitliche Risiken). Auf Grundlage des fbr Hinweisblattes H 201 (Fbr, 2007), der DIN 19650 für hygienische Belange von Bewässerungswasser und der Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2001) werden die Permeate der Membranbioreaktoren klassifiziert.

**Tabelle 12: Vergleich der Richtwerte und Qualitätsanforderungen für Toilettenspülwasser, Bewässerungswasser und Trinkwasser mit den Durchschnittswerten der Permeate der Grau- bzw. Braunwasserbehandlung.**

Parameter	Einheit	Anforderungen gemäß			SANIRESCH-Permeate <sup>3)</sup>	
		fbr H 201	DIN 19650	TrinkwVer.	Grauwasser	Braunwasser
<b>CSB</b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	-	<60	-	28,5	23,0
<b>BSB<sub>7</sub></b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	<5	<10 (BSB <sub>5</sub> )	-	1,5	1,6
<b>O<sub>2</sub>-Gehalt</b>	[mg l <sup>-1</sup> ]	>50%	-	>5	8,8	8,3
<b>Trübung</b>	[NTU]	-	-	<1	0,4	0,5
<b>Coliforme Bakterien</b>	[-]	<100 ml <sup>-1</sup>	-	0 100 ml <sup>-1</sup>	1,1 ml <sup>-1</sup>	2 ml <sup>-1</sup>
<b>E. coli</b>	[-]	<10 ml <sup>-1 1)</sup>	0-2000 100 ml <sup>-1 2)</sup>	0 100 ml <sup>-1</sup>	0,4 ml <sup>-1</sup>	0 ml <sup>-1</sup>

<sup>1)</sup> gilt für fäkalcoliforme Bakterien

<sup>2)</sup> je nach Eignungsklasse

<sup>3)</sup> Durchschnittswerte (die Spannweiten der Analysenwerte sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 aufgelistet)

Nach fbr Hinweisblatt H 201 erfüllen beide Permeate die Anforderungen für Toilettenspülwasser. Eine Verwendung als Bewässerungswasser ist für beide Permeate, wenn auch teilweise eingeschränkt, möglich. Nach DIN 19650 werden vier Eignungsklassen unterschieden. Beide Permeate halten die strengste Klasse 1 nicht ein, können aber für den Bedarf in den unteren Klassen eingesetzt werden. Somit sind sie zur Bewässerung von Sportplätzen, öffentlichen Parkanlagen, für nicht zum Verzehr bestimmte Gewächshauskulturen, Obst, Gemüse zur Konservierung und Gemüse bis zwei Wochen vor der Ernte einsetzbar (DIN 19650).

### 3.3.4 Fazit

Seit Einbau der drei Behandlungsanlagen (Membranbioreaktoren, MAP-Fällungsreaktor) funktionieren diese störungsfrei. Bisher gab es keinen einzigen Zwischenfall der anlagenbedingt ausgelöst worden wäre. Die aktive Entlüftung aller Anlagen verhinderte das Auftreten von Geruchsbelästigungen. Das Projekt konnte zeigen, dass dezentrale und nach Stoffströmen getrennte Abwasserbehandlung in einem Bürogebäude auf engstem Raum technisch möglich ist.

Die Wasserqualität des gereinigten Braun- und Grauwassers erlaubt einen Einsatz als Toilettenspül- und Bewässerungswasser. Eine Nutzung innerhalb des Gebäudes wäre theoretisch möglich gewesen. Durch die Verwendung von Membranbioreaktoren in großen Gebäuden mit vielen Nutzern von sanitären Einrichtungen (z.B. Bürogebäuden, Hotels) ist es möglich das gewonnene Permeat als Betriebs- und Brauchwasser zu nutzen und so den Wasserverbrauch zu reduzieren.

Die Phosphatfällung aus menschlichem Urin ist eine vielversprechende Möglichkeit Phosphor zurückzugewinnen. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass dies auch großtechnisch im Dauerbetrieb möglich ist. Es besteht allerdings weiterhin großer Forschungsbedarf. Die rela-

tiv geringen und nicht zufriedenstellenden Rückgewinnungsraten müssen weiter optimiert werden. Des Weiteren ist, wie bei einer Pilotanlage nicht anders zu erwarten, der Arbeitsaufwand für den kontinuierlichen Betrieb sehr umfangreich. Die weitergehende Automatisierung bzw. Optimierung von Arbeitsschritten ist notwendig. Ein alternatives Filtermedium für die MAP-Gewinnung wäre wünschenswert. Die verwendeten Polypropylen-Filter mussten nach einmaligem Gebrauch aufwendig vom MAP befreit und anschließend entsorgt werden. Umweltfreundlicher wäre ein Filtermedium, welches nach der Belegung mit dem Filterkuchen, zusammen mit dem MAP zerkleinert und auf das Feld ausgebracht werden könnte.

## **3.4 Qualität der Produkte / Urinlagerung (Verantwortlich: RWTH Aachen)**

### **3.4.1 Ziele der Projektkomponente**

Im Rahmen des Teilantrages der RWTH-Aachen wurden vom ISA der RWTH Aachen folgende Projektkomponenten bearbeitet:

- Lagerungsversuche mit Urin
- Verfahrenstechnische Optimierung der Urinbehandlung
- Verhalten von Pharmazeutika und Tensiden in der Urin-, Grau- und Braunwasserbehandlung

Darüber hinaus wurden Untersuchungen zur Detektion von Arzneimitteln mittels AOX-Analytik sowie zur Leistungsfähigkeit der Grauwasserbehandlung durchgeführt.

### **3.4.2 Material und Methoden**

Die am ISA der RWTH-Aachen untersuchten Proben wurden den Versuchsanlagen und den Urinlagertanks im GIZ-Gebäude an den in Abbildung 16, Abbildung 21 und Abbildung 25 beschriebenen Probenahmestellen entnommen. Insgesamt wurden die in Tabelle 13 aufgelisteten Untersuchungen durchgeführt.

Tabelle 13: Anzahl der im Rahmen des Projektes durchgeführten Analysen.

Anzahl durchgeführter Analysen			
Flüssige Phase	Anzahl	Feststoffe	Anzahl
pH	29	TR	8
Lf	23	GV	13
AFS	38	Medikamente	12
AOX	15	Ca	29
BSB	18	K	23
CSB	182	Mg	30
Daphnien-Test	2	N <sub>ges</sub>	18
Medikamente	159	P	33
mikrosk. Bild	14	S	5
Tenside	4		
Ca	31		
Cd	6		
Cr	6		
Cu	6		
Hg	6		
K	22		
Mg	34		
Na	14		
N <sub>ges</sub>	178		
NH <sub>4</sub> -N	177		
Ni	6		
NO <sub>2</sub>	8		
NO <sub>3</sub>	138		
PO <sub>4</sub> -P	158		
Pb	6		
P <sub>ges</sub>	53		
S	6		
Zn	6		

### 3.4.2.1 Nachweisverfahren für Pharmazeutika

Der Nachweis der Pharmazeutika im Urin, Braunwasser und Struvit beruhte auf den bei Gros et al. (2006) und Petrovic et al. (2005) beschriebenen Methoden. Dabei werden die Substanzen mittels Festphasenextraktion (Solid Phase Extraction = SPE) aus der flüssigen Phase extrahiert und angereichert. Nach Elution werden die Substanzen flüssigkeitschromatographisch getrennt und massenspektrometrisch detektiert. Die Quantifizierungsgrenzen liegen bei 1 µg l<sup>-1</sup>.

**Material:****Geräte**

- Zymark Autotrace SPE Workstation
- Metallblock Thermostat, Barkey
- Ilmvac Saugpumpe
- LC/MS-System (Orbitrap, Thermo Electron)
- Steuerung und Auswertung mittels Xcalibur Software
- Oasis HLB-SPE-Kartuschen 60 mg, Waters
- N-Vinylpyrrolidon-Divinylbenol-Kopolymer
- HPLC Säule: Hypersil Gold aQ 150 x 2,1 mm 5  $\mu$  (Thermo Electron)

**Reagenzien**

- Acetonitril, picograde, Promochem
- Methanol, picograde, Promochem
- MilliQ Wasser
- Bisoprolol, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München
- Carbamazepin, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München
- Chloroquin, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München
- Diclofenac, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München
- Ibuprofen, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München
- Metoprolol, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München
- Sulfamethazin, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München
- Tramadol, Sigma Aldrich Chemie GmbH, München

Stammlösungen der Wirkstoffe von je 1 mg ml<sup>-1</sup> werden in Acetonitril oder Acetonitril/Methanol gelöst und bei -20°C und dunkel gelagert. Aus den Stammlösungen wird ein Arbeitsmischstandard mit einer Konzentration von 10  $\mu$ g/ml je Wirkstoff hergestellt, der auch bei -20°C dunkel gelagert wird. Vor jeder Analysenserie werden aus diesem Arbeitsmischstandard 4 - 8 Kalibrationsstandards in dem zu erwartenden Konzentrationsbereich zwischen 0,001 und 10  $\mu$ g l<sup>-1</sup> durch Verdünnen mit Methanol/Wasser (Verhältnis 50:50) hergestellt.

Die Proben werden zur Verhinderung von Adsorptionseffekten in Glasgefäßen gesammelt und umgehend oder nach Lagerung bei -20°C spätestens nach 48 h mittels Festphasenextraktion (SPE) verarbeitet. Dazu wird eine Zymark Autotrace SPE Workstation verwendet. Um eine Verblockung des Gerätes zu vermeiden, werden die Proben vor der Anreicherung durch einen Schwarzband-Papierfilter ( $\varnothing$  150 mm) filtriert. Die SPE erfolgt mittels N-Vinylpyrrolidone-Divinylbenzol-Kopolymer SPE-Kartuschen (60 mg Füllgewicht). Die Konditionierung wird bei einer Fließgeschwindigkeit von 2 ml min<sup>-1</sup> zuerst mittels 5 ml Methanol und dann mit 5 ml MilliQ Wasser durchgeführt. Das anzureichernde Probenvolumen ist vom TOC der Probe abhängig, bis zu einem TOC von 200 mg C l<sup>-1</sup> können 100 ml Probe angereichert werden (Anreicherungsfaktor 1:100), bei TOC > 200 mg C l<sup>-1</sup> muss das Volumen entsprechend reduziert werden. Nachdem die Proben bei einem Fluss von 5 ml min<sup>-1</sup> angereichert sind, werden die SPE Kartuschen im Stickstoffstrom für 30 min getrocknet. Die Analyten werden mit einem Fluss von 2 ml min<sup>-1</sup> mit jeweils 2 ml Methanol, 2 ml Methanol mit 5 mM

Ammoniumacetat und nochmals 2 ml Methanol wieder eluiert. Das Eluat wird bei 60°C im Stickstoffstrom zur Trockene eingeengt und anschließend mit 0,5 ml Methanol und 0,5 ml Wasser rekonditioniert. Die Kartuschen werden verworfen.

**Tabelle 14: HPLC-Gradient bei der flüssigkeitschromatographischen Trennung der Pharmazeutika.**

Zeit	Eluent A	Eluent B	Fluss
[min]	[%]	[%]	[ $\mu\text{l min}^{-1}$ ]
0	20	80	200
12	90	10	200
22	90	10	200
23	20	80	200
30	20	80	200

Bei der flüssigkeitschromatographischen Trennung (HPLC) wird wie in Tabelle 14 beschrieben vorgegangen:

Eluent A: Methanol mit 2 mM Ammoniumacetat und 0,1% Essigsäure

Eluent B: Wasser mit 2 mM Ammoniumacetat und 0,1% Essigsäure

Injektionsvolumen: 10  $\mu\text{l}$

Säule: Hypersil Gold aQ 150x2.1 5  $\mu\text{m}$

Ionisierungsart: ESI (Elektrospray ionisation) positiv und negativ

Die Quantifizierung erfolgt im HR-SIM Modus (High resolution single ion monitoring) und die entsprechenden Massenspuren werden mit einer Toleranz von 10 mmu (milli mass units) aus dem Totalionenstrom extrahiert. Die Identifizierung der Wirkstoffe geschieht über die parallele Aufnahme der MS-MS-Spektren. Die Auswertung erfolgt über die in Tabelle 15 dargestellten Quantifizierungsmassen.

**Tabelle 15: Quantifizierungsmassen der eingesetzten Pharmazeutika.**

Wirkstoff	Quantifizierungsmassen	
	[M+H] <sup>+</sup>	[M+H] <sup>-</sup>
Bisoprolol	326,2326	
Carbamazepin	237,1022	
Chloroquin	320,1888	
Diclofenac	296,0231	
Metoprolol	268,1907	
Sulfamethazin	279,091	
Tramadol	264,1958	
Ibuprofen		205,1234

Durch Vergleich der Peakflächen von Standard und Probe sowie unter Berücksichtigung der Verdünnungsfaktoren wird der Gehalt in der Probe automatisch mit Hilfe der Xcalibur Software berechnet.

Der Nachweis der Pharmazeutika in Struvit erfolgt wie bei Ronteltap et al. (2007b) beschrieben nach Waschen der Struvit-Kristalle mit gesättigter Magnesium-Ammonium-Phosphat-Lösung und anschließender Trocknung bei 35°C bis zu r Gewichtskonstanz.

5 g getrocknetes Struvit werden in 250 ml 1,5 M HCl aufgelöst und die Lösung in einem Messkolben auf 500 ml mit MilliQ Wasser aufgefüllt. Diese Lösung wird mittels SPE angereichert und dann wie eine Abwasser-/Urinprobe weiterbehandelt.

### 3.4.2.2 Nachweisverfahren für Tenside

Ein Kriterium der Behandlung von Grauwasser ist die Elimination von Tensiden, die zu Problemen bei der späteren Nutzung des Grauwassers als Betriebswasser führen können. Aus diesem Grunde wurden Ablaufproben der Grauwasserbehandlungsanlage auf Tenside untersucht. Die Anreicherung der Proben erfolgte auf C18 500 mg SPE-Kartuschen wie bei den Nachweisverfahren für Pharmazeutika beschrieben. Die flüssigkeitschromatographische Trennung wurde wie in Tabelle 16 beschrieben durchgeführt.

**Tabelle 16: HPLC-Gradient der flüssigkeitschromatographischen Trennung der Tenside.**

Zeit	Eluent A	Eluent B	Fluss
[min]	[%]	[%]	[ml min <sup>-1</sup> ]
0	30	70	200
12	90	10	200
28	90	10	200
30	30	70	200
35	30	70	200

Eluent A: Methanol mit 2 mM Ammoniumacetat und 0,1% Essigsäure

Eluent B: Wasser mit 2 mM Ammoniumacetat und 0,1% Essigsäure

Injektionsvolumen: 10 µl

Säule: Hypersil Gold aQ 150x2.1 5 µm

Ionisierungsart: APCI (atmospheric pressure chemical ionisation) positiv und ESI (electrospray ionisation) negativ

Zur Verbesserung der Ionisierung im APCI Modus, werden dem Eluenten nach der Trennsäule über ein T-Stück 300 µl min<sup>-1</sup> Methanol mit 50 mM Ammoniumacetat zugespeist.

### 3.4.2.3 Nachweisverfahren für Standardparameter

Standardanalysen wurden nach den in Tabelle 17 aufgelisteten Verfahren durchgeführt.

**Tabelle 17: Verwendete Standardverfahren.**

Parameter	Methode	Parameter	Methode
TS	DIN 38409, Teil 1	Daphnien-Tox.	DIN 38412- 30
GV		Ca	DIN EN ISO 11885
TR		Cd	
o-TR		Cr	
AFS	DIN EN 872	Cu	
N (Feststoffe)	DIN 38409, Teil 28	Gd	
NH <sub>4</sub> -N	DIN 38406, Teil 5	Hg	
NO <sub>2</sub> -N	DIN EN 10304-1	K	
NO <sub>3</sub> -N		Mg	
PO <sub>4</sub> -P		Na	
N <sub>ges</sub>	DIN EN 12260	Ni	
DOC	DIN EN 1484	P <sub>ges</sub>	
BSB <sub>5</sub>	DIN EN 1899-1	Pb	
Lf	DIN EN 27888	S	
pH-Wert	DIN EN ISO 10523	Zn	
AOX	DIN EN ISO 9562		
CSB <sub>homogenisiert</sub>	DIN ISO 15705		

### 3.4.2.4 Mikrobiologische Untersuchungen

Für die mikrobiologischen Untersuchungen wurden die in Tabelle 18 aufgelisteten Nachweisverfahren angewandt.

**Tabelle 18: Mikrobiologische Nachweisverfahren.**

Parameter	Methode
E. coli	Colilert-18/Quanti Tray
Coliforme Bakterien	Colilert-18/Quanti Tray
Salmonella spec.	ISO 6579:1981
Clostridium perfringens	Membran Filtration und MCP-Agar
Pseudomonas aeruginosa	DIN EN ISO 16266

Die Proben für die mikrobiologischen Untersuchungen wurden den Probenahmestellen (siehe Abbildung 16, Abbildung 21, und Abbildung 25) im Keller des GIZ-Gebäudes nach vorherigem Abspülen mit Alkohol und Abflämmen der Zapfstellen entnommen, um eine Infektion der Proben mit an den Zapfhähnen anhaftenden Keimen zu vermeiden.

### 3.4.2.5 Beschreibung der untersuchten Pharmazeutika

Bei einer ersten Untersuchung des gesammelten Urins im GIZ-Hauptgebäude wurden verschiedene Medikamente durch ein flüssigkeits-chromatisches Screening mit paralleler massenspektrometrischer Untersuchung in signifikanten Anteilen detektiert (Tabelle 24) und nur zum Teil in die weiteren Untersuchungen im Rahmen des Projektes einbezogen. Die betrachteten Pharmazeutika sind in Tabelle 19 aufgelisteten. Zusätzlich sollte in die Untersuchungen das Malaria-Medikament Chloroquin einbezogen werden.

**Tabelle 19: Ergebnis des Medikamenten-Screenings vor Beginn der Untersuchungen.**

Medikament	Indikationsgruppe
Bisoprolol, Metoprolol	Betablocker
Carbamazepin	Antiepileptikum
Ibuprofen	Antirheumatikum
Diclofenac, Tramadol (Opoïd)	Analgetikum
Sulfadimidin	Sulfonamid (Tiermedizin)

In Tabelle 20 sind Daten über Verbrauchsmengen und Umweltbefunde der im Urin nachgewiesenen Arzneimittel aus dem UBA-Bericht 66/2011 (UBA, 2011) sowie für Chloroquin zusammen gestellt. Angaben über den Ausscheidungsgrad wurden der Datenbank PharmQue der TU Hamburg-Harburg, Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz, zum Auftreten von Pharmazeutika in der Umwelt entnommen (PharmQue, 2009).

**Tabelle 20: Verbrauchsmengen und Nachweis der im Rahmen des Projektes untersuchten Arzneimittel in Umweltkompartimenten in Deutschland (OW = Oberflächengewässer, GW = Grundwasser, TW = Trinkwasser, BG = Bestimmungsgrenze; UBA, 2011; PharmQue, 2009).**

Wirkstoff	Verbrauchsmenge (2009)	Ausscheidungsgrad	Umweltbefunde		
			OW	GW	TW
-	[kg]	[%]	+++	>1 µg l <sup>-1</sup>	
			++	0,1 – 1 µg l <sup>-1</sup>	
			+	<0,1 µg l <sup>-1</sup>	
Bisoprolol	8.196	50	+++	++	
Metoprolol	153.125	13	+++	++	
Carbamazepin	64.720	<10 %	+++	+++	+
Ibuprofen	782.378	10	+++	++	+
Sulfadimidin	keine Angaben		+++	+++	< BG
Diclofenac	91.583	1	+++	+++	+
Tramadol	keine Angaben	30	+		
Chloroquin	keine Angaben	70	keine Daten		

Die Konzentrationen der Umweltbefunde sind weder ein Maß für die Häufigkeit des Nachweises der verschiedenen Pharmazeutika noch sind es die Angaben der Verbrauchsmenge. Sie zeigen jedoch auf, dass von diesen Medikamenten potentiell eine Umweltgefahr ausgehen kann und sie trotz einer biologischen Reinigung der kommunalen Abwässer zu einem

bestimmten Anteil über die menschlichen Abgänge in die Gewässer gelangen und dort nachgewiesen werden können. Die Konzentrationen liegen im Allgemeinen weit unterhalb der therapeutisch begründeten Wirkungsschwelle. Da aber der Einfluss einer langfristigen Einwirkung von Pharmazeutika in Spuren und insbesondere in der auftretenden Mischung tausender Stoffe auf die Umwelt und auch den Menschen nicht erforscht ist und auch wegen der sich ständig ändernden Zusammensetzung der Stoffmischung nicht erforscht werden kann, gilt dem Vorkommen dieser Substanzen in der Umwelt vermehrte Aufmerksamkeit. Für das Therapeutikum der Tiermedizin Sulfadimidin, das z. B. bei Geflügel gegen Parasitenbefall angewandt wird, und das Analgetikum Tramadol liegen keine Angaben über Verbrauchsmengen in Deutschland vor, obwohl beide Wirkstoffe bereits in Gewässern nachgewiesen werden konnten. Das Auftreten von Sulfadimidin im menschlichen Urin kann mit keiner der bekannten Verwendungsarten in Verbindung gebracht werden. Chloroquin, das Malaria-Therapeutikum, das zu 40% unverändert mit dem Urin wieder ausgeschieden wird, wurde in die Untersuchungen des Projektes einbezogen, weil es für die Anwendung einer Urindüngung bzw. MAP-Fällung in Malaria-Gebieten von Interesse sein könnte, das Verhalten dieses Wirkstoffes bei Lagerung und Fällung zu überprüfen (SRG, 2011). Trotz einer stetigen Zunahme der Resistenz des Parasiten gegen Chloroquin wird dieser Wirkstoff wegen seines niedrigeren Preises weiter angewandt (WHO, 2012). Genaue Angaben über jährliche Verbrauchsmengen liegen nicht vor. Neben den unvollständigen Angaben über Verbrauchsmengen der detektierten Medikamente sowie den Nachweis der Substanzen im aquatischen Milieu liegen auch nur z. T. Ergebnisse über die aquatische Toxizität der Pharmazeutika vor, die in Tabelle 21 aufgezeigt werden.

**Tabelle 21: Resultate aquatischer Toxizitätstests und  $K_{ow}$ -Werte.**

Wirkstoff	CAS-Nr.	Daphnientest	Fischtest	Algentest	$K_{ow}$
		EC <sub>50</sub> [mg/l]	LC <sub>50</sub> [mg/l]	EC <sub>50</sub> [mg/l]	[-]
Bisoprolol-Fumarat <sup>(1) (9)</sup>	104344-23-2	90	>100	-	2,20
Metoprolol <sup>(2) (9)</sup>	56392-17-7	438	54	7,3	1,88
Carbamazepin <sup>(3) (9)</sup>	298-46-4	92	43	27,3	1,76
Ibuprofen <sup>(4) (9)</sup>	15687-27-1	9,06	173	<30	1,41
Sulfadimidin <sup>(5)</sup>	57-68-1	k.A.	k.A.	k.A.	0,90
Diclofenac <sup>(6) (9)</sup>	15307-79-6	56	214	72	1,56
Tramadol <sup>(7) (9)</sup>	27203-92-5	>10000	15400	8000	3,01
Chloroquin <sup>(8)</sup>	54-05-7	50	k.A.	k.A.	4,63

<sup>(1)</sup> LGC, 2011; <sup>(2)</sup> PharmQue, 2009 <sup>(3)</sup> ESIS, 2000a ; <sup>(4)</sup> ESIS, 2000b; <sup>(5)</sup> NTP, 2012; <sup>(6)</sup> LANUV, 2007; <sup>(7)</sup> LGC, 2012; <sup>(8)</sup> SGR, 2004, <sup>(9)</sup> Kümmerer, 2004

Die Daten zur aquatischen Toxizität der Human-Pharmazeutika überschreiten im Allgemeinen die gemessenen Konzentrationen in den Gewässern deutlich. Angaben zum Tiermedikament Sulfadimidin liegen nicht vor und Angaben zur aquatischen Toxizität von Chloroquin sind in der Literatur nur als EC<sub>50</sub>-Konzentration für *Daphnia magna* vorhanden. Die in Tabelle 21 aufgeführten Werte des Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten ( $K_{ow}$ ) stellen ein Maß für die Wasserlöslichkeit der Medikamente dar. Bei einem Wert unter 1 sind sie hydrophil

und mit zunehmendem  $K_{OW}$ -Wert nimmt die Lipophilie der Substanzen zu. Der  $K_{OW}$ -Wert wird zu einem besseren Verständnis der Verteilung der verschiedenen Stoffe in den Umweltkompartimenten herangezogen. Die Beurteilung der experimentell ermittelten Verteilungskoeffizienten über die genaue Verteilung in Wasser, Boden, Luft, Pflanzen oder tierischem Gewebe ist aber nur eingeschränkt möglich, da die Wechselwirkung der Inhaltsstoffe der unterschiedlichen Umweltkompartimente auf die Anreicherungseigenschaften der im Experiment als klar hydrophil oder lipophil analysierten Stoffe Einfluss nimmt.

#### **3.4.2.6 Urinlagerungsversuche bei unterschiedlichen pH-Werten**

Frischer Urin aus einem Lagertank im GIZ-Gebäude wurde auf zwölf 5-Liter Glasflaschen verteilt, der pH-Wert mit HCl bzw. NaOH auf jeweils pH 3, 6,5, 8,5, 9,5 und 11 eingestellt, sechs Flaschen mit Pharmazeutika gespikt (jeweils  $100 \mu\text{g l}^{-1}$  der acht untersuchten Wirkstoffe) und diese mit parallelen ungespikten Proben und einer originären Probe bei  $20^\circ\text{C}$  sechs Monate im Dunkeln gelagert (Tabelle 22). Da zum Zeitpunkt des Beginns dieser Untersuchungen die Pharmazeutika noch nicht als reine Wirkstoffe zur Verfügung standen, resultierte die Aufstockung mit Medikamenten in einer Konzentrationszunahme von ca.  $700 \text{ mg l}^{-1}$  CSB bei einem Ausgangs-CSB von  $1.700 \text{ mg l}^{-1}$ , die durch die Additiva der verschiedenen Medikamente verursacht wurde. In wöchentlichen und später monatlichen Abständen wurden insgesamt 132 Proben entnommen und die Veränderung der Konzentrationen der Pharmazeutika sowie der Parameter CSB, Ammonium-Stickstoff und Phosphor in den Proben untersucht.

Tabelle 22: Versuchsansatz der Urinlagerungsversuche.

	Flasche 1	Flasche 2	Flasche 3	Flasche 4	Flasche 5	Flasche 6
<b>Medikamente</b>	<b>unveränderter Urin</b>		<b>pH 3</b>		<b>pH 6,5</b>	
<b>Bisoprolol</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Carbamazepin</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Chloroquin</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Diclofenac</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Metoprolol</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Sulfamethazin</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Tramadol</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Ibuprofen</b>	-	+	-	+	-	+
	Flasche 7	Flasche 8	Flasche 9	Flasche 10	Flasche 11	Flasche 12
<b>Medikamente</b>	<b>pH 8,5</b>		<b>pH 9,5</b>		<b>pH 11</b>	
<b>Bisoprolol</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Carbamazepin</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Chloroquin</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Diclofenac</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Metoprolol</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Sulfamethazin</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Tramadol</b>	-	+	-	+	-	+
<b>Ibuprofen</b>	-	+	-	+	-	+

„-“: ohne dosierte Pharmazeutika; „+“: mit Pharmazeutika

### 3.4.2.7 Bestimmung der Daphnientoxizität

Der Test zur Bestimmung der akuten Toxizität von Stoffen oder Stoffgemischen auf *Daphnia magna* über Verdünnungsstufen wird häufig zur Überprüfung der Schadwirkung auf Organismen der aquatischen Nahrungskette eingesetzt. Der Test der Abläufe der Braunwasser- und der Grauwasseranlage erfolgte entsprechend DIN 38412 Teil 30. Als Schädigung der Daphnien gilt der Verlust der Schwimmfähigkeit nach 24stündiger Exposition in Verdünnungsstufen, die nach ganzzahligen Volumenverhältnissen abgestuft sind. Als Ergebnis des Tests wird die Verdünnungsstufe angegeben, bei der keine Schädigung der Daphnien eingetreten ist.

## 3.4.3 Ergebnisse und Diskussionen

### 3.4.3.1 Lagerungsversuche mit Urin

Den im Keller der GIZ aufgestellten Urinlagerbehältern wurden im Laufe der Projektbearbeitung mehrfach Proben entnommen (siehe Tabelle 13). Durch diese Probenahmen sollte versucht werden, die Variationen im Pharmazeutika-, Stickstoff- und Phosphorgehalt während der Projektlaufzeit zu erfassen. Bedingt durch das Aufsuchen der NoMix-Toiletten und Urinale durch wechselnde Nutzer und das für den Betrieb der Urinfällungsanlage notwendige kontinuierliche Befüllen und Entleeren der Urintanks ist eine Analyse zur Veränderung der

Pharmazeutikazusammensetzung über den Jahresverlauf und zum Verhalten der verschiedenen Urin-Inhaltsstoffe über die Projektlaufzeit nicht möglich. Jedes, der bei den Probenahmen im GIZ-Gebäude erzielten Untersuchungsergebnisse, muss getrennt betrachtet werden.

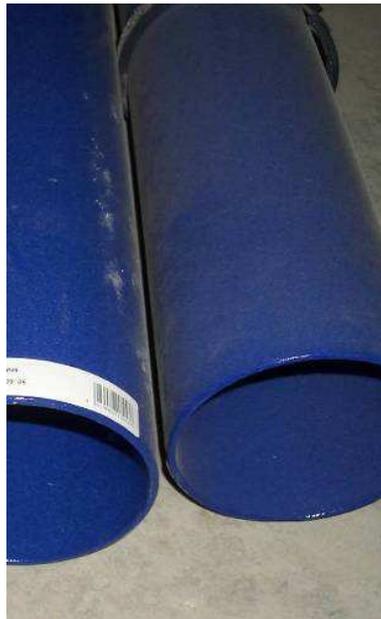
Zu Beginn des Projektes wurden je eine Probe aus den Tanks 1 und 3 entnommen. Tank 1 war im Vorfeld der Probenahme (09.11.2009) in der Zeit zwischen dem 15.10. und 02.11.2009 befüllt worden. Der Urin in Tank 3 lagerte bereits seit Mai 2008 in diesem Tank. Das Ergebnis der ersten Beprobung im Hinblick auf die untersuchten Standardparameter sowie die Ergebnisse der weiteren Beprobungen von Tank 3 sind in Tabelle 23 dargestellt.

**Tabelle 23: Ergebnisse der Beprobung der Urinlagertanks im GIZ-Gebäude.**

Datum	Tank	pH	Lf	AFS	CSB <sub>hom</sub>	BSB <sub>5</sub>	N <sub>ges</sub>	NH <sub>4</sub> -N	P <sub>ges</sub>	PO <sub>4</sub> -P
		[ - ]	[mS cm <sup>-1</sup> ]	[g l <sup>-1</sup> ]	[mg l <sup>-1</sup> ]					
09.11.09	1	9,04	15,4	0,093	2000	1060	2130	1790	125	124
	3	8,56	23,0	0,200	847	413	3110	2730	194	190
10.12.09	3	8,53	23,7	0,190	820	-	3020	2630	173	170
08.07.10	3	8,48	17,2	0,138	804	37	3110	2560	199	196
25.08.10	3	8,63	24,0	0,163	878	23	3270	2640	176	169
08.11.10	3	8,65	23,2	0,125	867	29	3250	2610	168	162

Während in Tank 1 die Werte des frischen Urins gemessen werden konnten, zeigten die gemessenen Konzentrationen in Tank 3 eine deutlich niedrigere Konzentration der CSB- und BSB-Werte, die auf die lange Lagerungszeit des Urins in Tank 3 zurück zu führen ist. In den folgenden Monaten wirkte sich der biologische Abbau in Tank 3 nur bei der BSB<sub>5</sub>-Konzentration aus. Weitere Angaben von Standardparametern der Urinlagertanks sind den Beschreibungen der Untersuchungen zur Urinfällungsanlage (vgl. Kapitel 3.3.3.2) zu entnehmen, da der Zulauf aus den Lagertanks erfolgte.

Die gleichzeitig erhobenen Werte über die Schwermetallgehalte (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn) zeigten, dass die Konzentrationen im Urin in allen Fällen unter den niedrigen Werten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2001) lagen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine Anwendung in der Landwirtschaft (für Details hierzu siehe Kapitel 3.5) in Bezug auf die Verbreitung von Schwermetallen keine schädlichen Folgen haben wird. Es muss angemerkt werden, dass das Urinleitsystem aus Gussrohren mit Emaillelack besteht, weshalb hier nicht mit einer Schwermetallbelastung aus den Leitungen zu rechnen ist (Abbildung 50).



**Abbildung 50: Gussrohre des Urinleitsystems.**

Die Ergebnisse der ersten Pharmazeutika-Untersuchung aus Tank 1 und Tank 3 vom 09.11.09 sind in Tabelle 24 aufgelistet. Da aus Gründen des Datenschutzes und ethischen Aspekten bei den Toilettennutzern keine Angaben über die Einnahme von Medikamenten erhoben werden konnten, musste ein Screening auf Medikamente vorgenommen werden und auf diese Weise zunächst identifiziert werden, welche Medikamente überhaupt für die weiteren Untersuchungen relevant sind.

**Tabelle 24: Qualitativer Nachweis von Medikamenten in Tank 1 und Tank 3 (M<sub>mono</sub> = Masse monoisotopisch, +/- = positiv oder negativ ionisiert, m/z = Verhältnis Masse zu Ladung, RT = Retentionszeit), o = in den Tanks nachgewiesen.**

Name	Wirkstoffgruppe	Summenformel	M <sub>mono</sub>	+/-	m/z	RT	Tank 1	Tank 3
Bisoprolol	β-Blocker	C <sub>18</sub> H <sub>31</sub> NO <sub>4</sub>	325,2253	+	326,2326	9,5	o	o
Ciprofloxacin	Antibiotikum	C <sub>17</sub> H <sub>18</sub> FN <sub>3</sub> O <sub>3</sub>	331,1332	+	332,1405		o	o
Coffein							o	
Diclofenac	Schmerzmittel	C <sub>14</sub> H <sub>11</sub> Cl <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	295,0167	+	296,0231	14,4	o	o
Gemfibrozil	Lipidsenker	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>3</sub>	250,3330				o	o
Ibuprofen	Schmerzmittel	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	206,1307	-	205,1234	14,9	o	o
Metoprolol	β-Blocker	C <sub>15</sub> H <sub>25</sub> NO <sub>3</sub>	267,1834	+	268,1907	9,2	o	o
Moxifloxacin	Antibiotikum	C <sub>21</sub> H <sub>24</sub> FN <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	401,7508					o
Paracetamol	Schmerzmittel	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>2</sub>	151,0633	+	152,0706	3,8	o	
Phenazone	Schmerzmittel	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O	188,0950				o	
Sulfadimidin (Sulfamethazin)	Antibiotikum	C <sub>12</sub> H <sub>14</sub> N <sub>4</sub> O <sub>2</sub> S	278,0837	+	279,0910		o	o
Tramadol	Schmerzmittel	C <sub>16</sub> H <sub>25</sub> NO <sub>2</sub>	263,1885	+	264,1958	7,6	o	o

In die weiteren Untersuchungen wurden nur Pharmazeutika eingeschlossen, die entweder in beiden Tanks nachzuweisen waren (o, Tabelle 24) oder wegen einer besonderen Fragestellung weiter betrachtet wurden (Chloroquin = Malariawirkstoff). Der Nachweis der Medika-

mente auch in Tank 3 ist ein Hinweis auf schlechte Abbaubarkeit. Die nicht für die weiteren Untersuchungen ausgewählten Medikamente wie z.B. Ciprofloxacin und Moxifloxacin wurden ausgeschlossen, da die Reduktion auf eine geringere Anzahl von Medikamenten zu einer Erhöhung der Analysenzahl und damit einer Verbesserung der Aussagekraft der Untersuchungen führte.

Um das Verhalten der verschiedenen Pharmazeutika unter definierten Laborbedingungen zu untersuchen, wurden über sechs Monate Abbaubersuche durchgeführt. Dieser Zeitraum wurde gewählt, weil vor der Verbringung von Urin in der Landwirtschaft eine sechsmonatige Lagerung von der WHO empfohlen wird (WHO, 2006). Die Ergebnisse sind in Abbildung 51 und Tabelle 25 dargestellt.

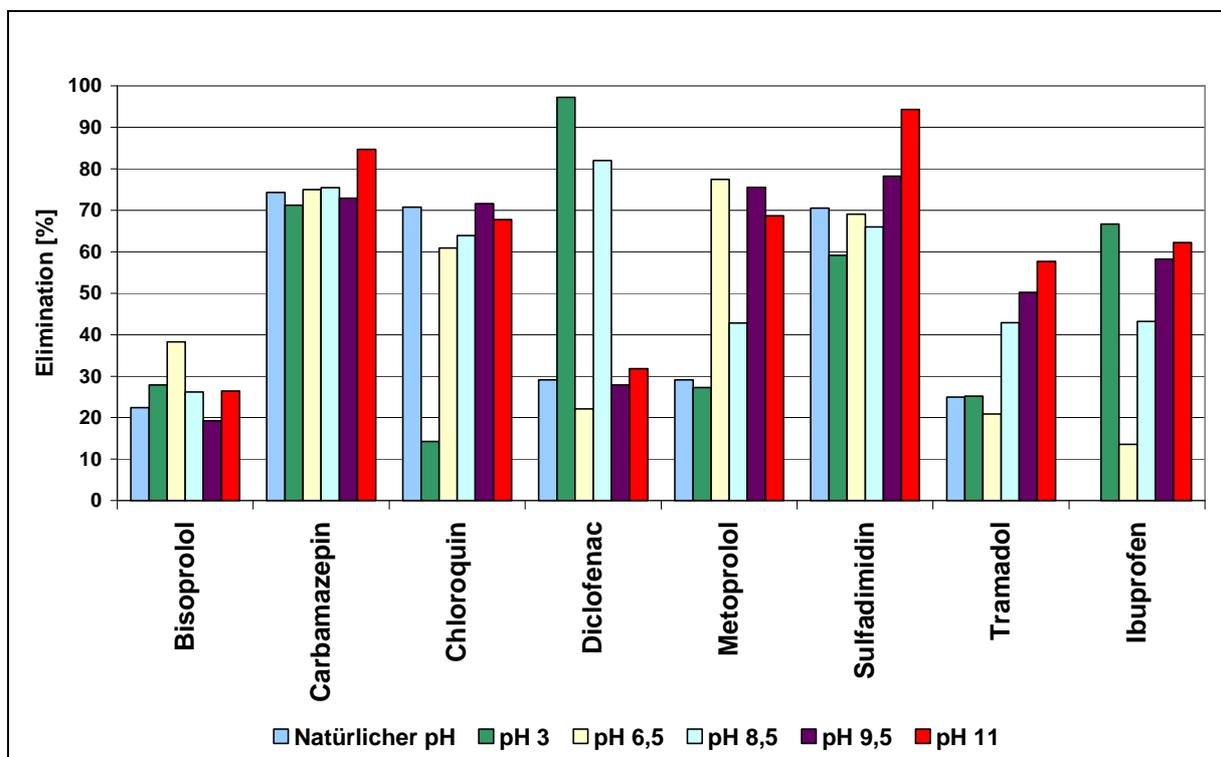
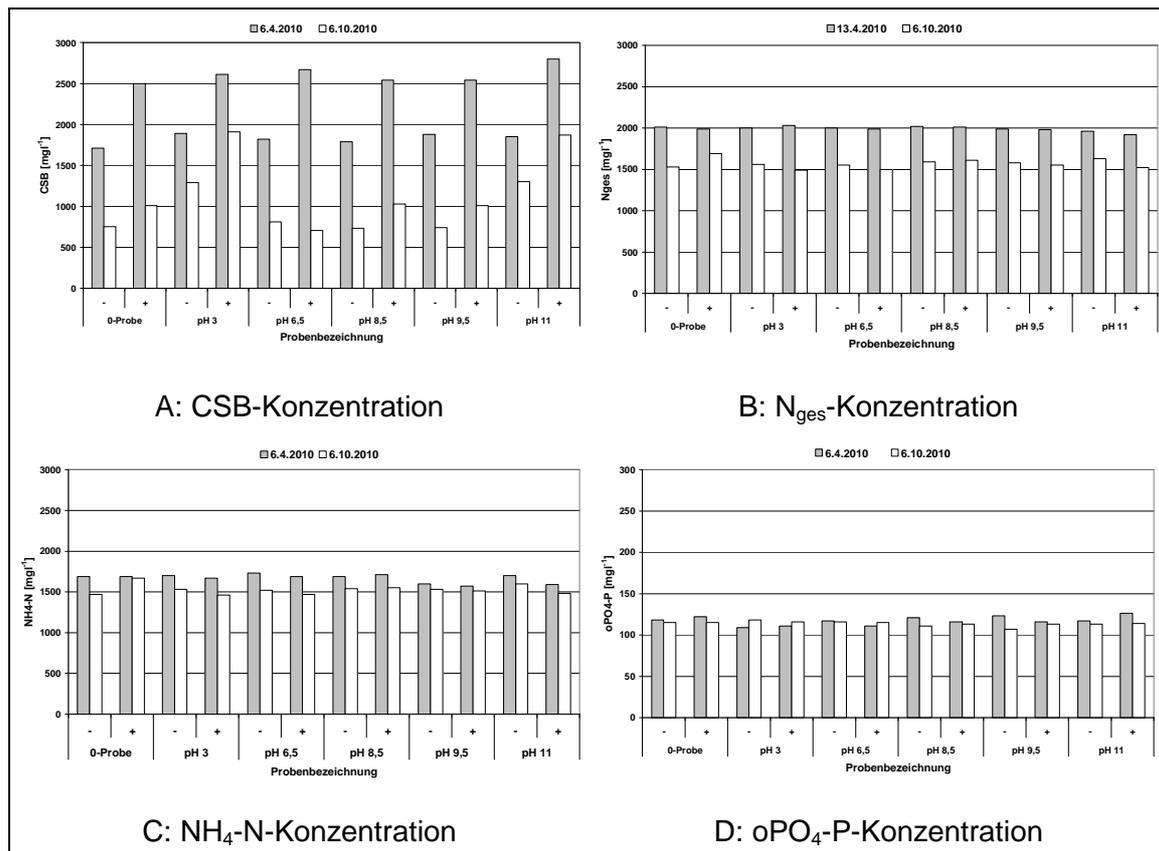


Abbildung 51: Elimination der Pharmazeutika während der Lagerung bei unterschiedlichen pH-Werten.

**Tabelle 25: Bewertung des Eliminationsgrades von Pharmazeutika in Urin bei unterschiedlichen pH-Werten. „-“ = <10%; „-“ = 10 - <30%; „+“ = 30 - <60%; „+“ = 60 - <80%; „+“ = ≥80%.**

Pharmazeutika	Nullprobe	pH 3	pH 6,5	pH 8,5	pH 9,5	pH 11
Bisoprolol	-	-	+ -	-	-	-
Carbamazepin	+	+	+	+	+	++
Chloroquin	+	-	+	+	+	+
Diclofenac	-	++	-	++	-	-
Metoprolol	-	-	+	+ -	+	+
Sulfadimidin	+	+ -	+	+	+	++
Tramadol	-	-	-	+ -	+ -	+ -
Ibuprofen	--	+	-	+ -	+ -	+

Eliminationsraten der Pharmazeutika von über 90% konnten während der Lagerung nur bei Diclofenac im stark sauren Bereich (pH 3,0) und Sulfadimidin im stark alkalischen Bereich (pH 11) erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass die hohen Eliminationsraten auf eine chemische Reaktion der Medikamente zurückzuführen sind, da schon nach 14 Tagen nur noch 15% der eingesetzten Menge von Sulfadimidin nachzuweisen waren. Bei Diclofenac sank die Konzentration im stark sauren Bereich in den ersten zwei Wochen bereits um 62 %, um dann asymptotisch weiter abzunehmen. Eine eher durch chemische Reaktion bedingte Elimination ist auch bei Carbamazepin bei pH 11 (85%) als wahrscheinlich anzunehmen. Im unveränderten Urin (Nullprobe) zeigten nur Chloroquin und Sulfadimidin nennenswerte Abbaugrade von 71%. Dieses Ergebnis wurde durch die Untersuchungen in dem auf pH 6,5 eingestellten Urin bestätigt. Zusätzlich zu den Veränderungen der Pharmazeutikakonzentrationen wurden auch Konzentrationsänderungen der Standardparameter detektiert (Abbildung 52).



**Abbildung 52: Konzentrationen der Parameter CSB, Gesamtstickstoff, Ammonium-Stickstoff und ortho-Phosphat zu Beginn und am Ende der Lagerungsversuche.**

Die zu Beginn der Versuche deutlich erhöhten CSB-Konzentrationen der gespikten Versuchsansätze (+) sind auf die Additiva der Medikamente zurück zu führen. Es handelt sich dabei in der Mehrzahl der Fälle um Kohlenhydrate wie Mikrozellulose, Milchzucker, Saccharose, Maisstärke und andere Stoffe, die einen starken Anstieg der CSB-Konzentration verursachen. Aus diesen erhöhten Ausgangskonzentrationen des CSB resultierten auch die im Mittel erhöhten CSB-Eliminationsraten, wie in Abbildung 53 und Tabelle 26 dargestellt. Die Verschiebung des pH-Wertes in den stark sauren bzw. stark alkalischen Bereich führte zu einer Einschränkung der CSB-Eliminationsrate, da hier nur ein geringer mikrobiologischer Abbau möglich ist.

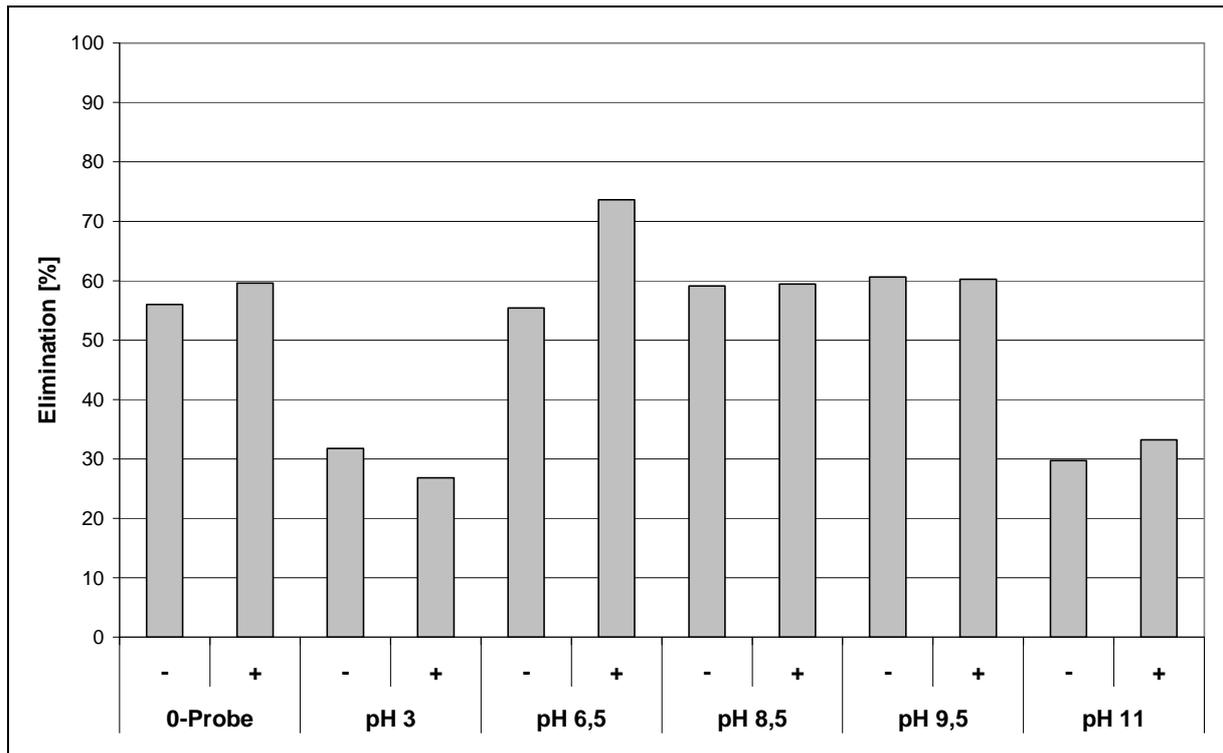
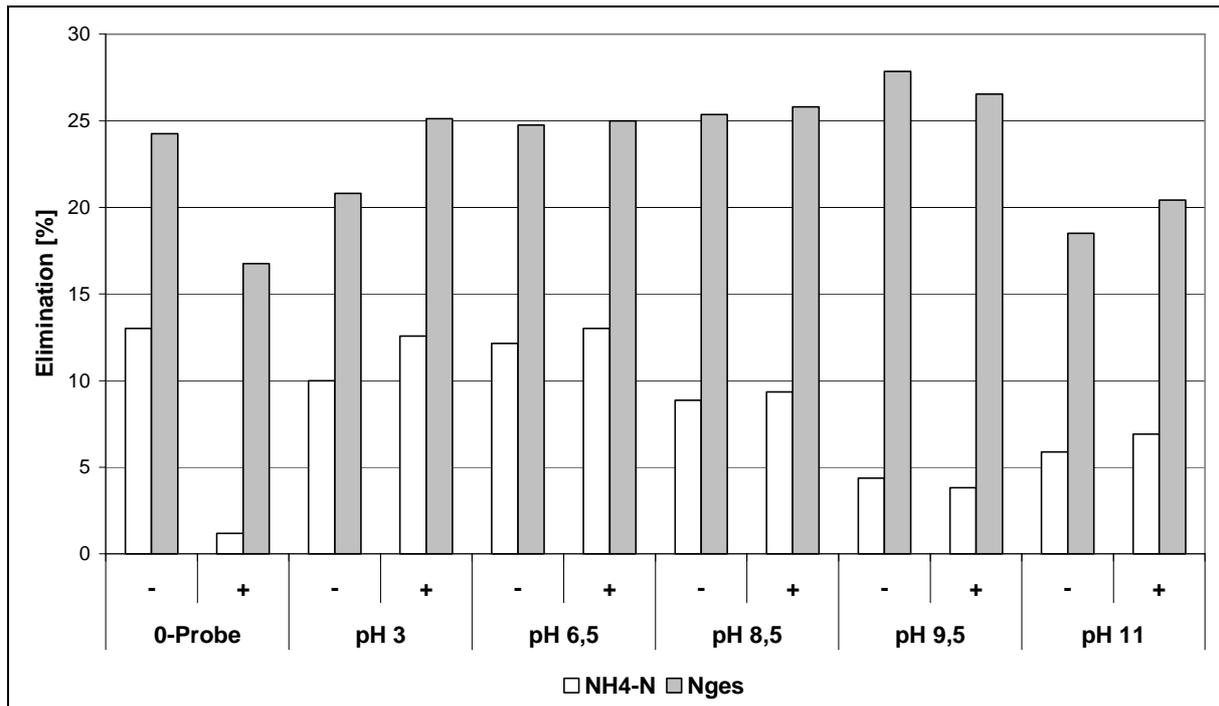


Abbildung 53: CSB-Elimination während der Lagerungsversuche über 6 Monate.

Tabelle 26: Statistische Werte der CSB-Eliminationsleistung.

CSB	pH	ungespikt	pH	gespikt
	[-]	[%]	[-]	[%]
Mittelwert		48,8		52,2
min	11	29,7	3,0	26,8
max	9,5	60,6	6,5	73,6

Der mittleren Eliminationsrate des Parameters Gesamtstickstoff von 23,6% (ungespikte Proben) bzw. 23,3% (gespikte Proben) stehen 9,0% (ungespikte Proben) bzw. 7,8% (gespikte Proben) beim Ammonium-Stickstoff gegenüber. Das im Urin vorhandene Enzym Urease sorgt während der Lagerzeit des Urins im natürlichen Urin für eine Spaltung des Harnstoffs in Ammonium und Kohlendioxid (Udert et al., 2003). Das als Zwischenprodukt entstehende Ammoniak kann aus den Lagergefäßen ausgasen. Gleichzeitig wird auch weiter Ammonium-Stickstoff von Mikroorganismen im gelagerten Urin verbraucht. Der gleiche Effekt der Ammoniakfreisetzung tritt bei stark saurem und stark alkalischen pH-Wert verstärkt auf. Auf diese Weise stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Produktion von Ammonium-Stickstoff aus Harnstoff, dem Verbrauch von Ammonium durch Mikroorganismen und dem Ausgasen von Ammoniak ein, was zu einer ungleichmäßigen Abnahme von Gesamtstickstoff und Ammonium-Stickstoff bei den verschiedenen pH-Werten führt (Abbildung 54).



**Abbildung 54: Elimination von Ammonium-Stickstoff und Gesamtstickstoff während der Lagerungsversuche über 6 Monate.**

Die gemessene ortho-Phosphat-Elimination liegt überwiegend im Bereich der Messgenauigkeit des Analysenverfahrens von 10% und kann deshalb nicht bewertet werden.

Die Lagerungsversuche mit Urin zeigen deutlich, dass die Veränderung des pH-Wertes vor der Lagerung keinen Einfluss auf die Elimination aller Medikamente hat. Hohe Eliminationen wurden je nach Wirkstoff bei stark saurem oder stark alkalischem pH-Wert erreicht. Diese Option scheidet deshalb zur gezielten Arzneimittelelimination bei der Urinlagerung aus. Die Variabilität des in gesammeltem Urin enthaltenen Medikamentencocktails ist immer ein Spiegelbild der Pharmazeutika, die von den Nutzern von Separationstoiletten bzw. wasserlosen Urinalen eingenommen und wieder ausgeschieden werden. Die direkte Verbringung von gelagertem Urin in die Landwirtschaft führt auch nach Verdünnung des Urins zu einer Verteilung von Pharmazeutika in der Umwelt, die wegen der schlechten Abbaubarkeit vieler medizinischer Wirkstoffe unbedingt vermieden werden sollte. Dabei lassen sich insbesondere an Punktquellen wie Einrichtungen des Gesundheitswesens deutliche Erfolge mit einer effizienten Behandlung der relevanten Abwasserströme mittels Membranbioreaktoren und der anschließenden Wirkung von Ozon und anderen Oxidationsmitteln erzielen (Beier, 2010).

### 3.4.3.2 Qualität des Produktes Struvit

Während der Laufzeit des Projektes wurde in der Urinfällungsanlage (Aufbau vgl. Kapitel 3.2.2.1.1) regelmäßig Struvit ausgefällt. Die Beschreibung der Experimente ist Kapitel 3.3.2.1 zu entnehmen. Im ISA der RWTH erfolgte die Bestimmung der Pharmazeutika-Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Anlage. Des Weiteren wurden Trocknungsversuche mit dem Fällprodukt Struvit durchgeführt, da ein rieselfähiges Präparat für den Einsatz als Dünger vorliegen muss.

Die Ergebnisse der Pharmazeutikaanalytik sind in Abbildung 55 dargestellt. Es wurden nur die Wirkstoffe analysiert, die Gegenstand der Lagerungsversuche gewesen sind und bei der ersten Urinuntersuchung am 9.11.2009 detektiert worden waren. Sulfadimidin und Chloroquin konnten nicht nachgewiesen werden und wurden somit nicht weiter betrachtet.

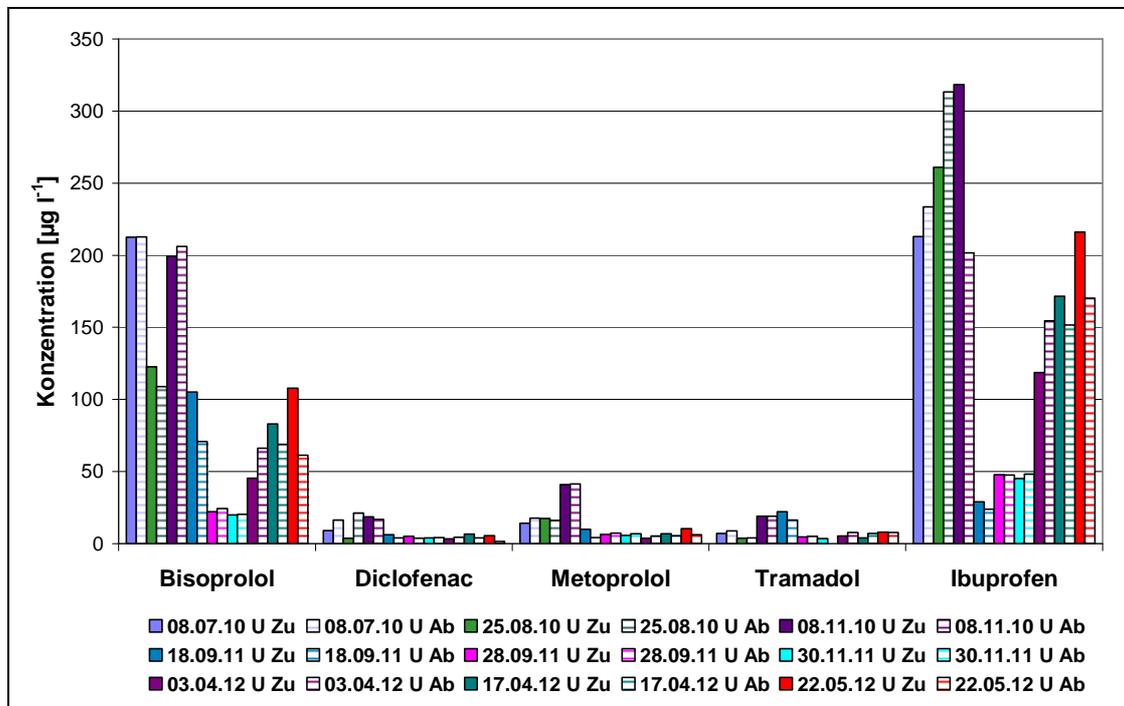
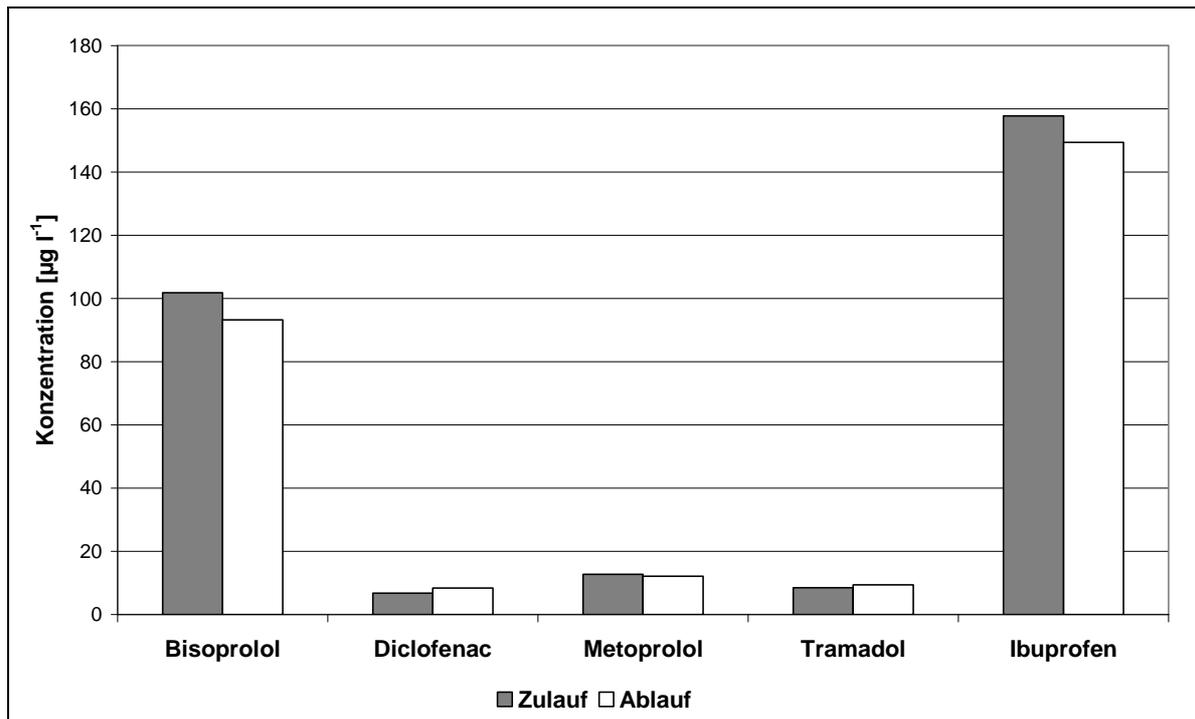


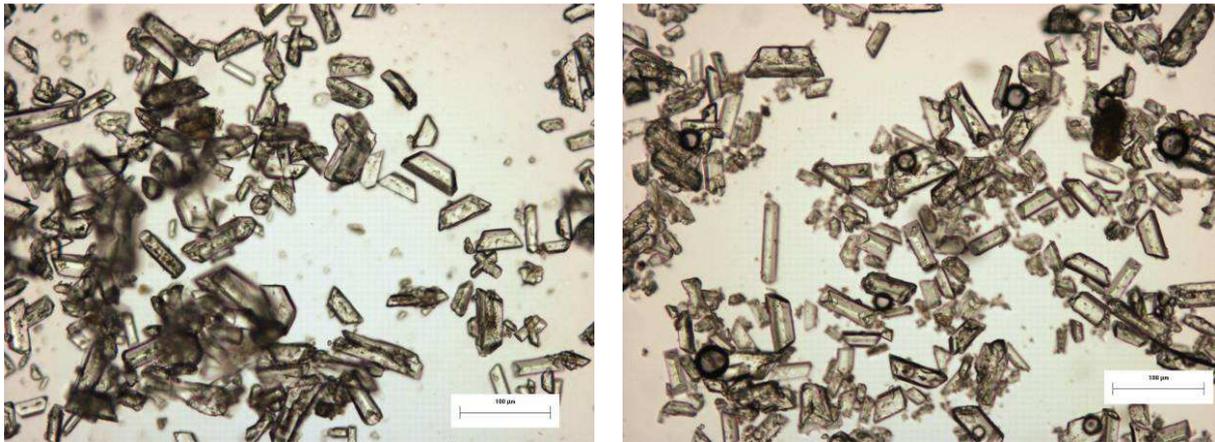
Abbildung 55: Pharmazeutikakonzentrationen im Zulauf (Zu) und Ablauf (Ab) der der MAP-Fällungsanlage. LOQ  $\leq 1 \text{ mg l}^{-1}$ .

Alle Proben wurden dem Tank entnommen, aus dem zur gleichen Zeit die Beschickung der Urinfällungsanlage erfolgte, sowie die Ablaufproben aus der Überlaufleitung des Fällungsreaktors zum städtischen Kanal. Über den Probenahmezeitraum schwanken die Konzentrationen der einzelnen Pharmazeutika stark. Ibuprofen z.B. wurde in Konzentrationen zwischen  $29 \text{ µg l}^{-1}$  und  $318 \text{ µg l}^{-1}$  im Zulauf aus dem zum jeweiligen Probenahmezeitpunkt genutzten Urintank detektiert. Die im Mittel hohen Ibuprofenkonzentrationen im Urin spiegeln die hohe Verbrauchsmenge des frei verkäuflichen Schmerzmittels in Deutschland wider. Der gemessen an den verschriebenen Tagesdosen in Deutschland häufiger verordnete Betablocker Metoprolol konnte in geringerer Konzentration als der Betablocker Bisoprolol nachgewiesen werden (Paffrath und Schwabe, 2008). Ursache wird einerseits der unterschiedliche renale Ausscheidungsgrad der beiden Medikamente sein (Bisoprolol 50%, Metoprolol 13%), andererseits können auch die Verschreibungsgewohnheiten für Betablocker der Ärzte im Raum Frankfurt Einfluss nehmen. Die Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen sind in Abbildung 56 dargestellt.



**Abbildung 56: Mittelwerte der Zu- und Ablaufkonzentrationen der Urinfällungsanlage im Zeitraum 8.7.2010 bis 22.5.2012 analog zu Abbildung 55.**

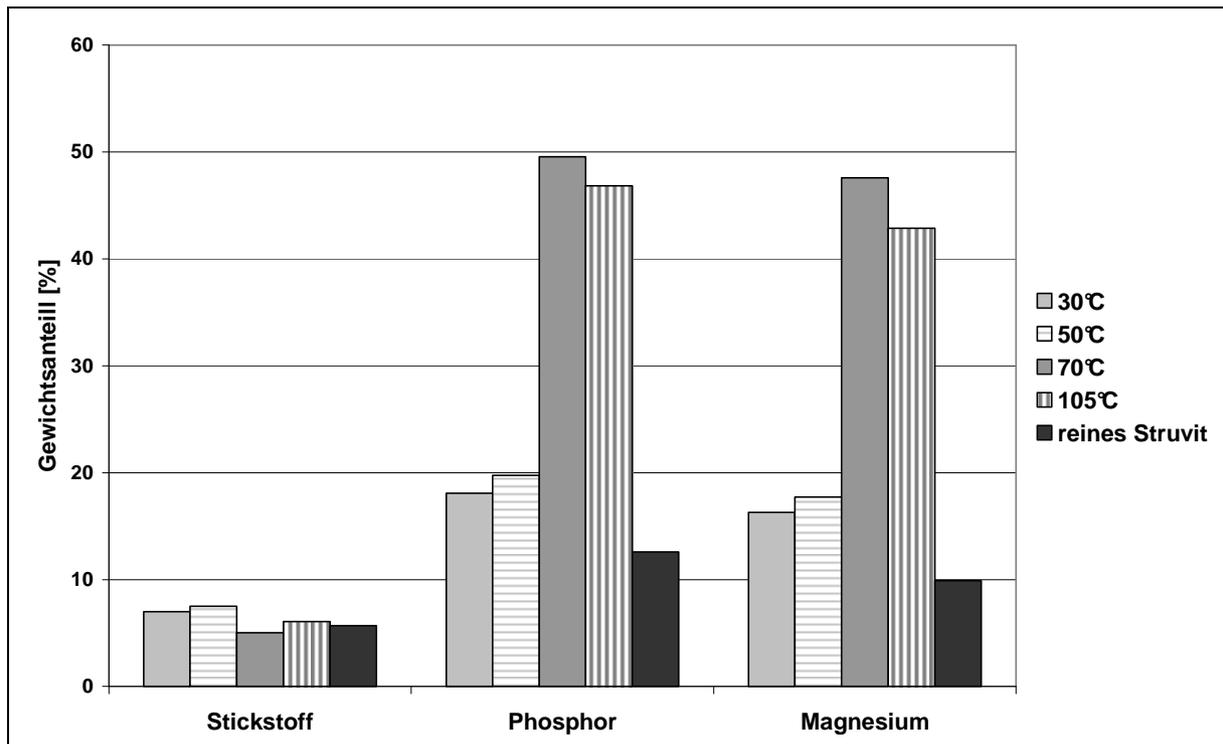
Die an einigen Versuchstagen wahrzunehmende Verminderung des Pharmazeutikagehaltes im Ablauf des Fällungsreaktors legt die Vermutung nahe, dass die Pharmazeutika an das Fällprodukt Struvit angelagert werden. Aus Voruntersuchungen des ISA ist bekannt, dass sich bei der Fällung von gespiktem Urin Pharmazeutika am Fällprodukt nachweisen lassen (Montag et al., 2009). Durch Waschen mit gesättigter Magnesium-Ammonium-Phosphat-Lösung wurden die Medikamentenrückstände entfernt. Da dem Urin im Rahmen des Projektes bei der Fällung keine Arzneimittel künstlich zugesetzt wurden, galt es zu klären, ob hier ebenfalls Medikamente am Fällprodukt nachzuweisen sind. In Abbildung 57 sind gewaschene und ungewaschene Struvit-Kristalle in mikroskopischen Aufnahmen dargestellt. Es ist kein Unterschied in der Größe und Struktur der Kristalle festzustellen, die auf größere Verunreinigungen vor dem Waschen schließen lassen.



**Abbildung 57: Mikroskopische Aufnahmen von Struvit-Kristallen (Größenangabe 100 µm).  
Links: Ungewaschene Struvitkristalle; Rechts: Gewaschene Struvitkristalle.**

Bei der Untersuchung der Struvitkristalle auf die im Urin vorhandenen Pharmazeutika lagen bei den ungewaschenen und gewaschenen Kristallen von insgesamt 10 Untersuchungen die Pharmazeutikakonzentrationen unterhalb der Quantifizierungsgrenze (LOQ) von  $1 \mu\text{g kg}^{-1}$ . Dies ist als Nachweis anzusehen, dass durch die Fällung von natürlichem Urin als Struvit eine Verbreitung der hier untersuchten Pharmazeutika in der Umwelt weitgehend ausgeschlossen werden kann.

Da Struvit für den Gebrauch als Düngemittel in rieselfähiger Form vorliegen muss, ist eine Trocknung des den Filterbeuteln entnommenen Fällproduktes notwendig. Untersuchungen des Verhaltens der verschiedenen Fällproduktinhaltsstoffe bei unterschiedlichen Trocknungstemperaturen sowie die jeweiligen Anteile bei reinem Struvit sind in Abbildung 58 wiedergegeben.



**Abbildung 58: Verteilung der Gewichtsanteile von Stickstoff, Phosphor und Magnesium nach Trocknung des Fällproduktes bei unterschiedlichen Temperaturen (Mittelwert aus drei Untersuchungen) und in reinem Struvit ((NH<sub>4</sub>)Mg[PO<sub>4</sub>] • 6 H<sub>2</sub>O).**

Die Veränderung der Molverhältnisse von Stickstoff, Phosphor und Magnesium im Struvit bei der Trocknung demonstriert Tabelle 27. Beide Darstellungen (Abbildung 58 und Tabelle 27) zeigen deutlich, dass es bei der Trocknung von Struvit bei Temperaturen oberhalb von 50°C zu einem Stickstoff-Verlust von ca. 50% im Dünger kommt, wie bereits von Schulze-Rettmer und Yawari (1988) beschrieben. Durch den Verlust an Kristallwasser erhöhen sich die prozentualen Anteile an Phosphor und Magnesium, insbesondere bei den Temperaturen 70 und 105°C signifikant. Die im Verhältnis zu reinem Struvit höheren Anteile der Struvitinhaltstoffe (P, Mg) könnten auch durch das Auftreten anderer mineralischer und organischer P- oder Mg-haltiger Bestandteile verursacht sein, die sich durch das Waschen mit gesättigter Struvitlösung nicht entfernen lassen.

Das Waschen mit gesättigter Magnesium-Ammonium-Phosphat-Lösung allein zieht keine Veränderung der molaren Verhältnisse von Stickstoff, Phosphor und Magnesium nach sich. Da der Gehalt an Stickstoff für die Düngung eine wesentliche Rolle spielt, müssen laut Düngemittelverordnung bei einer industriellen Herstellung von Struvit genaue Angaben über die Molverhältnisse für den Anwender vorliegen, um einen Mangel aber auch eine Überdosierung von Stickstoff auszuschließen. Gleichzeitig ist anzumerken, dass eine Trocknung bei nur 30°C energetisch günstiger ist als bei höheren Temperaturen, zudem noch je nach Produktionsstandort Abwärme für den Trocknungsprozess genutzt und Energie eingespart werden könnte.

**Tabelle 27: Veränderung der Molverhältnisse der Struvitinhaltstoffe unter dem Einfluss der Trocknungstemperatur.**

Temperatur [°C]	Molverhältnisse		
	Stickstoff	Phosphor	Magnesium
30	0,86	1,00	1,15
50	0,84	1,00	1,14
70	0,21	1,00	1,16
105	0,29	1,00	1,17

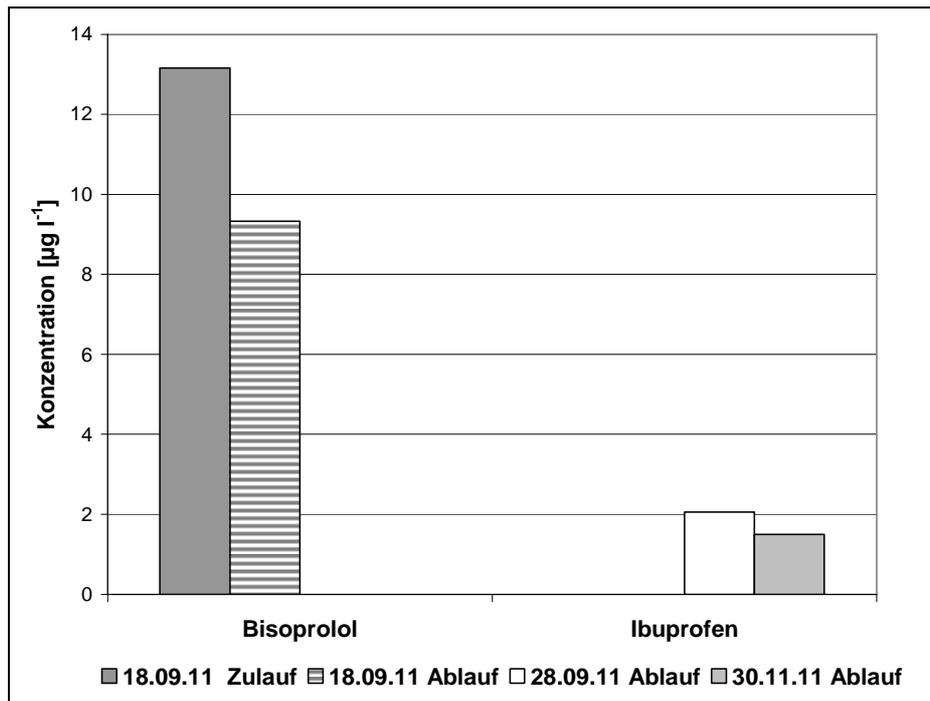
Bei zusätzlichen Untersuchungen wurde auch der Gehalt des Struvits an weiteren Hauptinhaltsstoffen überprüft. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 aufgelistet. Die stark schwankenden Gewichtsanteile bei Stickstoff, Phosphor und Magnesium sind auf die unterschiedliche Dosierung von MgO zur Fällung zum Zeitpunkt der Probenahme zurück zu führen und werden im Berichtsteil zu den Untersuchungen zum Betrieb des Fällungsreaktors genauer beleuchtet (vgl. Kapitel 3.3.3.4).

**Tabelle 28: Ergebnisse der Elementanalysen von Struvit (ungewaschenes Fällprodukt) nach Trocknung bei 30°C.**

N	P	Mg	K	Na	Ca	S
[g kg <sup>-1</sup> ]						
51,80	101,00	106,00	3,78	2,82	13,80	-
52,30	96,20	127,00	3,79	2,83	4,88	-
39,80	89,30	132,00	3,71	2,71	5,98	-
48,00	111,00	111,00	3,45	1,81	10,70	1,02
53,00	119,00	95,40	3,83	2,61	13,00	1,40
55,00	123,00	99,60	3,67	2,35	14,30	1,30

### 3.4.3.3 Nachweis von Pharmazeutika und Tensiden in den Grau- und Braunwasserbehandlungsanlagen

Während des Betriebs der Grau- sowie der Braunwasserbehandlungsanlage wurden wiederholt Analysen zum Nachweis von Pharmazeutika und Tensiden durchgeführt (siehe Tabelle 13). Während erwartungsgemäß weder im Zulauf noch im Ablauf der Grauwasserbehandlungsanlage Pharmazeutika nachzuweisen waren, konnten in der Braunwasserbehandlungsanlage Bisoprolol und Ibuprofen nachgewiesen werden (Abbildung 59). Diese Medikamente werden zu einem geringen Prozentsatz auch über die Fäzes ausgeschieden und konnten deshalb in niedrigen Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Braunwasserbehandlungsanlage nachgewiesen werden. Bei den anderen analysierten Medikamenten unterschritt die Konzentration die Quantifizierungsgrenze von 1 µg l<sup>-1</sup>. Ein direkter Bezug zu den an den gleichen Tagen gezogenen Proben aus der Urinfällungsanlage kann nicht hergestellt werden, da der Urin, der in der Fällungsanlage behandelt wurde, nicht zeitgleich mit dem Braunwasser der Braunwasserbehandlungsanlage angefallen ist.



**Abbildung 59: Nachweis von Pharmazeutika in Einzelproben von Zu- und Ablauf der Braunwasserbehandlungsanlage.**

Die hohe Konzentration an Bisoprolol in der Probe vom 18.9.2011 korrespondiert mit der hohen Bisoprolol-Konzentration des Zulaufs der Urinfällungsanlage vom gleichen Tag (Abbildung 59), die dort  $212 \mu\text{g l}^{-1}$  betrug. Bisoprolol ist in Abwasserreinigungsanlagen zu 55% biologisch abbaubar (Universität Dortmund, 2006). Ob dieser Eliminationsweg auch in der Braunwasserbehandlungsanlage ausschlaggebend war oder eher Sorptionseffekte des belebten Schlammes wirksam waren, kann anhand dieses hier dargestellten Ergebnisses nicht belegt werden, da sich in keiner der anderen untersuchten fünf Proben aus der Braunwasserbehandlungsanlage Bisoprolol nachweisen ließ. Nur Ibuprofen konnte in zwei Proben aus dem Ablauf der Braunwasserbehandlungsanlage detektiert werden.

Die Grauwasserbehandlungsanlage wird mit Wasser aus 7 Teeküchen mit Spülbecken und Spülmaschinen, 2 Spülbecken, 19 Handwaschbecken in Toilettenräumen und 10 Putzwaschbecken beschickt. Wegen des Fehlens von Duschen ist im Zulauf der Anlagen nicht mit Medikamenten-Rückständen zu rechnen. Der Grauwasserbehandlungsanlage fließen hingegen Wasser mit Coffein und Tensiden zu. Während der 2012 erfolgten drei Probenahmen konnten bei zwei Terminen Proben aus dem Zulauf der Anlage entnommen werden. Zum Zeitpunkt der dritten Probenahme war der Vorlagebehälter für das Entnehmen einer Probe nicht ausreichend gefüllt. Die Konzentration an Coffein im Zulauf der Grauwasserbehandlungsanlage betrug  $2.045$  und  $1.956 \mu\text{g l}^{-1}$ . Im Ablauf der Anlage konnte kein Coffein mehr nachgewiesen werden ( $<1 \mu\text{g l}^{-1}$ ).

Abbildung 60 ergänzt die Analysenergebnisse der Grauwasserbehandlungsanlage. Dort sind die Tensid-Massenspektren der Zulauf-Proben dargestellt. Nach 50-facher Anreicherung der Proben treten bei der Untersuchung auf neutrale Tenside nur schwache Tensid-Signale auf.

Die Signale von SAS (Sekundäre Alkylsulfonate) und LAS (Lineare Alkylbenzolsulfonate) ließen sich isolieren. Diese beiden Tensidgruppen sind Bestandteile von handelsüblichen Haushaltsreinigern. Auf Grund der Signalhöhen im XIC (Extracted Ion Chromatogramm) können die Konzentrationen eher als niedrig eingeschätzt werden. Die gute biologische Abbaubarkeit der eingesetzten Tenside wird demonstriert durch um den Faktor 10 kleinere Signalhöhen in den unspezifischen Tensidspektren der Permeatproben der Grauwasserbehandlungsanlage (Abbildung 61). Wegen der Vielzahl der in den unterschiedlichen Putz- und Reinigungsmitteln (Mittel des Reinigungspersonals: Urin- und Kalksteinlöser von Mellerud, Zitronensäure, MB Aktivreiniger von Urimat und G 467 Bucacid S von Buzil; verschiedene Spülmaschinentabs und Spülmittel in den Teeküchen; und sie Flüssigseife Tork Mevon 55 von SCA Hygiene Products AB in den Waschräumen) verwendeten Tenside ist eine genaue Spezifizierung und Identifizierung der die einzelnen Peaks verursachenden Reintenside nicht möglich.

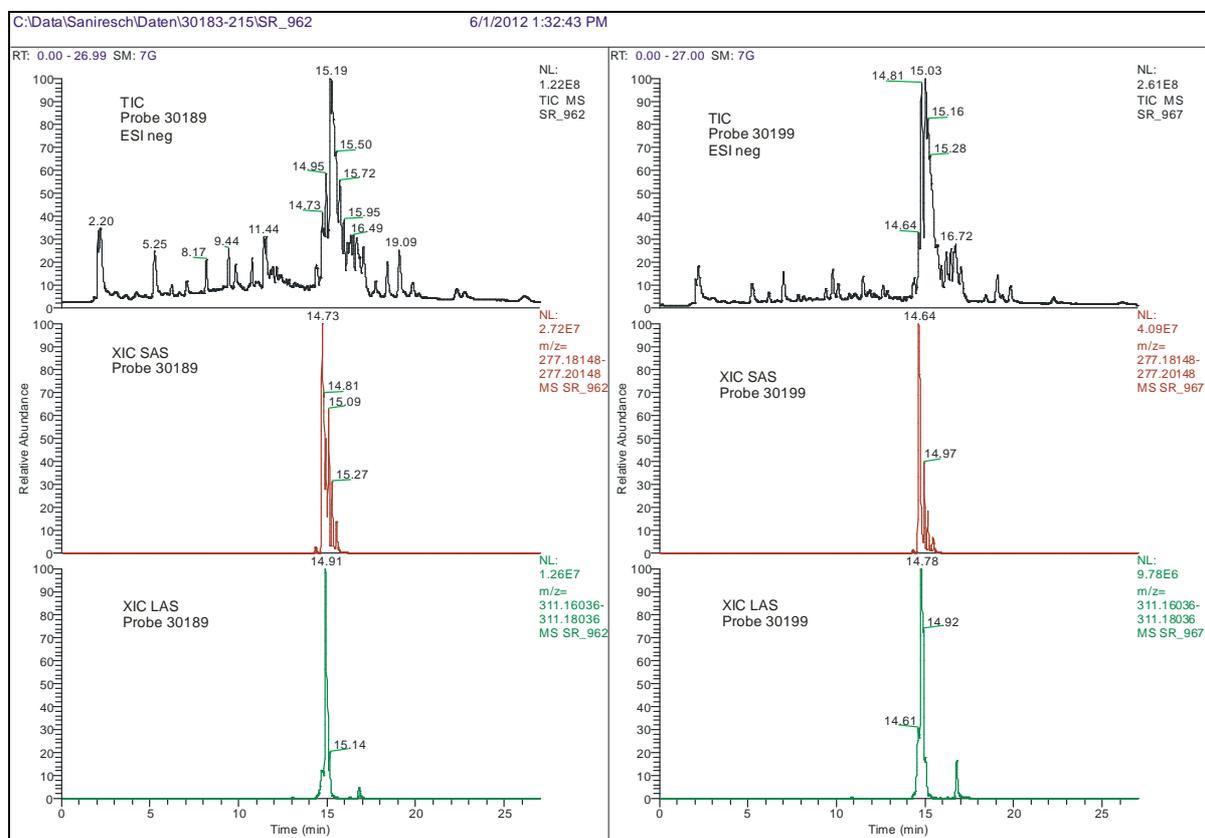
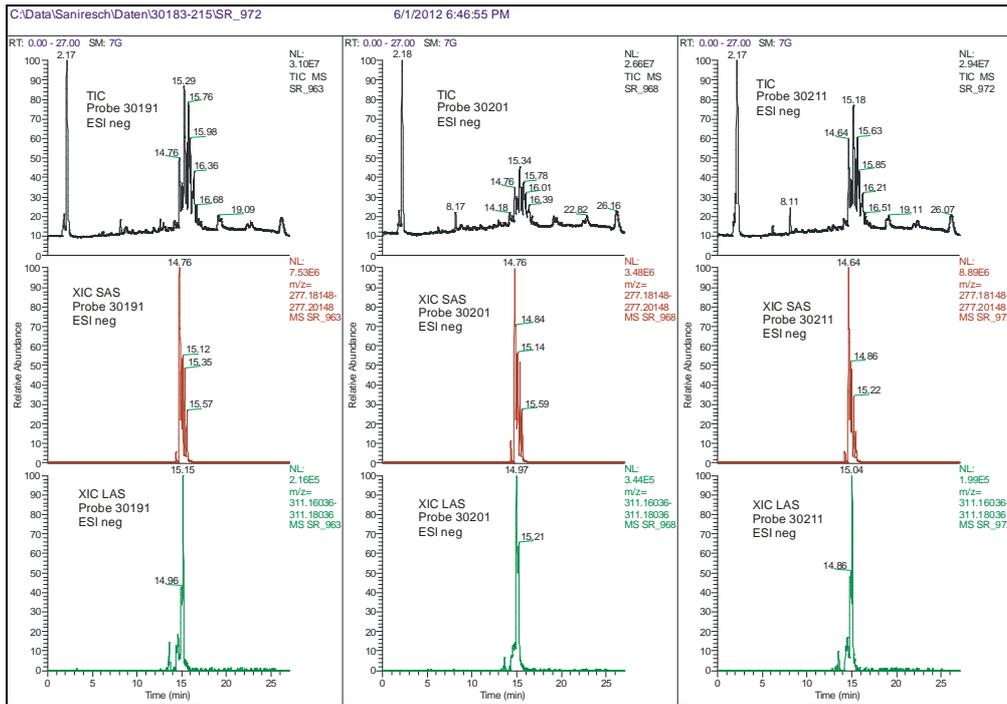


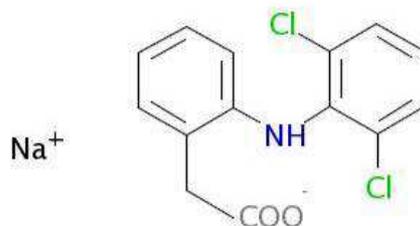
Abbildung 60: Tensid-LC-Massenspektren der Grauwasserzulaufprobe vom 3.4. und 17.4.2012.



**Abbildung 61: Tensid-LC-Massenspektren der Grauwasserablaufprobe vom 3.4., 17.4. und 22.5.2012.**

### 3.4.3.4 Bestimmung adsorbierbarer organisch gebundener Halogene (AOX)

Der Summenparameter AOX zählt zu den Standardparametern der Abwasser- und Klärschlammanalytik. Die mit Hilfe des AOX-Bestimmungsverfahrens (DIN EN ISO 9562) gemessenen halogenorganischen Verbindungen können anthropogenen aber auch natürlichen Ursprungs sein. Im Rahmen des Projektes galt das Interesse zum einen der Überprüfung des Messverfahrens für die Bestimmung der Konzentration halogenhaltiger Pharmazeutika. Da für die AOX-Untersuchungen nur Diclofenac in größerer Menge zur Verfügung stand, wurden diese mit diesem Medikament durchgeführt (siehe Abbildung 62). Zum anderen dienten die Analysen der Überprüfung des Halogengehaltes der Zu- und Abläufe der verschiedenen Versuchsanlagen.



**Abbildung 62: Strukturformel von Diclofenac-Natrium-Salz (ESIS, 2012).**

Das im Natriumsalz von Diclofenac enthaltene Halogen Cl konnte mit einer Wiederfindungsrate von 98,5% nachgewiesen werden. Die dabei zur Anwendung gekommene Menge betrug 1.054 mg Diclofenac-Natrium entsprechend 981,2 mg Diclofenac und einem theoretischen

Gehalt an Cl von 235 mg l<sup>-1</sup>. Bei der stichprobenartigen Bestimmung der AOX-Gehalte in den Zu- und Abläufen der Pilotanlagen wurden die in Tabelle 29 aufgelisteten Werte ermittelt.

**Tabelle 29: Konzentration der adsorbierbaren Halogenverbindungen (AOX) und von Diclofenac in den Zu- und Abläufen der Pilotanlagen.**

Datum	Braunwasser			Grauwasser			Urinfällung		
	Probe	AOX	Diclofenac	Probe	AOX	Diclofenac	Probe	AOX	Diclofenac
		[µg l <sup>-1</sup> ]			[µg l <sup>-1</sup> ]			[µg l <sup>-1</sup> ]	
3.4.2012	Zulauf	<10	-	-	-	-	Zulauf	-	3,3
	Ablauf	16	<LOQ	Ablauf	<10	<LOQ	Ablauf	-	4,4
17.4.2012	Zulauf	40	-	-	-	-	Zulauf	-	6,6
	Ablauf	14	<LOQ	Ablauf	<10	<LOQ	Ablauf	45	4
22.5.2012	Zulauf	-	-	-	-	-	Zulauf	-	5,4
	Ablauf	<10	<LOQ	Ablauf	65	<LOQ	Ablauf	-	1,4

Da in keiner der Proben zeitgleich Gehalte an Diclofenac größer als 40 µg l<sup>-1</sup> (~9,6 µg Cl l<sup>-1</sup>) gemessen wurden, ist davon auszugehen, dass die AOX-Konzentrationen im Zu- und Ablauf aller Anlagen ihren Ursprung in anderen halogenierten organischen Verbindungen haben. Die im Ablauf der Grauwasserbehandlungsanlage gemessene AOX-Konzentration von 65 µg l<sup>-1</sup> ist ein Hinweis auf halogenhaltige Reinigungsmittel, die jedoch offensichtlich nur zeitweise eingesetzt werden und somit nicht regelmäßig im Ablauf der Pilotanlage auftreten. Beim Betrieb einer Grauwasserbehandlungsanlage mit anschließender Verwendung des aufbereiteten Wassers sollten die Abwassererzeuger (in diesem Fall die Nutzer der Teeküchen, Reinigungsfirma/-personal) auf mögliche Umweltgefahren durch halogenhaltige Chemikalien hingewiesen und zur Nutzung halogenfreier Putz-, Reinigungs- und Körperpflegemittel angehalten werden. Dann ist auch beim Betrieb einer Grauwasseranlage gewährleistet, dass keine schädlichen adsorbierbaren organischen Halogenverbindungen industriellen Ursprungs über die Verwendung aufbereiteten Grauwassers als Toilettenspülwasser und nach der Abwasserreinigung in einer Kläranlage in die Umwelt eingetragen werden.

### 3.4.3.5 Mikrobiologische Untersuchungen

Im Projektverlauf wurden wiederholt die Keimzahlen des Urins sowie die Abläufe der Grau- und Braunwasserbehandlungsanlage beprobt, um die Belastung mit Keimen zu dokumentieren. Die Ergebnisse der Beprobung der Urintanks ist in Tabelle 30 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Lagerung des Urins deutlichen Einfluss auf die Keimzahlen hat. In den Proben aus Tank 3, der im Jahr 2008 befüllt worden war, ließen sich außer zum Zeitpunkt der ersten Probenahme am 10.11.2009 keine die Bestimmungsgrenze des angewandten Verfahrens überschreitenden Zahlen an E. coli und Coliformen Keimen nachweisen. Auf den Nachweis von Ps. aeruginosa, Salmonella und Clostridium wurde nach ausschließlich negativen Ergebnissen in den ersten zwei Proben im weiteren Verlauf verzichtet. Nach dem 7.11.2010 wurde der Tank 3 geleert und als weiterer Vorlagebehälter für die Urinfällungsanlage genutzt. Bei den im Folgenden untersuchten Proben im Zu- und Ablauf der Urinfällungsanlage

erfolgten die Probenahmen des Zulaufs aus unterschiedlichen Urintanks, die keine lange Lagerzeit und deshalb hohe Konzentrationen an Bakterien aufwiesen. Des Weiteren wurde Struvit untersucht, das direkt steril den Filtern entnommen worden war. Die Ergebnisse sind in Tabelle 31 aufgelistet.

**Tabelle 30: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen von Tank 2 und 3.**

Datum	Ort	E. coli	Coliforme Bakterien
		[n 100 ml <sup>-1</sup> ]	
10.11.09	Tank 2	>2419,6	>2419,6
10.11.09	Tank 3	>2419,6	>2419,6
25.08.10	Tank 3	<100	<100
07.11.10	Tank 3	<100	<100

**Tabelle 31: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen von Zu- und Ablauf der Urinfällungsanlage sowie Struvit. KBE = Kolonie bildende Einheiten.**

Datum	Ort	E. coli	Coliforme Bakterien	KBE 22°C	KBE 36°C
		[n 100 ml <sup>-1</sup> ]			
25.08.10	Zulauf	<100	<100	-	-
	Ablauf	<100	<100	-	-
	Struvit (0,26 g 100 ml <sup>-1</sup> )	<100	<100	-	-
07.11.10	Zulauf	<100	<100	-	-
	Ablauf	<100	<100	-	-
	Struvit (0,255 g 100 ml <sup>-1</sup> )	<1	<1	-	-
18.08.11	Zulauf	>24196	>24196	5.760.000	2.860.000
	Ablauf	>24196	>24196	1.590.000	1.240.000

Die im Jahr 2011 im Zu- und Ablauf der Urinfällungsanlage gemessenen hohen Konzentrationen an Bakterien zeigen, dass es notwendig ist, Hygienevorschriften beim Umgang mit frischem Urin strikt einzuhalten. Eine weitgehende Automatisierung der Urinfällung ist anzustreben, wenn die Struvitfällung nicht aus mindestens sechs Monate abgelagertem Urin erfolgen kann. Die Trocknung des gefällten Struvit bewirkt schon nach kurzer Zeit durch den starken Konzentrationsunterschied zwischen dem Zellinneren und der trockenen salzbelasteten Umgebung eine keimtötende Dehydrierung der Bakterienzellen. So kann davon ausgegangen werden, dass von ausreichend getrocknetem Struvit (H<sub>2</sub>O <20%) beim Einsatz als Dünger keine Infektionsgefahr durch Fäkalkeime ausgeht. Keimzahlbestimmungen im Rahmen der Trocknungsexperimente bestätigen dies.

Werden Abwässer mittels Membranbelebungsverfahren behandelt, kann häufig eine Wiederverwendung des Ablaufs als Brauchwasser erfolgen. Eine der Grundvoraussetzungen für eine Wiederverwendung des gereinigten Abwassers ist eine gute hygienische Qualität. Im Rahmen des Projektes wurden deshalb auch die Abläufe der Brauwasserbehandlungsanlage sowie der Grauwasserbehandlungsanlage beprobt (siehe hierzu auch Kapitel 3.3.3.8). Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 und Tabelle 33 aufgelistet.

**Tabelle 32: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen der Abläufe der Braunwasserbehandlungsanlage.**

Datum	Ort	E. coli	Coliforme Bakterien	intestinale Enterokokken
		[n 100 ml <sup>-1</sup> ]		
28.09.11	Ablauf	7	980	56
30.11.11	Ablauf	68	91	0
03.04.12	Ablauf	2	2	0
16.04.12	Ablauf	2	2	0
22.05.12	Ablauf	3,1	18,5	58

**Tabelle 33: Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen der Abläufe der Grauwasserbehandlungsanlage.**

Datum	Ort des Permeats	E. coli	Coliforme Bakterien	intestinale Enterokokken
		[n 100 ml <sup>-1</sup> ]		
28.09.11	Vorrat	0	0	<1
	frisch	0	1	<1
30.11.11	frisch	0	0	0
	Vorrat	0	0	0
03.04.12	frisch	0	0	0
	Vorrat	0	0	0
17.04.12	frisch	0	1	0
	Vorrat	0	0	0
22.05.12	frisch	1	1	0
	Vorrat	0	0	0

Bei der Beprobung der Braunwasseranlage konnten immer wieder Bakterien nachgewiesen werden. Die Probenahmestelle für den Ablauf der Braunwasseranlage befand sich an einer schwer zugänglichen Stelle, weshalb nicht ausgeschlossen werden kann, dass bei der Durchführung der Probenahme Keime in die sterile Flasche eingetragen worden sein können (siehe Abbildung 63). Hohe Keimzahlen können auch durch eine Rückinfektion der Ablaufleitung verursacht werden. Die Desinfektion der Ablaufleitungen führte in der Folge zu deutlich niedrigeren Werten.



**Abbildung 63: Probenahme am Ablauf der Braunwasseranlage.**

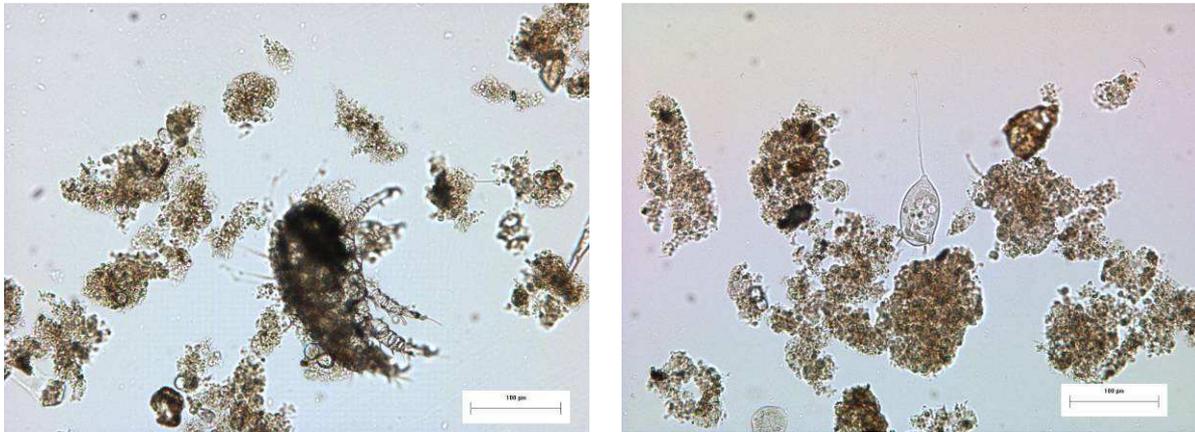
Bei der Beprobung des Grauwasserpermeats sollte auch untersucht werden, ob es in dem Vorratsbehälter für gereinigtes Grauwasser zu einer Wiederverkeimung des behandelten Grauwassers kommt. Auch wenn einzelne *E. coli*, bzw. coliforme Keime bestimmt worden sind (Tabelle 33), so sind die gemessenen Werte ein deutlicher Indikator für die gute mikrobiologische Qualität des gereinigten Grauwassers, das z. B. für die Toilettenspülung verwendet werden kann. Die Keimzahlen liegen weit unter den in der Badegewässerrichtlinie angegebenen Werten für Binnengewässer ausgezeichneter Qualität von 500 CFU/100 ml für *E. coli* und 200 CFU/100 ml für Intestinale Enterococcen (EG, 2006).

Zur Beurteilung des Betriebes der beiden Membranbelebungsanlagen zur Behandlung von Grau- und Braunwasser wurden am ISA Untersuchungen des mikroskopischen Bildes des belebten Schlammes beider Anlagen durchgeführt. In der Grauwasseranlage zeigten sich bei allen Proben feste, in der Größe stark variierende Belebtschlammflocken. Fadenbildner konnten nur mit der Häufigkeitsstufe 0-1 detektiert werden. Protozoen waren in allen Proben vorhanden. Kein Organismus, der Indikator für bestimmte Betriebszustände ist, zeichnete sich durch besondere Häufigkeit aus. Das mikroskopische Bild der Proben ist insgesamt typisch für stabile Betriebszustände.

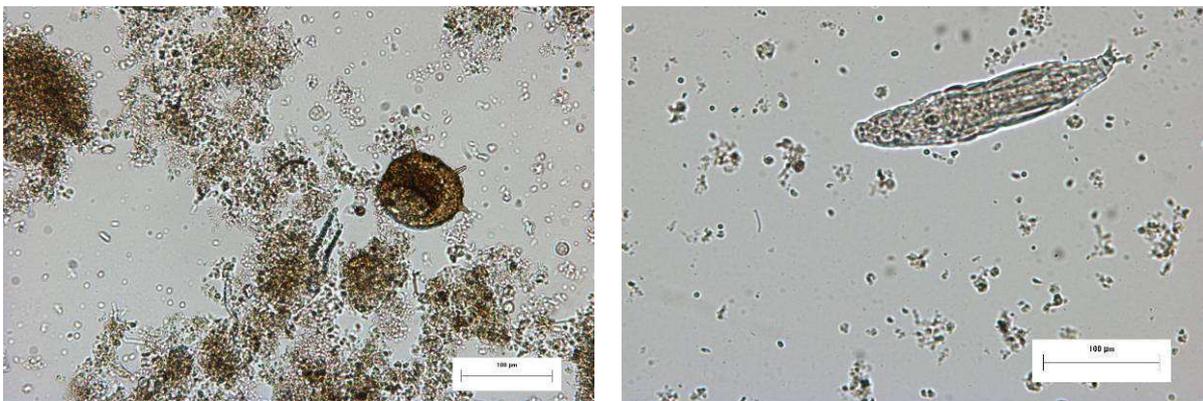
Die Braunwasserbehandlungsanlage war ebenso wie die Grauwasseranlage mit belebtem Schlamm einer kommunalen Kläranlage angeimpft worden (siehe auch Kapitel 3.2.3.1.2 und 3.2.3.1.3). Bei der ersten Probenahme, die 14 Tage nach der Inbetriebnahme erfolgte, zeigten sich feste, in der Größe stark variierende Flocken. Fäden waren kaum zu beobachten. Neben fallweise auftretenden Mehrzellern (*Rotaria*), war das verstärkte Auftreten von *Coleps* und *Euglypha* auffällig. *Coleps* toleriert auch niedrige Sauerstoffgehalte. Die zahlreich auftretenden Schalenamöben deuten auf ein hohes Schlammalter hin.

Da die Veränderung der Biozönose von einer typischen Mikroorganismengesellschaft einer kommunalen Kläranlage zu den Mikroorganismen einer Braunwasseranlage beobachtet werden sollte, wurden nach zwei Monate und nach acht Monaten das mikroskopische Bild des belebten Schlammes der Braunwasserbehandlungsanlage erneut aufgenommen. Größe und Morphologie der Flocken waren unverändert. Neben *Rotaria* traten teilweise weitere

Mehrzeller mit 1-5 Organismen pro mikroskopischem Präparat auf. Die Anzahl der Organismenarten hatte sich von 18 auf 11 reduziert. Die in größerer Anzahl anzutreffenden Schalenamöben deuten auf ein hohes Schlammalter und stabile Betriebszustände hin. Die Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen verschiedene mikroskopische Aufnahmen der Belebtschlammbiozönose der beiden MBR-Anlagen.



**Abbildung 64: Mikroorganismen im belebten Schlamm der Grauwasserbehandlungsanlage. Links: Wassermilbe; Rechts: Vorticella convallaria.**



**Abbildung 65: Mikroorganismen im belebten Schlamm der Braunwasserbehandlungsanlage. Links: Schalenamöbe; Rechts: Rotaria spec.**

#### 3.4.3.6 Beurteilung der Daphnientoxizität des Ablaufs der MBR-Reaktoren

Um die Verwendbarkeit des Ablaufs der Membranbelebungsanlagen von Grau- und Braunwasser zu überprüfen, wurden die Abläufe beider Anlagen je einmal einem Daphnien-Test unterzogen. Die Permeate beider Anlagen erwiesen sich als nicht daphnien-toxisch.

#### 3.4.4 Fazit

Aus den Ergebnissen des Arbeitspaketes zur Qualität der Produkte / Urinlagerung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten. Eine langfristige Lagerung des Urins senkt die Konzentration an Fäkalkeimen deutlich, weshalb die Lagerung des Urins für mindestens sechs Monate bei der direkten Verarbeitung des Urins zu Düngezwecken aus hygienischen Gründen

zu empfehlen ist. Diese langfristige Lagerung hat bei mit Pharmazeutika gespiktem, natürlichem Urin keinen Einfluss auf die Elimination aller Medikamente. Auch eine Veränderung des pH-Wertes während der Lagerung führt im stark sauren bzw. stark alkalischen Bereich nur zu einer relevanten Reduktion von >90% der zudosierten Pharmazeutika Sulfadimidin und Diclofenac. Es muss betont werden, dass die langfristige Lagerung von Urin mit pH-Wert-Veränderung keine Lösung zur Reduktion aller pharmazeutischer Inhaltsstoffe ist, die bei der Sammlung von Urin einer größeren Gruppe von Menschen anfallen.

Bei der Fällung natürlichen Urins mit MgO sind bereits im ungewaschenen Fällprodukt die in diesem Projekt untersuchten Pharmazeutika nicht zu quantifizieren. Vor einem Einsatz als Düngemittel muss ausgefälltes Struvit getrocknet werden. Eine Beibehaltung der molekularen Zusammensetzung des Produktes Struvit wird durch eine Trocknung bei Temperaturen von ca. 30°C erreicht. Bei Temperaturen von mehr als 50°C wurden N-Verluste festgestellt.

Die MBR-Anlagen zur Grauwasser- und Braunwasserbehandlung arbeiten stabil, wie die Aufnahme des mikroskopischen Bildes zeigte. Die Abläufe sind nicht Daphnien-toxisch. Unter hygienischem Gesichtspunkt lassen die Abläufe der beiden MBR-Reaktoren eine Verwendung als Brauchwasser für die Toilettenspülung zu.

## **3.5 Landwirtschaftliche Produktion / Rechtslage (Verantwortlich: Universität Bonn)**

### **3.5.1 Ziele der Projektkomponente**

Ziel des Arbeitspackets der Universität Bonn waren Analysen zur landwirtschaftlichen Verwertung von Produkten aus dem GIZ-Sanitärssystem. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei auf den Auswirkungen beim Einsatz der neuartigen Düngemittel Urin und MAP. Ein Einsatz als Düngemittel wurde im Hinblick auf die Düngungseignung und Umweltwirkung geprüft.

Die Ergebnisse zur technischen und rechtlichen Machbarkeit sind im folgenden Kapitel erläutert. Die Möglichkeit zur sinnvollen Wiederverwertung bildet eine wesentliche Grundlage der Ecosan-Idee und beeinflusst erheblich die Akzeptanz (siehe hierzu auch Kapitel 3.6) und Wirtschaftlichkeit (siehe hierzu auch Kapitel 3.7) bei neuen Sanitärssystemen. Die Ergebnisse zu Akzeptanz und Ökonomie, die in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen bzw. GIZ entstanden und vom INRES hinsichtlich der landwirtschaftlichen Aspekte ermittelt wurden, sind in den Abschnitten 3.6.3 und 3.7.3.2 beschrieben.

### **3.5.2 Material und Methoden**

Um die Eignung von neuen Substraten aus Neuartigen Sanitärssystemen als Düngersubstrat festzustellen, wurden verschiedene Aspekte untersucht:

- Untersuchungen zur Düngungseignung: Klärung landwirtschaftlicher Aspekte bei der Verwertung im Feld, d.h. Erhebungen zur Nährstoffzusammensetzung, Düngebedarf, und Feldversuche zu Machbarkeit und Ertrag.
- Untersuchungen zur Keimungshemmung: Keimungstests mit Urin und Urinbestandteilen zur Ermittlung potenziell hemmender Substanzen.
- Untersuchungen zum Verhalten von Schadstoffen: Entwicklung einer Methode zur Untersuchung von pharmazeutischen Wirkstoffen in den relevanten Medien Urin, MAP, Boden und Pflanze; Gefäßversuch zur potenziellen Aufnahme von Schadstoffen in die Pflanze; Abbauverhalten in Böden.
- Rechtliche Einstufung zur Klärung der Verwendung, Feststellung von ggf. konkurrierender Gesetzgebung.

#### **3.5.2.1 Untersuchungen zur Düngungseignung**

Hinsichtlich ihrer Düngungseignung wurden die SANIRESCH-Produkte Urin und MAP im Feldversuch im Vergleich mit konventionellen Mineraldüngern getestet.

Diese Feldversuche fanden auf dem Versuchsgut der Universität Bonn, dem Campus Klein-altendorf, 20 km westlich von Bonn statt. Das Gelände liegt in einem der bedeutendsten Obstbaugebiete Deutschlands in der südlichen Niederrheinischen Bucht auf der Hauptter-

rasse des Rheins. Das Klima ist atlantisch geprägt, der Standort befindet sich im Windschatten der Eifel. Die Jahresniederschläge betragen 596 mm bei einer Jahresmitteltemperatur von 9,2°C. Der Grundwasserspiegel liegt auf ca. 20 m Tiefe. Die Böden des Versuchsguts sind basen- und nährstoffreiche Parabraunerden aus Löss, mit Bodenarten von lehmigem Schluff bis zu tonigem Lehm.

Zur Untersuchung dienten Weizen und Mais, zwei der wichtigsten Kulturpflanzen Mitteleuropas. Mais als Starkzehrer war aufgrund der lokalen Bedingungen (nährstoffreiche Böden) ausgewählt. Ausserdem wurde der Einsatz von Urin zu einer Nutzpflanze, die nicht zum Verzehr vorgesehen ist, getestet (Elefantengras, *Miscanthus sinensis*). Daneben erschien es für den Vergleich der P-Düngungseigenschaften interessant - eine Leguminose (Ackerbohne, *Vicia faba*) zu untersuchen.

Damit kamen folgende Kulturpflanzen zum Einsatz:

- Sommerweizen (*Triticum aestivum* L., Sorte Taifun) 2010, 2011 und 2012.
- Körnermais (*Zea mais*, Sorte Canon) 2011 und 2012
- Ackerbohne (*Vicia faba*, Sorte Fuego) 2010, 2011 und 2012
- Miscanthus (*Miscanthus sinensis*), 2010/2011
- Sommergerste (*Hordeum vulgare*, Sorte Simba) 2010

Urin konnte in drei, MAP in zwei Vegetationsperioden eingesetzt werden. Zum Vergleich wurden Parzellen ohne Düngerapplikation (Kontrolle, „Null-Düngung“) als auch Parzellen mit Mineraldünger angelegt. Die neuen Produkte wurden im Vergleich zum Stickstoffdünger Kalkammonsalpeter (KAS) bzw. Phosphordünger Triplephos untersucht. KAS enthält 26% N und 10% Ca, einer Mischung von 76%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (Ammoniumnitrat) und 24%  $\text{CaCO}_3$  (Calciumcarbonat). Triplephos (oder Triplesuperphosphat) besteht aus 46%  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Tabelle 34 zeigt den kalkulierten Nährstoffbedarf für Sommerweizen und Mais sowie die in den neuartigen Düngern enthaltenen Nährstoffmengen. Diese wurden bei Urin auf N bezogen, d.h. die applizierte Urinmenge sollte den gesamten N-Bedarf decken. Bei MAP wurde auf P bezogen. Die Bewirtschaftung erfolgte betriebsüblich. So wurde z.B. die Düngermenge für Sommerweizen, der in allen drei Jahren angebaut wurde, nach Entzug festgelegt und aufgeteilt in drei Gaben. Mit der Menge von  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  war auch die K-Versorgung gesichert (Variante 2: KAS, Variante 3: Urin). Rechnerisch erhielten diese Varianten zu wenig Phosphor. In den weiteren Varianten wurde daher ergänzend P gegeben (4: KAS+Tripelphos, 5: KAS+MAP, 6: Urin+MAP). Neben der Düngung wurden betriebsübliche Pflanzenschutz-Maßnahmen durchgeführt, d.h. bei Getreide ein Fungizid, ein Herbizid sowie ein Insektizid. Die Ackerbohne wurde mit Herbizid und Insektizid behandelt.

**Tabelle 34: Nährstoffentzug von Weizen und Mais bei entsprechendem Ernteertrag (= Nährstoffbedarf der Kultur) im Vergleich zu Nährstoffdargebot durch neuartige Sanitrdnger der GIZ in kg, bezogen auf 1 ha.**

	Weizen	Körnermais	GIZ-Urin	GIZ-Urin	MAP
Applikation ha <sup>-1</sup>			30 m <sup>3</sup>	55 m <sup>3</sup>	0,25 kg
Erntemenge ha <sup>-1</sup>	74 dt	95 dt			
Nährstoffentzug [kg]			Nährstoffdargebot [kg]		
<b>N</b>	156	144	79	144	13
<b>P</b>	26	33	5	10	29
<b>K</b>	37	40	40	74	0,9
<b>Ca</b>			2	6	3,2
<b>Mg</b>	9	11	0	0	26
<b>S</b>			8	14	0,3

Nährstoff-Entzüge: Ernte-Hauptprodukte (KTBL, 2009), Erträge: Hektarertrag-von-getreide(koernermais)-in-deutschland-seit-1960 (Statistisches Bundesamt, 2012)

Die Versuchsflächen variierten jährlich, damit auf den Feldern Fruchtwechsel stattfinden konnte. So fand der Versuch 2010, auf dem Schlag Oberhoicht, auf Flächen mit sandig - schluffigen Lehm (sL-uL), mit einem pH von 5,6, statt. Das Feld war zuvor mit Winterroggen bestockt. Mineralischer Stickstoff (N<sub>min</sub>) war im Frühjahr mit 73 kg ha<sup>-1</sup> bestimmt worden. Die Versorgungsklasse war C für Phosphor und Kalium, Klasse D für Magnesium.

Der im Folgenden näher beschriebene Versuch 2011 auf Schlag IV a statt (siehe auch Anlage 6.2.3). Die Bodenart ist hier ein sandig - schluffiger Lehm in der Versorgungsklasse C. Die Versuchsvarianten bestanden aus je 4 randomisierten Wiederholungen. Die Groe jeder Parzelle betrug 12 m x 3 m = 36 m<sup>2</sup>. Die Demonstrationsflächen für Miscanthus waren jeweils 3 m x 20 m groß (ohne Wiederholung).

### 3.5.2.2 Untersuchungen zur Keimungshemmung

Zur Feststellung von toxischen oder hemmenden Wirkungen des Urins dienten Keimungstests, die im Gewächshaus des Instituts in Bonn durchgeführt wurden. Untersucht wurde, ob und wie stark die Zugabe von Urin resp. ausgewählter Bestandteile des Urins die Keimung verschiedener Pflanzensamen hemmen. Ausgewählt wurden eine Monocotyle, Weizen (*Triticum aestivum*, Sorte Triso) und eine Dicotyle, Sonnenblume (*Heliantus annuus*, Sorte Faro).

Je 10 Weizensamen wurden auf Watte in jeweils eine Petrischale platziert (Abbildung 66). Watte hatte sich in Vorversuchen gegenüber Perlit und Sand als am besten geeignet erwiesen. Jede Variante war in 4-facher Wiederholung angesetzt. Die Keimung wurde innerhalb der ersten 10 Tage nach Versuchsansatz alle zwei Tage bestimmt.



**Abbildung 66: Keimungstest mit Weizensamen in Petrischalen auf Watte.**

Neben Urin in verschiedenen Verdünnungsstufen wurden ausgewählte Pharmazeutika (Diclofenac, Carbamazepin, Atenolol, Verapamil) und das Hormon 17 $\beta$ -Estradiol (E2) sowie verschiedene Salze, die im Urin vorkommen (NaCl, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>), untersucht. Die untersuchten Pharmazeutika stammten von der Fa. Sigma und wurden in verschiedenen Konzentrationen eingesetzt: wie im Urin (Konzentration aus verfügbaren Literaturquellen gemittelt), 100-fach höher und 100-niedriger konzentriert (Tabelle 35), wobei der Wirkstoff 100-fach verdünntem Urin zugegeben wurde. Ausgehend von der Leitfähigkeit des verwendeten Urins lag die Molarität der Salzlösungen jeweils bei 0.2 mol l<sup>-1</sup> (EC 20-30 mS cm<sup>-1</sup>); dazu jeweils eine verdünnte Variante mit 0.02 mol l<sup>-1</sup>. Zudem wurden verdünnter Urin und Leitungswasser in verschiedenen pH Stufen (pH 5, 7, 9, 11) eingesetzt.

**Tabelle 35: Wirkstoff-Charakteristika und eingesetzte Konzentrationen.**

Wirkstoff	Wirkstoffgruppe	Summenformel	CAS-Nr.	Konzentration* [ $\mu\text{g l}^{-1}$ ]
17 $\beta$ -Estradiol	Sexualhormon	C <sub>18</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	5864-38-0	2
Diclophenac	Schmerzmittel, gegen Rheuma (z.B. Voltaren)	C <sub>14</sub> H <sub>11</sub> Cl <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	15307-86-5	20
Carbamazepin	Antiepileptika	C <sub>15</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O	298-46-4	20
Verapamil	Ca-Antagonist, gefäßerweiternd	C <sub>27</sub> H <sub>38</sub> N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	52-53-9	200
Atenolol	Beta-Blocker	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29122-68-7	200

\*im Versuch eingesetzt.

### 3.5.2.3 Untersuchungen zum Verhalten von Schadstoffen

#### Hormonnachweis mittels YES-Test

Die zum Nachweis von hormonaktiven Substanzen eingesetzte Methode, der „Yeast Estrogen (YES)-Assay“ von Routledge und Sumpter (1996) erfasst endokrine Disruptoren (endocrine disrupting compounds, EDC) als Summenparameter in Estradiol-Äquivalenten (E2eq).



**Abbildung 67: Nachweis von endokrinen Disruptoren im YES-Test in der Mikrotiterplatte.**

Für diesen Test entwickelten Routledge und Sumpter (1996) Hefezellen (*Saccharomyces cerevisiae*), die das humane Östrogen-Rezeptor-Gen (hRE) beinhalten, zusammen mit den Expressionsplasmiden mit Reporter-Gen Lac-Z (von *Escherichia coli*). Das hER kann in diesem System Östrogen-Elemente binden, das Lac-Z kodiert das Enzym  $\beta$ -Galactosidase. Aktive Liganden, d.h. Östrogen aktive Substanzen, verursachen durch Bindung an den Rezeptor eine Expression des Reporter-Gens Lac-Z und lösen damit eine Abgabe von  $\beta$ -Galactosidase in das Medium aus. Dadurch ändert sich die Farbe des ursprünglich gelben Chlorphenolrot- $\beta$ -d-galactopyranosid (CPRG) in rot. Dieses Produkt kann dann durch Absorption bei 540 nm gemessen werden. Die photometrische Bestimmung erfolgt im flüssigen, klaren Medium (Abbildung 67) und erfordert daher die Aufreinigung von Oberflächen- oder Abwasserproben sowie die Extraktion von Feststoffproben. Das am Institut modifizierte Verfahren (Le, 2012) konnte im Rahmen des SANIRESCH-Projekts weiterentwickelt und für die neuen Medien (Urin, MAP, Boden, Pflanze) angepasst werden. Für die Bestimmung der Wiederfindungsraten wurde E2 von Sigma-Aldrich (E-8875) verwendet.

### Pharmazeutika im Gewächshausversuch

Zum Risiko einer Aufnahme und Anreicherung von potenziell schädlichen Bestandteilen aus dem Urin in die Pflanze wurde ein Gefäßversuch unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus des Instituts durchgeführt. Geprüft wurde, ob vier ausgewählte Pharmazeutika (Carbamazepin, Diclofenac, Atenolol und Verapamil) und das Hormon  $17\beta$ -Estradiol, die dem Urin extra zugesetzt waren, in Pflanzenteilen wieder zu finden sind. Die entsprechende Menge Wirkstoff wurden in einer geringen Menge Methanol (100  $\mu$ l) gelöst und dem Urin zugegeben. Diese Lösung wurde auf den Boden in den Kick-Brauckmann Töpfen aufgegeben.

Die Analyse der Pharmazeutika erfolgte im Labor der Technischen Hochschule Hamburg-Harburg (TUHH) mittels HCPL/MS. Zur Vorbereitung erfolgte eine Fest-Flüssigextraktion des gemahlenem Getreides, die Extraktaufreinigung und Anreicherung der Analyten mittels Festphasenextraktion (SPE).

Für die Fest-Flüssigextraktion wurden jeweils zwei Einwaagen des gemahlenen und homogenisierten Pflanzenmaterials à 5 g parallel aufgearbeitet (sofern genügend Probenmaterial zur Verfügung stand). Die Probe wurde im 50 ml-Zentrifugenglas mit 20 ml MeOH/Citrat-EDTA-

Pufferlösung (10/90 v,v) versetzt und durch Schütteln per Hand aufgeschlämmt. Die Suspension wurde 5 min im Ultraschallbad homogenisiert und anschließend waagrecht auf der Schüttelmaschine 60 min geschüttelt. Danach wurde die Probe 10 min bei  $6000 \text{ U min}^{-1}$  zentrifugiert und der Überstand auf eine SPE-Kartusche gegeben.

In der Festphasenextraktion (SPE) wurde der Extrakt wird mittels Pasteurpipette auf die Kartusche gegeben und langsam (30-40 Tropfen pro Minute) durch die Festphasenkartusche gesaugt. Am Ende wurde kurz trockengezogen und mit Stickstoff ca. 30 min trockengeblasen. Die langsame, tropfenweise Elution der Analyten erfolgte einmal mit 10 ml MeOH und anschließend mit 10 ml MeOH + 0,1% Essigsäure in einen 50 ml Spitzkolben. Die Festphasenkartusche wurde erneut mit Stickstoff ca. 30 min trockengeblasen. Der verbliebene Rückstand im Zentrifugenröhrchen wurde mit 20 ml MeOH/Boratpufferlösung (10/90) erneut aufgeschlämmt, 5 min im Ultraschallbad behandelt und anschließend waagrecht auf der Schüttelmaschine 30 min geschüttelt. Danach wurde 10 min bei  $6000 \text{ U min}^{-1}$  zentrifugiert. Der Überstand wurde genau wie der Extrakt behandelt.

Für die Messprobe wurde das gemeinsame Eluat am Rotationsverdampfer auf ca. 1 ml eingengt und in einen 2 ml Messkolben überführt und mit Methanol aufgefüllt. Das Konzentrat wurde vorsichtig (ohne Aufwirbeln des Sedimentests) mittels Pasteurpipette in ein EPI überführt und mit der Biofuge 10 min bei  $13000 \text{ U min}^{-1}$  zentrifugiert. Der Überstand wurde in ein Autosamplervial überführt und an der HPLC-MS/MS gemessen. Zur Kalibrierung wurde die Wiederfindung von  $200 \mu\text{l}$  von einer Stammlösung mit einer Konzentration von  $1 \text{ mg l}^{-1}$  überprüft.

### **Pharmazeutika im Freilandversuch**

Daneben wurde untersucht, ob bei den mit GIZ-Urin gedüngten Varianten des Freilandversuchs 2011 Pharmazeutika im Weizenkorn nachweisbar sind und ob die Hormongehalte in Korn oder Boden erhöht sind. Die Analysen wurden von der RWTH Aachen durchgeführt. Da lediglich 20 Proben untersucht werden konnten, wurden nur ausgewählte Proben des im Freiland geernteten Weizens aus dem Feldversuch von 2011 untersucht.

Die bei  $60^\circ\text{C}$  getrockneten und gemahlene Pflanzenteile (Retsch-Pflanzenmühle) wurden im Labor der RWTH Aachen wie folgt behandelt. Pflanzenmengen zwischen 0,5 und 1 g in 5-6 ml wurden in Methanol aufgenommen und 15 min im Ultraschallbad behandelt. Nach Dekantierung des Überstandes wurde zweimal erneut Methanol aufgefüllt und die Pflanzenreste mit Ultraschall behandelt. Die Überstände wurden vereinigt und im Stickstoffstrom zur Trockenen eingedampft. Der Rückstand wurde in 100 ml MilliQ-Wasser aufgenommen und auf enthaltene Pharmazeutika nach Extraktion über eine Oasis HLB-Kartusche wie in Kapitel 3.4.2.1 beschrieben untersucht. Die Nachweisgrenze für Boden und Pflanzenproben belief sich für alle Wirkstoffe auf  $10 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ TM}$ .

### 3.5.2.4 Rechtliche Einstufung

Hinsichtlich der gesetzlichen Regelungen zum Einsatz von neuartigen Düngern aus Sanitärsystemen wurden die aktuellen, einschlägigen Rechtsvorschriften in Deutschland sowie die entsprechenden EU-Regelungen bzw. Rahmenvorschriften zusammengestellt. Geprüft wurde auch, ob im Hinblick auf diese Fragestellung existierende Richtlinien (Gewässerschutz, Bodenschutz, Düngemittel, etc.) widersprüchliche Regelungen enthalten, für die bei Zulassung Harmonisierungsbedarf bestünde.

## 3.5.3 Ergebnisse und Diskussionen

### 3.5.3.1 Düngungseignung

#### 3.5.3.1.1 Bedarf an neuartigen Düngern

Der Industrieverband Agrar (IVA) prognostiziert für die nächsten vier Jahre einen weltweiten jährlichen Nachfragezuwachs für Dünger (N 1,8%, P 3,1%, K 4,3%). Damit setzt sich im Wesentlichen die Entwicklung der vergangenen Jahren fort (AMI, 2012, Abbildung 68).

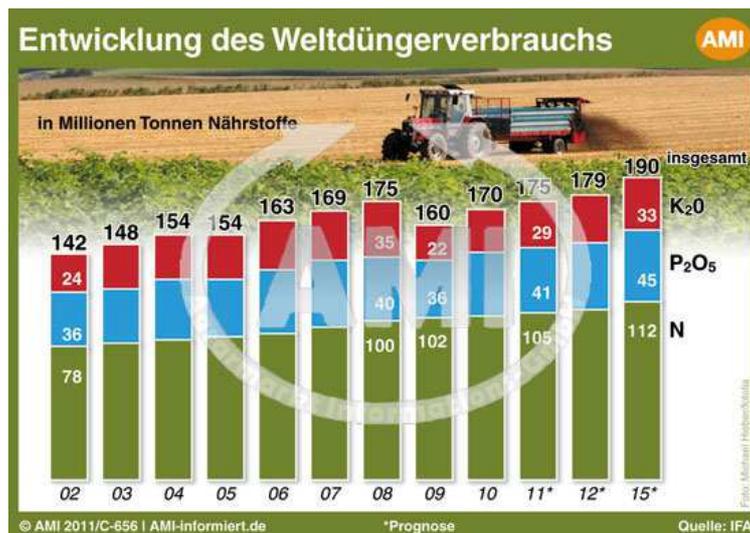
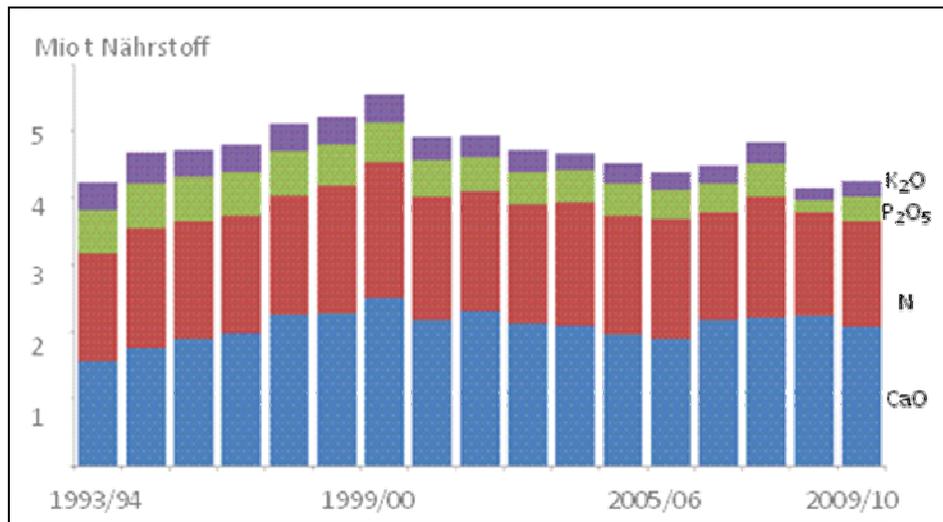


Abbildung 68: Weltdüngerverbrauch nach Nährstoffen von 2002-2010 mit Prognose bis 2015 (AMI, 2012).

Während in Deutschland der Mineraldüngerabsatz seit dem Wirtschaftsjahr 1999/2000 leicht rückläufig war (Abbildung 69), hat er in der Saison 2010/11 wieder zugenommen und ist auf 4,79 Millionen Tonnen Nährstoff angestiegen (DBV, 2012). Und dies, obwohl zu den bisher verwendeten Wirtschaftsdüngern – 190 Mio. m<sup>3</sup> Gülle und 25 Mio. t Festmist (Statistisches Bundesamt, 2012) – vermehrt Gärreste hinzugekommen sind. In diesem Bereich zeichnen sich derzeit Entwicklungen ab, die gewisse Parallelen zu den Entwicklungen im Bereich neuer Sanitärsysteme zeigen: es werden Aufbereitungsanlagen entwickelt, welche die in Gärresten enthaltenen Nährstoffe aufkonzentrieren, um sie anschließend als Dünger zu vermarkten wie z.B. im Projekt 'BioEnergie Park Güstrow' (Nawaro, 2012).



**Abbildung 69: Inlandsabsatz von mineralischen Düngemitteln in Deutschland von 1993/94 bis 2009/10, Säulenabschnitte von unten nach oben: CaO, N, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in 1000 t Nährstoff (UBA, 2011).**

Der weltweit steigende Bedarf soll nach Auffassung des Industrieverbands Agrar „durch neue Stickstoffdüngerwerke und Abbaukapazitäten für Kali und Phosphat gedeckt werden können.“ (IVA in Lehmann, 2011). Dieser Vorschlag stellt zwar kurzfristig eine Lösung dar, mittelfristig ist es jedoch erforderlich, über Alternativen nachzudenken, da sowohl abbaufähige Phosphor- als auch Kalium-Reserven endlich sind. Schätzungen liegen bei 80-100 Jahren für P bzw. ~300 Jahren für K (Wagner, 2005; US Geological Survey, 2012).

Nährstoff-Recycling ist wirtschaftlich v.a. dann interessant, wenn Abfälle oder Abwasser eine hohe Konzentration an Nährstoffen bei gleichzeitig geringer Konzentration an Schadstoffen aufweisen, was eben bei Urin der Fall ist. Für Urin zeigten Hammer und Clemens (2007), dass die Belastung mit Antibiotika, Steroiden und Schwermetallen je Mineraldünger-Äquivalent geringer ist als für Schweine- und Rindergülle.

### 3.5.3.1.2 Nährstoffzusammensetzung im Hinblick auf die Düngungseignung

Die beiden neuartigen Dünger enthalten die wesentlichen Pflanzennährstoffe, allerdings in verschiedenen Anteilen bzw. Verhältnissen. Tabelle 34 zeigt den Nährstoffbedarf von zwei in Deutschland verbreiteten Kulturen Weizen und Mais bei durchschnittlichen Erträgen (KTBL, 2009) sowie die Nährstoffgehalte der neuartigen Dünger im Vergleich. Optimiert man den Düngereinsatz so, dass möglichst wenige Elemente im Überschuss gedüngt werden, ergeben sich für die GIZ-Dünger folgende Schlussfolgerungen:

GIZ-Urin deckt bei vollständiger N-Versorgung etwa ein Drittel des P-Bedarfs und fast 2x den K-Bedarf; legt man die Düngung auf vollständige K-Versorgung aus werden noch gut 50% des N und knapp 20% des P-Gehalts von Weizen und Mais gedeckt (siehe Tabelle 34).

MAP kann bei Deckung des gesamten P-Bedarfs noch ca. 10% des N-Bedarfs und 12,5% des K-Bedarfs decken. Bei dieser Aufwandmenge wird dann jedoch erheblich mehr Magnesium appliziert als von den Pflanzen benötigt (fast 3x so viel). Dies führt normalerweise nicht zu toxischen Reaktionen bei der Pflanze, ist aber unnötig (und verschwendet).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Urin alle wesentlichen Pflanzennährstoffe enthalten sind. Je nach Bedarf der Pflanzenart und Bodenzustand ist die zusätzliche Gabe von Mangel-Elementen erforderlich. MAP kann als P-basierter Mehrnährstoffdünger zur Grunddüngung und zum Erhalt der P-Versorgung eingesetzt werden. Die zusätzliche Gabe von Stickstoff und Kalium ist in jedem Fall erforderlich, je nach Bodenzustand auch noch von anderen Elementen.

### 3.5.3.1.3 Handhabung oder „Handling“ der Produkte

Urin resp. Gelbwasser ähnelt in seiner Beschaffenheit den Wirtschaftsdüngern Jauche und Gülle. Damit können im Prinzip auch die hierfür geeigneten Geräte und Installationen genutzt werden (siehe Abbildung 70). Tabelle 36 gibt eine Zusammenstellung über die im Projekt verwendeten und generell möglichen Geräte.



**Abbildung 70: IBC-Tanks zu Transport und Lagerung, sowie Feldspritze bei Befüllung mit GIZ-Urin links und beim Einsatz im Feld rechts.**

**Tabelle 36: Geräte für die Handhabung von Urin in SANIRESCH.**

Arbeitsschritt	Installation im Projekt im Pilotmaßstab	Mögliche Geräte und Anlagen bei Umsetzung
Sammlung	Kunststofftanks (4 x 2 m <sup>3</sup> )	Kunststoff-, Betontanks
Transport	IBC-Kunststoff-Container à 1 m <sup>3</sup>	Gülewagen, Container (z.B. IBC), Saugwagen der Abfallwirtschaft
Lagerung	IBC-Kunststoff-Container à 1 m <sup>3</sup>	Container (z.B. IBC), Gülltetank (Beton), Plastikblase
Ausbringung	Traktor mit umgebauter Feldspritze zur parzellengenauen Ausbringung (siehe Abbildung 70)	Fasswagen mit Schleppschauch, für gärtnerischen Einsatz ggf. Bewässerungsanlage

MAP ähnelt in seiner pulverigen Beschaffenheit am meisten den in Landwirtschaft und Gartenbau verwendeten Nährsalzen und Urgesteinsmehl sowie gemahlene Kalken. Mineraldünger wird i.d.R. granuliert (oder eben flüssig) gehandelt. Wie in der Übersicht in Tabelle 36 dargestellt, kommen zur Ausbringung prinzipiell der für Kalk verwendete Flächenstreuer oder der für Mineraldünger verwendete Schleuderstreuer in Frage. Allerdings sind die Aufwandmengen von MAP für den Flächenstreuer zu klein und Schleuderstreuer nicht für pulverförmig

ges Material geeignet. Daher ist für eine kommerzielle Vermarktung die Verarbeitung zu Granulat oder Pellets zu empfehlen, was auch zu einer Minimierung von Stäuben führen würde.

Bei der Lagerung ist zu beachten, dass die Luftfeuchte in der Umgebung gering gehalten wird, damit das leicht hygroskopische Material kein Wasser aufnimmt und verklumpt. Für die Versuche im Projekt wurde das getrocknete Material (siehe Abbildung 40) vor Ausbringung noch gemahlen, um eine gleichmäßige Verteilung zu gewährleisten.

**Tabelle 37: Geräte für die Handhabung von MAP (siehe auch Kapitel 3.3.3).**

Arbeitsschritt	Installation im Projekt im Pilotmaßstab	Mögliche Geräte und Anlagen bei Umsetzung
Sammlung	Filzsäcke	(siehe Anlagentechnik Kapitel 3.3.3.5)
Trocknung	Trockenschrank	Solartrocknung
Transport	Kunststoffsack	Container, Kunststoffsack
Lagerung	Kunststoffsack	Düngerbox, Kunststoffsack
Ausbringung	Abgewogene Teilmengen pro Parzelle von Hand nach Mahlen des MAPs	Schleuderstreuer, Flächenstreuer (siehe Einschränkungen im Text)

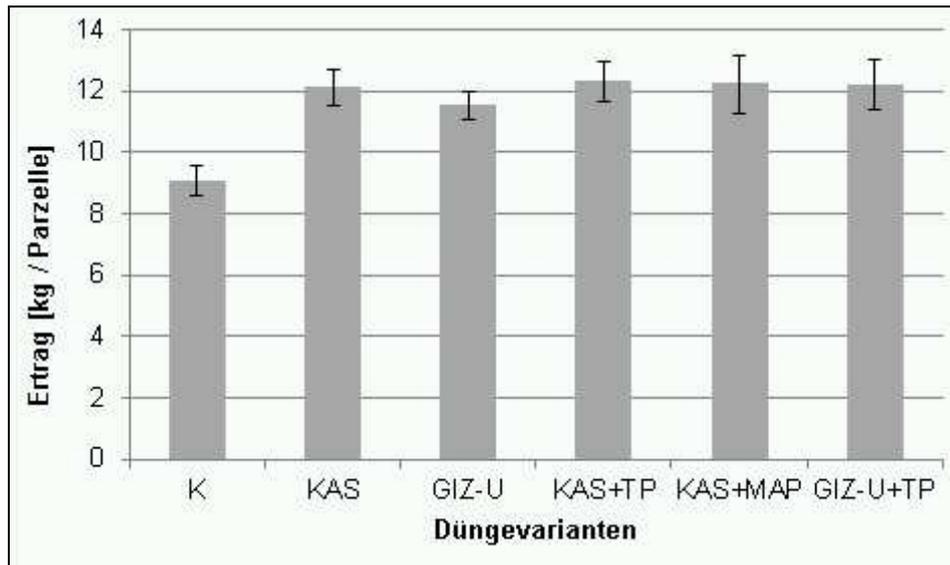
### 3.5.3.1.4 Ertragsparameter in vergleichenden Feldversuchen

Die Versuche zeigten nach Düngung mit GIZ-Urin bei allen angebauten Feldfrüchten eine gute Wachstumsleistung (Abbildung 68).



**Abbildung 71: Feldversuch mit parzellengenauem Anbau von Sommerweizen auf dem Versuchsgut Kleinaltendorf im Jahr 2010 und Ernte des Mittelstreifens zur Vermeidung von Randeffekten.**

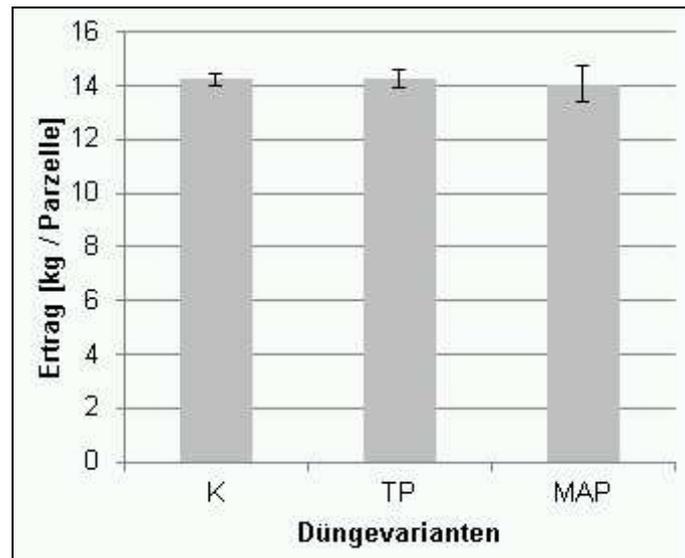
Für Sommerweizen wurde dies bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen in drei Jahren auf verschiedenen Schlägen bestätigt. Abbildung 72 zeigt exemplarisch die im Versuchsjahr 2011 bei Sommerweizen ermittelten Ernteerträge.



**Abbildung 72: Erträge bei Sommerweizen im Versuchsjahr 2011 nach Düngung mit GIZ-Urin (GIZ-U) im Vergleich zur nicht gedüngten Kontrolle (K) und zu Mineraldünger (KAS) sowie zu Varianten mit zusätzlich appliziertem Phosphor als MAP oder Tripelphos (TP); Standardabweichung für  $n = 4$ , mit  $36 \text{ m}^2$  pro Parzelle.**

Die Erträge und weitere Ertragsparameter zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen GIZ-Urin und dem Mineraldünger KAS. Sie sind jedoch sowohl bei Düngung mit GIZ-Urin als auch mit Mineraldünger KAS höher als die nicht gedüngte Kontrolle. Die zusätzliche Phosphor-Gabe (entsprechend des kalkulierten P-Bedarfs, vgl. Tabelle 34) von MAP oder Tripelphos brachte keinen signifikanten Mehrertrag, es zeigte sich aber auch kein Unterschied zwischen den beiden P-Düngern. Ein derartiger Einfluss wäre ggf. auf P-Mangel Standorten nachzuweisen.

Ein entsprechendes Ergebnis erbrachte auch der P-Düngervergleich bei einer Leguminose. Der Ertrag von Ackerbohne, dargestellt in Abbildung 73 war unabhängig von der Art des Düngers, weder MAP- noch Mineraldüngerapplikation erbrachten einen Mehrertrag gegenüber der Variante ohne zusätzlichen Phosphor. Aufgrund der lokalen Ausgangssituation mit guter P-Versorgung der Böden zeigten sich keine Unterschiede. Ein derartiger Einfluss wäre ggf. auf P-Mangel Standorten nachzuweisen.



**Abbildung 73: Erträge bei Ackerbohne im Versuchsjahr 2011 nach Düngung mit Phosphor als MAP oder Tripelphos (TP) im Vergleich zur nicht gedüngten Kontrolle (K), Standardabweichung für n= 4.**

In früheren Untersuchungen am Institut, in denen die Wirkung von MAP verschiedener Herkunft verglichen wurde (Simons, 2008, Antonini et al., 2010), hatte MAP aus HUBER-Anlagen sehr gute Resultate erzielt, d.h. die Aufnahme von Phosphor in die Pflanze war im Vergleich zu anderen Fällungsprodukten sehr gut. Fe- und Al-Phosphate aus Kläranlagen erwiesen sich sogar als nicht pflanzenverfügbar (Simons, 2008).

Die Ergebnisse der im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche bestätigen grundsätzlich vorausgegangene Feldversuche mit anderen Kulturpflanzen – d.h. Gerste, Weidelgras (Simons, 2008) und Mais (Muskulos, 2009) – bei denen die Düngung mit Urin gleiche Erträge zu den jeweiligen Vergleichsdüngern erbrachte.

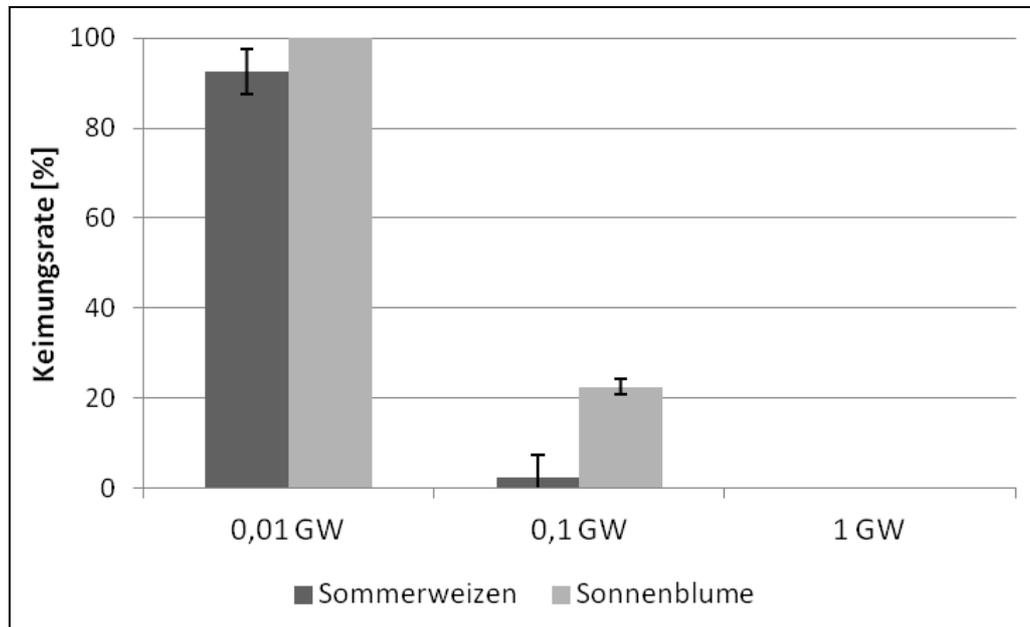
Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen der Feldversuche festhalten, dass Urin bzw. Gelbwasser prinzipiell zur Nährstoffversorgung von Kulturpflanzen geeignet ist. Auf den gut versorgten Böden ließen sich keine signifikanten Ertragsunterschiede im Vergleich zu Mineraldünger ermitteln. Frühere Gefäßversuche hatten gezeigt, dass MAP aus HUBER-Reaktoren pflanzenverträglich und pflanzenverfügbar ist.

### 3.5.3.2 Keimungshemmung

Über eine Hemmung bei der Keimung von Pflanzensamen durch Urin bzw. durch Pharmazeutika im Urin war berichtet worden (Schneider 2005, Winker et al. 2010b, Dimova 2008). Da die bisherigen Berichte jedoch nicht eindeutig waren, sind diese Fragen im Rahmen des Projekts nochmals aufgegriffen worden.

Die Applikation von unverdünntem, 1:10 und 1:100 verdünntem Urin zu Sonnenblume und Weizen erbrachte starke Wuchshemmungen bei unverdünntem, und erkennbare Hemmung bei den Varianten mit 10-fach verdünntem Urin (Abbildung 74). Keinerlei hemmende Wirkung

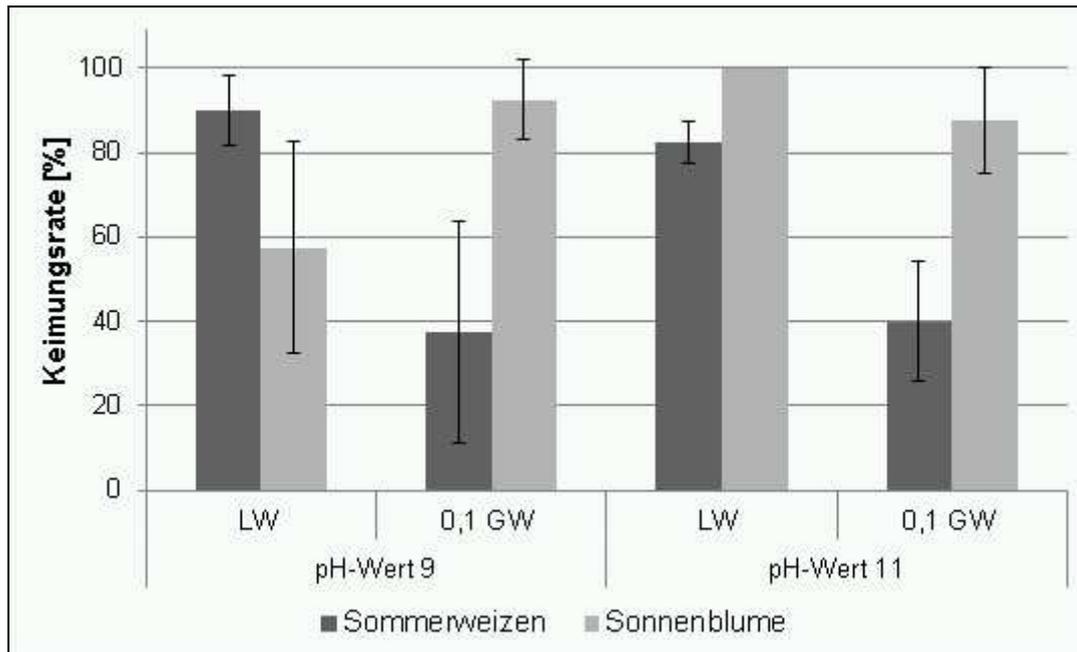
erfolgte bei der 1:100 Verdünnung; die Resultate waren besser als bei Leitungswasser (siehe Abbildung 75).



**Abbildung 74: Keimung von Weizen und Sonnenblume bei Zugabe von Urin (1 GW), 1:10 und 1:100 verdünntem Urin (0,1 GW; 0,01 GW); Standardabweichung für n=4.**

Die Zugabe von verschiedenen Wirkstoffen, unter anderem einem Hormon (Carbamazepin, Diclofenac, Atenolol und Verapamil, 17 $\beta$ -Estradiol) zu verdünntem Urin führte in keiner Konzentration bei Sonnenblume oder Weizen zu einer Keimungshemmung. Die Wirkstoffe führten auch bei erhöhten Konzentrationen zu keiner schlechteren Keimung von Saatgut.

Die Variation des pH-Werts hatte keine Auswirkungen bei pH-Werten 5 und 7, nur bei alkalischen pH-Werten (pH 9, 11) zeigte sich bei Weizen in verdünntem Urin eine reduzierte Keimungsrate. Dieser pH-Effekt war jedoch bei reiner Leitungswassergabe (Kontrolle) nicht wiederholbar (Abbildung 75). Auch bei Sonnenblume war eine pH induzierte Keimungshemmung nicht erkennbar. Viel offensichtlicher war die komplette Hemmung bei Zugabe von unverdünntem Urin, unabhängig vom pH.



**Abbildung 75: Keimung von Weizen und Sonnenblume bei Zugabe von Leitungswasser (LW) und 1:10 verdünntem Urin (0,1 GW) in pH 9 und 11; Standardabweichung für n=4.**

Hingegen zeigten alle untersuchten Salze - NaCl,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , - in Konzentrationen, die mit der im Urin vergleichbar sind ( $0.2 \text{ mol l}^{-1}$ ) eine Hemmung bei der Keimung von Weizen und Sonnenblume. Selbst in 10-fach niedrigerer Konzentration waren Einflüsse bei beiden Pflanzen nachweisbar (Abbildung 76).

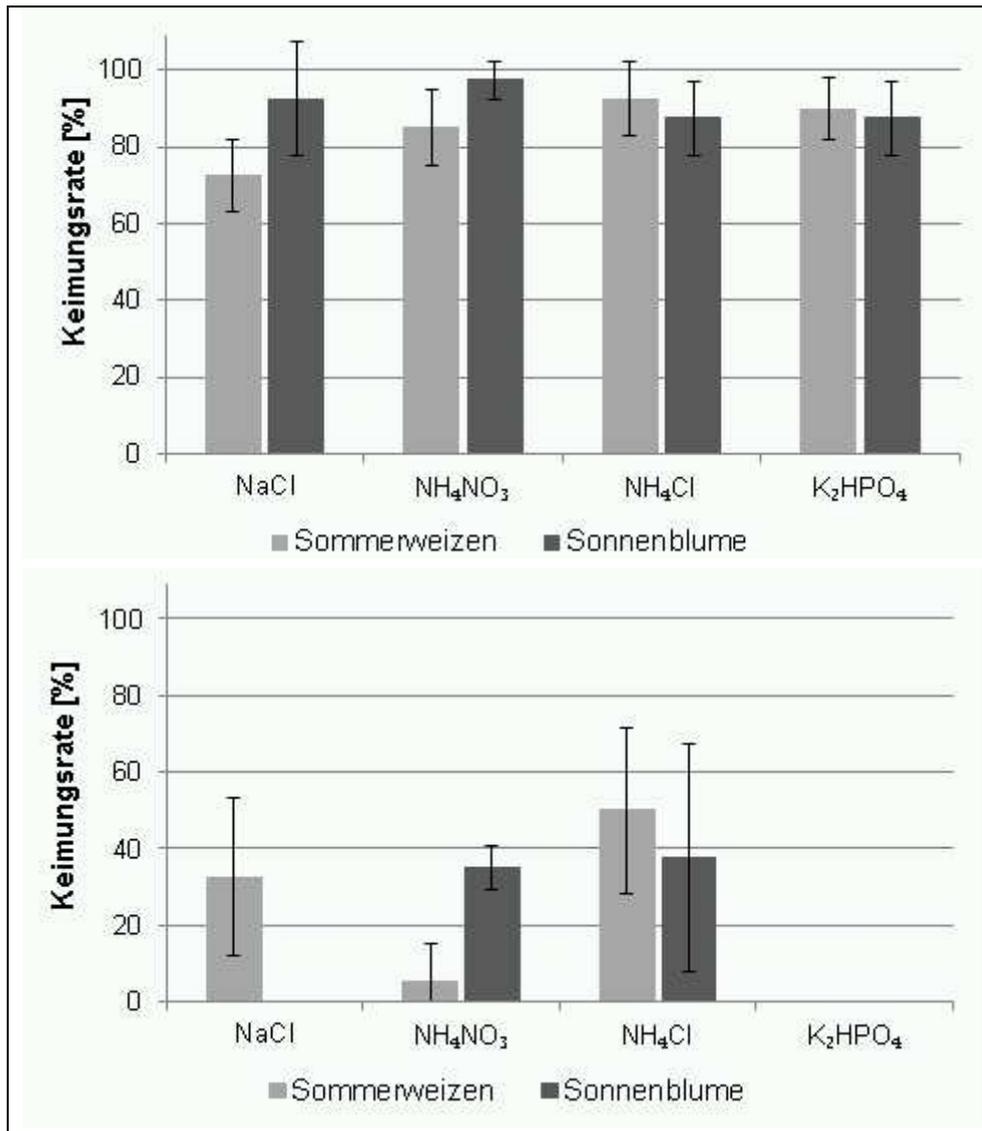


Abbildung 76: Keimungsraten von Sommerweizen und Sonnenblume bei der Anwendung verschiedener Salze in zwei verschiedenen Molaritäten; Oben: 0,02 mol l<sup>-1</sup>; Unten: 0,2 mol l<sup>-1</sup>; n=4.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Keimung von Pflanzensamen durch Salze im Urin behindert wird, wenn diese in Konzentrationen wie z.B. im GIZ-Urin (und noch 10fach verdünnt) direkt auf das Saatgut gelangen. Ein Einfluss von pharmazeutischen Wirkstoffen war auch bei höherer Konzentration nicht nachzuweisen, pH-Effekte sind vereinzelt von Bedeutung. Im Feldversuch, wo Urin aus den GIZ-Tanks appliziert wurde, war eine Hemmung bei der Keimung von Weizen oder Mais nicht zu beobachten. Im Unterschied zum Keimungsversuch, wo das Samenkorn direkt in Kontakt mit der Salzlösung steht, gelangt der Dünger im Feld jedoch nicht direkt auf das Saatgut, sondern wird vom Boden gepuffert.

### 3.5.3.3 Risikobetrachtungen

Als potenzielles Risiko bei der Anwendung von Urin und anderen sekundären Rohstoffdüngern ist die Aufnahme von Schadstoffen zu nennen. Anders als im Klärschlamm befinden sich zwar kaum Schwermetalle im Urin, auch die Gefahr der Übertragung von Krankheitserregern ist recht gering (siehe auch Kapitel 3.4.3.1 sowie Höglund, 2001; Arnold, 2010; Wohl-

sager et al., 2010). Allerdings befinden sich Arzneimittel, die ausgeschieden werden, im Urin bzw. Abwasser. Die Konzentrationen sind i.d.R. sehr gering, könnten aber dennoch eine Beeinflussung der aquatischen bzw. terrestrischen Ökosysteme darstellen. Ob und in wie weit eine Aufnahme von Wirkstoffen in Urin in Pflanzen stattfindet, sollte untersucht werden.

### **3.5.3.3.1 Methodenentwicklung zum Nachweis von endokrinen Disruptoren in Urin, MAP und Boden**

Im Rahmen des Projekts wurde das Nachweisverfahren für endokrine Disruptoren (EDC) von Routledge und Sumpter (1996) auf Urin, MAP und Boden angepasst. Für die Vorbereitung der neuen Medien erwiesen sich folgende Behandlungen als geeignet:

Für Urin: Filtration (Porendurchmesser 0,2 µm) und nachfolgende Festphasenextraktion (SPE column Strata™ X Phenomenex polymeric reversed phase 200 mg (6 ml)<sup>-1</sup>, part no 8B-S100-FCH), Probenmenge 5 ml.

Die SPE-Patrone wurde mit 8 ml Methanol aktiviert und anschließend mit 8 ml einer Wasser-Methanol-Mischung (95:5) gewaschen. Danach wurde sie kontinuierlich mit einer Rate von 5,5-6 ml min<sup>-1</sup> mit der filtrierten Urinprobe befüllt. Der nächste Waschvorgang erfolgte mit einem Methanol-Wasser-Gemisch im Verhältnis 1:1 und mit 10 ml einer Aceton-Wasser-Lösung (1:2). Danach wurde die Patrone getrocknet. Abschließend wurden die EDCs mit 7 ml Methanol eluiert und bis zur EDC-Analyse im YES-Verfahren nicht länger als 1 Woche bei 4°C gelagert.

Für Feststoffe (MAP, Boden): Zweifache Methanolextraktion, Zentrifugation und Evaporation des Überstands unter N-Atmosphäre durchgeführt.

Von dem sehr fein gemahlten Boden wurden 10 g jeder Probe in einen 50 ml Erlenmeyerkolben gegeben, mit Alufolie abgedeckt und zweimal mit Methanol bei 40- 45°C geschüttelt (je 45 min). Danach wurde die Suspension in ein Zentrifugenröhrchen aus Polypropylen gegeben und 10 min bei 4,000 rpm und 4°C zentrifugiert. Anschließend wurde der Überstand mit Hilfe von N-Gas entfernt. Der trockene Rückstand wurde in 500 µl Methanol gelöst und bei 4°C in 1,5 ml-Glasfläschchen bis zur Analyse aufbewahrt. Mit dieser Vorbereitung lagen die Wiederfindungsraten für Boden, die mit 17β-Estradiol-Standard (Sigma) bestimmt wurden, bei 107,6±19,5.

Das Extraktionsverfahren für Weizenkörnerproben war das gleiche, es erfolgte lediglich eine Einwaage von 10 g. Allerdings führten verschiedene natürliche pflanzliche Inhaltsstoffe, wie z.B. Chlorophyll, Öle, Phytohormone zu Störungen beim Nachweis, so dass - je nach Probenmaterial - weitere Schritte für die Bestimmung der EDC entwickelt wurden.

Für öl- und chlorophyllhaltige Pflanzenteile (wie z.B. Sonnenblumensamen, bzw. -blätter) erwies es sich als notwendig, den Überstand nach Zentrifugation (und vor Trocknung) mittels Festphasenextraktion noch aufzureinigen. Bei Sonnenblumensamen verblieben dennoch ölige Reste, die eine Bindung der östrogenaktiven Elemente verhinderten. Daher wurde Dimethylsulfoxid (DMSO) zugegeben, um den Transport an die Zellen zu ermöglichen. Von den verschiedenen, getesteten Konzentrationen erwies sich 3 % als günstig.

Ausserdem enthalten Pflanzenteile je nach Pflanzenart verschiedene Phytohormone (Milder et al., 2007), die als Östrogene positiv reagieren oder als Antiöstrogene die Reaktion blockieren (Aehle et al., 2007). Eine Aussage über Aufnahme von Hormonen aus Düngern bzw. Boden kann daher nur im Vergleich zu „normal“ bzw. nicht gedüngten Pflanzen erfolgen und Schlussfolgerungen sollten die Kenntnis über die Pflanzenbestandteile beinhalten. In Weizenkörnern ließen sich EDC mittels YES-Test gut nachweisen; mittels Standards (17 $\beta$ -Estradiol (E2), Sigma-Aldrich) wurden Wiederfindungsraten von 96,2 $\pm$ 19,8 ermittelt.

### **3.5.3.3.2 Gefäßversuche zur Aufnahme von Pharmazeutika und Hormonen in die Pflanze**

Bisher war eine Aufnahme von verschiedenen Pharmazeutika aus Urin v.a. bei sehr viel höheren Konzentrationen im beobachtet worden (Schneider 2005). Carbamazepin war bereits bei Urin-typischen Konzentrationen in Weidelgras von Winker et al. (2010a) nachgewiesen worden. In dem durchgeführten Versuch war Sommerweizen im Gewächshaus angezogen und mit Urin, sowie mit Urin, der mit jeweils einem pharmazeutischen Wirkstoff bekannter Konzentration versetzt worden war, gedüngt worden (Abbildung 77). Die Zugabe der Stoffe hatte keinen negativen Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen; die Erträge unterschieden sich nicht signifikant.

Die Analyse der Weizenkörner auf die vier pharmazeutischen Wirkstoffe ergab folgende Ergebnisse:

- Keine pharmazeutischen Wirkstoffe in den (nur) mit Urin gedüngten Pflanzen.
- Kein Nachweis der gespikten Wirkstoffe Diclophenac, Verapamil und Atenolol
- Nachweis von Carbamazepin bei den mit dem Wirkstoff versetzten Varianten im Korn, höhere Konzentrationen im Stängel.

Die Untersuchung auf Hormone ergab keine erhöhten Konzentrationen im Weizenkorn. Pflanzen enthalten bereits natürlicherweise Phytohormone. Da deren Konzentration mit der Pflanzenart variiert, kann der Nachweis nur im Vergleich zu einer Null-Wirkstoff-Pflanze der gleichen Art und Sorte innerhalb des Versuchsansatzes erfolgen.

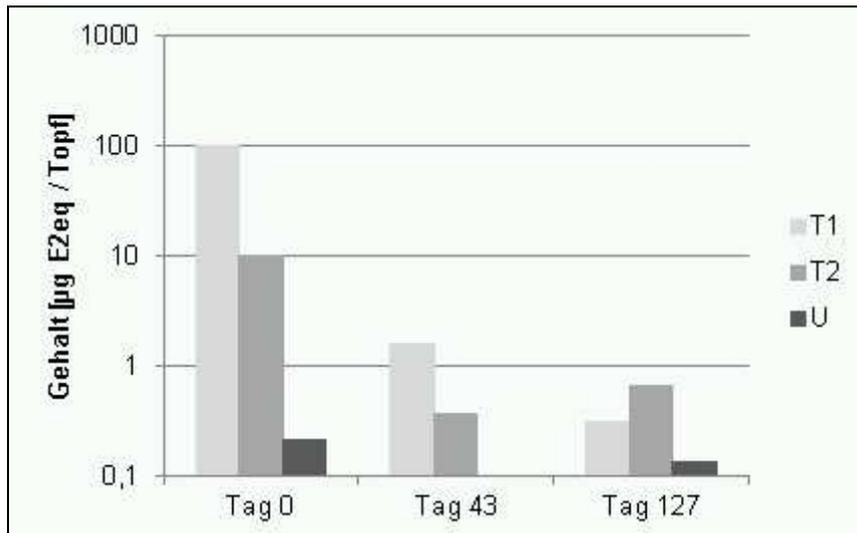


**Abbildung 77: Kultivierung von Weizen in Kick-Brauckmann-Töpfen zum Zeitpunkt der zweiten Urin-Düngung, je 5 Pflanzen pro Gefäß.**

Die Untersuchungen zur Gefährdungsabschätzung zeigten, dass Pflanzen bestimmte Pharmazeutika aus dem Boden in ihre Pflanzenteile aufnehmen können. Dieser Nachweis konnte im Gewächshaus bei einem von vier zusätzlich applizierten pharmazeutischen Wirkstoffen - für Carbamazepin - bei der Kultivierung von Weizen erbracht werden. Die nachgewiesenen Konzentrationen sind sehr gering ( $\text{ng kg}^{-1}$  Weizen) und liegen damit mehrere Log-Stufen unter den Tagesdosen bei der Medikation ( $\text{mg-g d}^{-1}$ ) bzw. den angestrebten Konzentrationen im Blut.

### 3.5.3.3 Abbauverhalten von Östrogenen in Böden

Die Ergebnisse der E2-Konzentration im Boden bei der Kultivierung von Sommerweizen im Gefäßversuch (Abbildung 78) dass nach 43 Tagen, d.h. nach 1/3 der Vegetationszeit, im Boden nur noch etwa 1/100 der ursprünglich aufgebrauchten Menge nachweisbar ( $1,6 \mu\text{g}$  von  $100 \mu\text{g E2eq}$ ) war. Am Ende des Versuchs waren noch  $0,3 \mu\text{g E2eq}$  je Kick-Brauckmann-Topf enthalten. Bei Zugabe von  $10 \mu\text{g E2}$  war die prozentuale Reduzierung etwas geringer, nach 43 Tagen noch 0,3% bzw. nach 129 Tagen noch 0,6% vorhanden.



**Abbildung 78: Abnahme von E2 im Verlauf des Gefäßversuchs bei Zugabe von Urin (U), zusätzlicher Gabe von 100 µg E2 (T1) und 10 µg (T2),  $n_0=6$ ,  $n_{43}=2$ ,  $n_{127}=4$ .**

Diese Befunde liegen im Rahmen der Ergebnisse, die von anderen Arbeitsgruppen zum Abbau von Steroidhormonen in Böden gefunden wurden (Colucci et al., 2001; Lee et al., 2003; Lucas und Jones, 2006). Tabelle 38 gibt eine Übersicht über die ermittelten Halbwertszeiten. Als Einflussgrößen für die Geschwindigkeit des Östrogenabbaus wurden verschiedene Faktoren als maßgeblich genannt: Sterilität (Colucci et al., 2001), Substrat in dem das Östrogen dem Boden zugegeben wird (Lucas und Jones, 2006) und Temperatur (vergleichbar bei 10°, 19° und 30°C, nur bei 4°C stark reduziert, Colucci und Topp, 2001). Generell wird die Anwesenheit von Mikroorganismen und Sauerstoff für den Abbau als wichtig erachtet. Anaerober Abbau von Östrogenen findet nur in minimalem Umfang statt (Czajka und Londry, 2006).

**Tabelle 38: Übersicht über Abbauraten von Hormonen in Böden.**

Hormone	Boden /Sediment <sup>1</sup>	Halbwertszeit $t_{1/2}$ [d]	Referenz
17 $\beta$ -Estradiol	Sandiger Lehm, schluffiger Lehm	0,5	Colucci et al., 2001
17 $\alpha$ -Ethinylestradiol	Sandiger Lehm, schluffiger Lehm	7,7	Colucci und Topp, 2001
17 $\beta$ -Estradiol	sandiger Boden (EPA1)	4,5-9,7	Lee et al., 2003
	schluffiger Ton (Drummer 1)	0,8-1,1	Lee et al., 2003
17 $\alpha$ -Ethinylestradiol	Sandiger Boden (EPA1)	4,1-9,6	Lee et al., 2003
	Sandiger Lehm (Bloomfield)	3,7-6,5	Lee et al., 2003
	Schluffiger Ton (Drummer 1)	3,1-3,9	Lee et al., 2003
17 $\beta$ -Estradiol u. Estron	Sandig-toniger Lehm (A) <sup>UAS</sup>	13 $\pm$ 3	Lucas und Jones, 2006
	Sandiger Boden (B) <sup>UAS</sup>	10 $\pm$ 3	Lucas und Jones, 2006
	Sandiger Lehm (C) <sup>UAS</sup>	28 $\pm$ 6	Lucas und Jones, 2006
17 $\beta$ -Estradiol u. Estron	Sandig-toniger Lehm (A) <sup>MAS</sup>	5 $\pm$ 1	Lucas und Jones, 2006
	Sandiger Boden (B) <sup>MAS</sup>	5 $\pm$ 1	Lucas und Jones, 2006
	Sandiger Lehm (C) <sup>MAS</sup>	5 $\pm$ 1	Lucas und Jones, 2006

<sup>1</sup> Die Namen in Klammern beziehen sich auf die Namen im Originalartikel. UAS (Urine amended soil): mit Urin angereicherter Boden; MAS (Manure amended soil): mit Gülle/Mist angereicherter Boden.

### 3.5.3.3.4 Nachweis von Pharmazeutika und Hormonen im Feldversuch

In den ausgewählten Proben des Weizens aus dem Feldversuch von 2011 ließ sich keiner der untersuchten Wirkstoffe nachgewiesen. Auch bei den mit Urin gedüngten Varianten konnten die im applizierten Urin vorhandenen Wirkstoffe nicht nachgewiesen werden. Der fehlende Nachweis der Stoffgruppen bedeutet nicht zwingend, dass diese nicht vorhanden sind. Die Konzentration der untersuchten Wirkstoffe in Pflanzen nach Düngung mit Urin liegt jedoch unterhalb der jeweiligen Nachweisgrenzen

Die Untersuchung von hormonaktiven Substanzen im Weizenkorn und im Boden des Feldversuchs erbrachten keine erhöhten Befunde. Abbildung 79 zeigt, dass alle Weizenkörner unabhängig von der Düngungsvariante etwa 0,1 ng E2eq g<sup>-1</sup> Trockenmasse aufwiesen. Die einfache ANOVA (SPSS) zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen ( $p=0.587 > 0.05$ ).

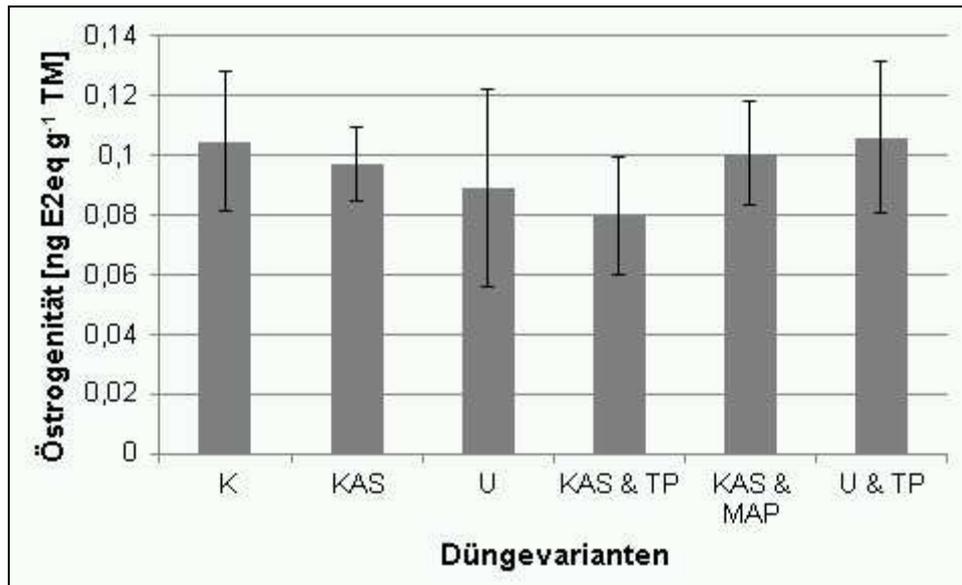


Abbildung 79: Östrogenaktivität in Weizenproben des Freilandversuchs 2011 in E2eq g<sup>-1</sup> Trockenmasse; K = Kontrolle, KAS = Kalkammonsalpeter, U = Urin, TP = Triplephosphat.

Hinsichtlich der Gefährdung durch Arzneimittel bei der Düngung mit Urin lässt sich zusammenfassend folgendes festhalten:

- Grundsätzlich ist es möglich, dass Arzneimittel über den Aufnahmepfad Boden-Pflanze in die essbaren Bestandteile der Pflanze (hier: Weizenkorn) gelangen, sofern ihre Konzentration im Boden hoch genug ist (vgl. Kapitel 3.5.3.3.2).
- Pflanzen, die lediglich mit Urin gedüngt worden waren, zeigten jedoch keine erhöhten Wirkstoffkonzentrationen, weder im Gewächshaus- noch im Freilandversuch. Nachgewiesen werden konnten Arzneimittelwirkstoffe nur dann, wenn ihre Konzentration durch zusätzliche Beimischung erhöht worden war.
- Nach bisherigen Untersuchungen birgt der Verzehr von Weizen, der mit Urin gedüngt ist, keine Gefahr für die menschliche Gesundheit durch die Aufnahme von Arzneimitteln. Arzneimittelwirkstoffe waren in Weizenkörnern nicht nachweisbar.

### 3.5.3.4 Rechtliche Machbarkeit

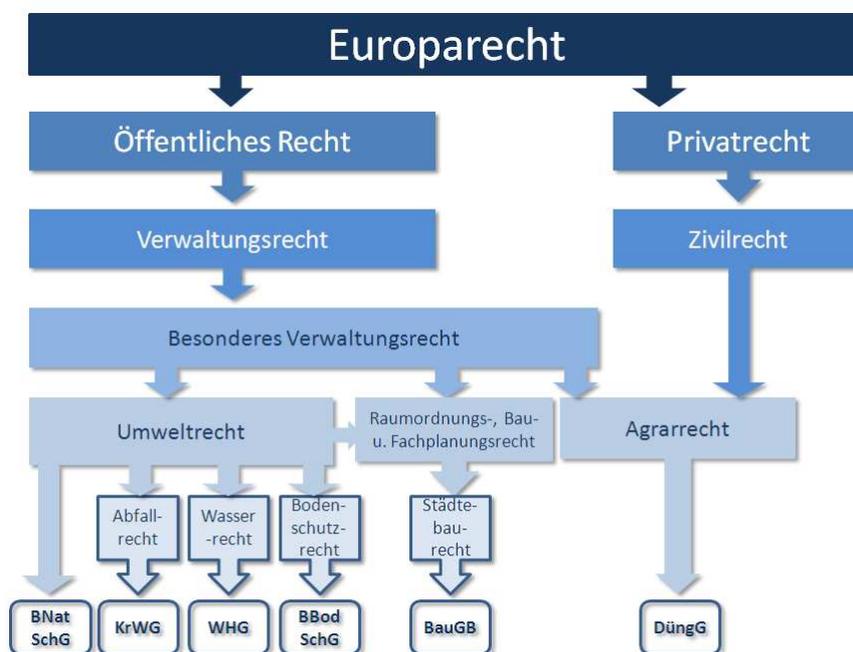
Im Rahmen des Fachausschusses NASS der DWA (dem einige Saniresch-Beteiligte angehören) wurden bereits die wesentlichen deutschen Rechtsvorschriften zusammengestellt und publiziert (DWA, 2008; Clemens et al., 2008). Im Rahmen des Saniresch-Projektes sollten Ergänzungen und Novellierungen erfasst sowie die europäische Rechtslage eruiert werden.

Für eine Verwendung von neuartigen Düngern aus Sanitärsystemen in der Landwirtschaft gelten für die Zulassung, die Anwendung, den Transport und die Lagerung eine Vielzahl Gesetze und Verordnungen aus verschiedenen Rechtsbereichen (Abbildung 80), für die verschiedene Ministerien zuständig sind (v.a. BMELV, BMG, BMU). Wichtig ist zunächst die rechtliche Einstufung, wenn es um die Verwertung von Gelbwasser resp. Urin und MAP geht. Aus rechtlicher Sicht ist sehr entscheidend, als was es definiert wird, d.h. ob menschlicher

Urin und Gelbwasser als „Abfall“ oder „Produkt“ angesehen wird. Diese Definition ist unserer Kenntnis nach bisher nicht zweifelsfrei durch Rechtsprechung erfolgt.

Eine Sache wird nach allgemeiner Auffassung als Produkt bezeichnet, wenn sie zielgerichtet hergestellt wurde, einen positiven Marktwert besitzt und Qualitätsstandards erfüllt. Sie ist dann i. d. R. frei handelbar. Für eine Substanz, die als Dünger verwendet werden soll, ist die explizite Nennung als „Düngemittel“ in der Positiv-Liste der Düngemittel Verordnung (EU bzw. Deutschland) erforderlich.

Als Abfall gilt nach Kreislaufwirtschaftsgesetz wenn folgende Kriterien erfüllt sind: (1) Es handelt sich um eine bewegliche Sache (hierbei wird z.B. fließendes Abwasser nicht, wohl aber flüssiger Abfall in Fässern als beweglich betrachtet). (2) Der Stoff wird in Anhang 1 des KrWG genannt (Nummer Q16 „Stoffe oder Produkte aller Art, die nicht einer der oben erwähnten Gruppen angehören“ schließt quasi alle Stoffe ein). Wichtig ist (3) der Entledigungswille, die tatsächliche Entledigung oder Zwangsentledigung. Explizit ausgenommen von den Vorschriften dieses Gesetzes sind Fäkalien (§2(2), Abs.4, KrWA), es sei denn sie sind als „tierische Nebenprodukte...“ genannt (Nr. 2 (§2(2), Abs.4, KrWA). Für die Verwendung von Abfall gelten die Regelungen des KrWG. Dieses erlaubt grundsätzlich auch die „Aufbringung auf den Boden zum Nutzen der Landwirtschaft oder zur ökologischen Verbesserung“ als eine Möglichkeit der Verwertung (KrWG, Anlage 2, R10).



**Abbildung 80: Übersicht über relevante Rechtsgebiete bei der Verwendung von neuartigen Düngern in der Landwirtschaft mit Zuordnung der wichtigsten Gesetze (BNatSchG = Bundesnaturschutzgesetz, KrWG = Kreislaufwirtschaftsgesetz, WHG = Wasserhaushaltsgesetz, BBodSchG = Bundesbodenschutzgesetz, BauGB = Baugesetzbuch, DüngG = Düngegesetz).**

Folgt man der Auffassung, dass es sich bei den neuartigen Düngern um Wertstoffe bzw. Produkte und nicht um Abfall handelt, ist die Zulassung des Stoffes beim Bundesministerium

für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV, Referat 511) zu beantragen. Der Antrag zum Inverkehrbringen neuer Düngemittel erfordert detaillierte Angaben zur Zusammensetzung, Herkunft und Unbedenklichkeit des neuen Produkts. Die Beurteilung der Eignung erfolgt durch den Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen beim BMELV, der das Ministerium in Düngungsfragen durch gutachterliche Stellungnahmen berät. Die Beiratsmitglieder werden berufen und sind in ihrer Tätigkeit unabhängig.

Als Düngemittel gelten auch Wirtschaftsdünger, also organische Substanzen, die in der Land- und Forstwirtschaft anfallen und zur Düngung eingesetzt werden (Gülle, Jauche und Mist, Gärrest aus der Biogaserzeugung, u.a.). Werden sie auf dem eigenen landwirtschaftlichen Betrieb eingesetzt, sind in Deutschland nur die Vorgaben der Düngeverordnung (DüV) einzuhalten. Diese Verordnung spezifiziert die Vorgaben des Düngegesetzes und regelt unter anderem die erlaubten Ausbringungsmengen und -zeiten. Die Düngemittelverordnung (DüMV) wiederum regelt, welche Substanzen (Dünger, Bodenhilfsstoffe) auf das Feld ausgebracht werden dürfen. Die DüMV kann als eine Art Positivkatalog gesehen werden, in dem Düngemittel sowie deren Eigenschaften gelistet sind (z.B. Herkunft der Inhaltsstoffe, Mindest- bzw. Maximalkonzentration, etc.). Diese DüMV greift auch bei Wirtschaftsdünger, wenn dieser an andere Betriebe abgegeben wird. Dann sind die Nährstoffgehalte zu deklarieren. Darüber hinaus ist dann bei der Abgabe ausserhalb die Verordnung über das Inverkehrbringen und Befördern von Wirtschaftsdünger zu beachten.

Die DüV wurde zuletzt am 24.2.2012 geändert und regelt (1) die gute fachliche Praxis bei der Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie (2) das Vermindern von stofflichen Risiken durch die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und auf anderen Flächen, soweit diese Verordnung dies ausdrücklich bestimmt.

Die Düngemittelverordnung, die u.a. eine Deklaration der Nährstoffgehalte verlangt, greift, wenn Wirtschaftsdünger an andere Betriebe abgegeben werden. Darüber hinaus ist dann die Verordnung über das Inverkehrbringen und Befördern von Wirtschaftsdünger zu beachten. Anm.: Die DüMV vom 5.12.2012 gilt (1) für das Inverkehrbringen von Düngemitteln, die nicht als EG-Düngemittel bezeichnet sind, sowie von Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. (2) [..].

(3) Die §§ 4 bis 8 gelten nicht beim Abgeben von Wirtschaftsdüngern sowie Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln unter ausschließlicher Verwendung von Wirtschaftsdüngern zwischen zwei Betrieben, die demselben Landwirt gehören, sowie zwei juristischen Personen, die beide von demselben Landwirt als alleinigem Anteilseigner oder alleinigem Gesellschafter beherrscht werden, und beim Abgeben dieser Stoffe zwischen einem oder mehreren Landwirten und einer juristischen Person, die von diesem Landwirt als alleinigem Anteilseigner oder alleinigem Gesellschafter beherrscht wird.

Für die Verwendung von Abfall gelten die Regelungen des KrWG. Dieses erlaubt die „Aufbringung auf den Boden zum Nutzen der Landwirtschaft oder zur ökologischen Verbesserung“ als eine Möglichkeit der Verwertung (KrWG, Anlage 2, R10).

Der Anwendungsbereich der nationalen Düngemittelverordnung (DüMV, 2008) ist beschränkt auf Düngemittel, die nicht als „EG-Düngemittel“ gekennzeichnet sind sowie auf organische Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel. Denn parallel zur deutschen Regelung gibt es Regelungen auf Europäischer Ebene. Die EU-Verordnung über Düngemittel (EG, Nr. 2003/2003) regelt die als „EG-Düngemittel“ in Verkehr gebrachten Düngemittel.

Diese Verordnung bezieht sich ausschließlich auf mineralische Düngemittel und ist somit nicht anwendbar auf organische Dünge- bzw. Bodenverbesserungsmittel, wie Kompost, Rinde und Torf (Siebert, 2010). Sie legt gemeinschaftliche Bestimmungen für die Zusammensetzung, Definition, Kennzeichnung und Verpackung von mineralischen Düngemitteln fest. Alle mineralischen Düngemitteltypen der EU-Verordnung sind im Anhang I der Verordnung unter Angabe ihres vorgeschriebenen Mindest- und Höchstgehaltes an Nährstoffen (Stickstoffgehalt, Phosphorgehalt usw.) aufgeführt. Ein Düngemittel darf die Bezeichnung „EG-Düngemittel“ nur tragen, wenn:

- es unter normalen Einsatzbedingungen keine schädlichen Wirkungen auf die Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen bzw. auf die Umwelt hat,
- es wirksame Nährstoffe zuführt,
- geeignete Probenahme-, Analyse- und, sofern erforderlich, Testmethoden verfügbar sind.

Entspricht ein Düngemitteltyp der Verordnung, dürfen die Mitgliedsstaaten nicht verhindern, dass er auf dem Hoheitsgebiet der Gemeinschaft in Verkehr gebracht wird. Es gibt jedoch eine Schutzklausel, die es einem Mitgliedsstaat gestattet, ihn vorübergehend vom Markt zu nehmen, bis eine Studie auf Gemeinschaftsebene vorliegt. Dies ist möglich, wenn ein Mitgliedsstaat der Ansicht ist, dass von dem Düngemittel Gesundheitsrisiken für Mensch und Tier bzw. eine Gefährdung der Umwelt ausgehen.

Eine Zusammenstellung von der wesentlichen Gesetze und Verordnungen befindet sich in einer Übersicht im Anhang (Anlage 6.2.1). Außerdem sind dort die unterschiedlichen Schwermetall-Grenzwerte der verschiedenen Verordnungen zusammengestellt (Anlage 6.2.2).

Die Originaltexte der deutschen Gesetzen und Verordnungen sind verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/>, Informationen zum EG-Düngemittelrecht unter <http://europa.eu>, sowie eine konsolidierte Fassung der EG-Verordnung über Düngemittel unter <http://eur-lex.europa.eu>.

Im Hinblick auf die Anwendung von Düngern aus neuen Santiärsystemen in der Landwirtschaft lässt sich folgendes festhalten. Um einen neuen Düngemitteltyp auf den Markt zu

bringen, ist es erforderlich, ihn in die Anhänge der Düngemittel-Verordnung aufnehmen zu lassen.

- Diese Zulassung ist in Deutschland beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) zu beantragen mit detaillierten Angaben zur Zusammensetzung, Herkunft und Unbedenklichkeit des neuen Produkts. Die Beurteilung der Eignung erfolgt nach gutachterlichen Stellungnahmen durch den Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen.
- Soll die Zulassung auf europäischer Ebene erfolgen und somit die Kennzeichnung „EG-Düngemittel“ zu erwirkt werden, muss der Hersteller technische Unterlagen über die Merkmale des Düngemittels der EU-Kommission bereitstellen. Die Kommission, die dazu von einem Ausschuss unterstützt wird, erteilt oder versagt ihre Genehmigung. Die Bezeichnung „EG-Düngemittel“ betrifft bisher lediglich mineralische Dünger. Allerdings gibt es von Seiten der Substratwirtschaft Bestrebungen nach einer Europa-weiten Regelung für die Kennzeichnung von Kultursubstraten, um den freien Warenverkehr zu gewährleisten.

Die Daten zur Zusammensetzung, Herkunft und Unbedenklichkeit der neuen Produkte wurden im Rahmen des SANIRESCH Projekts erweitert. Ob die vorhandene Datenlage bereits ausreichend für eine Zulassung ist, oder weitere Untersuchungen gefordert sind, kann nur über den Düngemittelberater geprüft werden. Aus technisch-fachlicher Sicht ist die Zulassung beider Dünger aus Sanitärsystemen (MAP und Urin) vorstellbar, jedoch dürfte die Zulassung für MAP leichter möglich sein. Bei Zweifeln des Düngemittelbeirats wäre ggf. eine stufenweise Zulassung geeignet, um über weitere Daten und Erfahrungen die Unbedenklichkeit abzusichern, d.h. Anwendung zunächst eingeschränkt auf Nicht-Nahrungsmittel mit weiterer Datensammlung.

Aus unserer Sicht sollte dann der Begriff „Gelbwasser“ für den gelagerten Urin aus dem Sanitärsystem gewählt werden. Dies dient zum einen zur Unterscheidung von frischem Urin (mit deutlich höherem Nährstoffgehalt) und vermeidet zum anderen die Assoziation mit Ausscheidungen und Ekelgefühlen bei Nicht-Fachleuten bei.

### 3.5.4 Fazit

Die neuartigen Dünger Urin/Gelbwasser und MAP sind in ihrer Wirkung auf Pflanzen mit konventionellen mineralischen Düngern konkurrenzfähig. Die Untersuchungen zeigten gleiche Wirksamkeit zu den Vergleichsdüngern. In Gewächshausexperimenten wurden festgestellt, dass die im Urin enthaltenen Salze bei direktem Kontakt mit Pflanzensamen zu einer Hemmung der Keimung führen. Auch ein hoher pH-Wert kann u.U. bei bestimmten Pflanzen zu einer reduzierten Keimungsrate führen. Im Freilandexperiment trat diese Hemmung jedoch nicht auf, da hier kein unmittelbarer Kontakt zwischen Urin und Pflanzensamen stattfindet.

Die Untersuchungen zeigten, dass Pflanzen bestimmte Arzneimittel aus dem Boden in ihre Pflanzenteile aufnehmen können, wenn deren Konzentration hoch genug ist. Bei einem von

fünf zusätzlich applizierten pharmazeutischen Wirkstoffen (Carbamazepin) wurde - bei der Kultivierung von Weizen im Gewächshaus - die Aufnahme in die Pflanze nachgewiesen. Die nachgewiesenen Konzentrationen lagen im Nanogramm-Bereich und damit mehrere Log-Stufen unter den Tagesdosen bei der Medikation ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) bzw. den angestrebten Konzentrationen im Blut. Weder im Gewächshausversuch noch im Freiland waren in Weizen, der allein mit Urin gedüngt worden war, Arzneimittelwirkstoffe nachweisbar.

Um die neuen Dünger in der Landwirtschaft einzusetzen, ist zunächst eine Zulassung als Düngemittel erforderlich. Die Regelungen der EU- und der deutschen Düngemittelverordnung fordern jeweils den Nachweis der Unbedenklichkeit hinsichtlich der Gesundheit von Menschen, Tieren und Pflanzen bzw. in der Wirkung auf die Umwelt. Technisch-fachlich ist die Erteilung der Zulassung unter Festlegung von bestimmten, definierten Herstellungsverfahren und Anwendungsoptionen durchaus vorstellbar. Ein solcher Antrag auf Zulassung wurde in Deutschland bisher nicht gestellt; dürfte jedoch dann erfolgen, wenn ein wirtschaftlicher Erfolg in Aussicht steht.

Die Untersuchungen im Rahmen des SANIRESCH Projekts zeigten, dass die Produkte bei Landwirten und Konsumenten im Allgemeinen akzeptiert würden (siehe Kapitel 3.6.3.2). Derzeit ist allerdings die Produktverfügbarkeit nicht gegeben und der Kostenaufwand (siehe Kapitel 3.7.3.2) ist aktuell zu hoch.

## 3.6 Akzeptanz (Verantwortlich: RWTH Aachen/Universität Bonn)

### 3.6.1 Ziele der Projektkomponente

Ecological sanitation (Ecosan) und „Akzeptanz“ stellen in der Naturwissenschaft und der Soziologie relativ junge Konzepte bzw. Forschungsrichtungen dar. Der Begriff der Akzeptanz entstand erst Anfang der 1980er Jahre vor dem Hintergrund zunehmender Protestbereitschaft der Gesellschaft im Rahmen der Anti-Atomkraftbewegung im Zuge des zunehmenden Umweltbewusstseins. Zunächst wurde der Begriff als reines Synonym für Zustimmung und Bejahung verwendet, entwickelte sich jedoch recht schnell in Richtung der ursprünglichen Wortbedeutung des Annehmens. Der Begriff steht in enger Verbindung zu Glaubwürdigkeit, Vertrauen, Respekt und Autorität. Die Akzeptanzforschung ist im Vergleich zu anderen Wissenschaften eine verhältnismäßig junge Forschungsrichtung. Erschwerend ist außerdem, dass soziokulturelle Aspekte der Landwirtschaft relativ selten Gegenstand der Forschung sind (Lobao und Meyer, 2011). Dierkes und von Thienen (1982) definieren den Begriff Akzeptanz wie folgt: *„Akzeptanz bezeichnet zunächst einen Sachverhalt nämlich zu einem bestimmten Zeitpunkt festzustellende und sich in bestimmten Meinungs- und Verhaltensformen äußernde Einstellung meist größerer gesellschaftlicher Gruppen gegenüber einzelnen Technologien, ohne dass damit die Gründe für dieses Verhalten bezeichnet würden.“*

Die Nutzerakzeptanz neuartiger Technologien und Systeme stellt für eine erfolgreiche Implementierung eine wichtige Grundvoraussetzung dar. Neue technische Systeme lassen sich nur dann erfolgreich implementieren, wenn diejenigen, die mit dieser neuen Technik umzugehen haben, diese akzeptieren und keine Gründe für eine Verweigerungshaltung entstehen. Diese grundsätzliche Überlegung gilt auch für die Einführung der NoMix-Toiletten und wasserlosen Urinale in Haus I der GIZ in Eschborn ebenso wie für die potentielle Einführung eines Urin-basierten Düngers in die landwirtschaftliche Produktion. Ziel der Projektkomponente „Akzeptanz“ war deshalb die Erfassung der Akzeptanz neuartiger Sanitärsysteme (hier ausgehend von NoMix-Toiletten) und der daraus hervorgehenden Produkte (Urin-basierter Dünger, MAP) auf verschiedenen Nutzerebenen. Die Erfassung der Akzeptanz durch Fragebögen umfassten zum einen die direkten Nutzer, der in der GIZ installierten Sanitärsysteme (RWTH Aachen, Kapitel 3.6.2), Landwirte und Gartenbauer als potentielle Nutzer neuartiger Düngersubstrate aus Urin sowie Konsumenten bzw. Endverbraucher landwirtschaftlicher Produkte, die mit einem Dünger auf Basis von Urin oder Urinprodukten erzeugt wurden (Universität Bonn, Kapitel 3.6.3).

Die Akzeptanz oder auch Nicht-Akzeptanz neuer Technologien ist von mehreren Faktoren abhängig. Generell lassen sich Schwierigkeiten bei der Nutzung oder Funktionsstörungen im Wesentlichen auf drei mögliche Ursachen zurückführen:

- Die eingesetzte Technik erfüllt nicht die notwendigen Anforderungen, funktioniert nicht oder erweist sich in ihrer Handhabung als zu kompliziert oder störanfällig;

- Notwendige Reinigungen und Wartungen werden nur unzureichend oder fehlerhaft durchgeführt;
- Den Nutzern unterlaufen Fehler, die wiederum mehrere Ursachen haben können, wie z.B. ungeeignete oder unzureichende Informationen über Art und Weise der Nutzung.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurden im Rahmen des Projektes die Hautechnik, die Reinigungskräfte und die Nutzer zu ihren Erfahrungen mit den NoMix-Toiletten und wasserlosen Urinalen befragt, wobei der Schwerpunkt auf den Nutzerbefragungen lag. Ziel der Nutzerbefragung war es, die Mitarbeiter des Hauses 1 der GIZ, in dem die NoMix-Toilettenanlagen installiert wurden, hinsichtlich dieser Anlagen zu befragen und somit zu Erkenntnissen über ihre Akzeptanz zu gelangen. Hierbei sollte neben der Evaluation der reinen Nutzungsqualität, der Sauberkeit und möglicher technischer Mängel auch erfragt werden, ob und wie die Möglichkeit des Erwerbs von Hintergrundinformationen über Toilettenanlagen und Projekt vorhanden war, und ob die allgemeine Idee einer Toilettenanlage zur Abwassertrennung, dem Recycling von Nährstoffen und Einsparen von Wasser auf Zustimmung stößt. Die Auswertung dieser Daten soll einen Einblick in eine mögliche Anwendbarkeit außerhalb von Testbedingungen ermöglichen und dabei Schwachstellen und Verbesserungsmöglichkeiten, sowie möglicherweise notwendige Änderungswünsche seitens der Nutzer offenbaren.

Die Erfassung der Akzeptanz eines Urin-basierten Düngers und Düngerprodukten bei Landwirten und Konsumenten wurde von der Universität Bonn realisiert. Auch hier stellt für eine erfolgreiche Implementierung entsprechender Dünger die Akzeptanz neuartiger Dünger und Düngerprodukte auf Produzenten- und Konsumentenebene eine elementare Voraussetzung dar. Folglich ergaben sich als Zielgruppen für die Befragung der Universität Bonn zum einen Landwirte und Gartenbauer als potentielle Abnehmer und Nutzer neuartiger Düngersubstrate aus Urin, zum anderen Konsumenten bzw. Endverbraucher landwirtschaftlicher Produkte. Als Schwerpunkt der Untersuchung wurde das Land Nordrhein-Westfalen ausgewählt. Es bildet mit fast 18 Mio. Einwohnern das bevölkerungsreichste Bundesland Deutschlands und ist ein wichtiges Agrarland. Auf einer Fläche von fast 35.000 km<sup>2</sup> gibt es stark urban geprägte Gebiete und Ballungsräume; 50% der Fläche werden jedoch landwirtschaftlich genutzt (Landwirtschaftskammer, 2011). Eine große Herausforderung bei der Befragung der Landwirte und der Konsumenten lag in der Tatsache begründet, dass sowohl ein Urin-basierter Dünger als auch damit gedüngte landwirtschaftliche Produkte bzw. Lebensmittel völlig neue Konzepte, Zusammenhänge bzw. Ideen für die meisten der Befragten darstellen. Fragestellungen zu Konzepten und Technologien, die „in der Zukunft“ liegen bzw. sich noch in der Entwicklung befinden, stellen für die soziologische Umfrageforschung immer eine Herausforderung dar. Die Umfragen der Universität Bonn auf landwirtschaftlicher und Konsumentenebene hatten gegenüber der Erfassung der Nutzerakzeptanz einen geringeren Umfang.

## 3.6.2 Akzeptanz der Nutzer (RWTH Aachen)

### 3.6.2.1 Material und Methoden

Die Datenerhebung wurde in drei zeitlich aufeinanderfolgenden Befragungsrunden durchgeführt, um mögliche zeitliche Entwicklungen erkennen zu können. Die Befragungsrunden unterschieden sich jedoch hinsichtlich ihrer Durchführung. Die erste Befragungsrunde sah vor, den entsprechenden Mitarbeitern des Hauses 1 einen Fragebogen in Papierform auszuhändigen. Dieser wurde von den Befragungsteilnehmern handschriftlich ausgefüllt, weiterhin wurden in den Antwortfeldern, die offene Nennungen zuließen, auch handschriftliche Beurteilungen und Ergänzungen verfasst. Diese Art der Vorgehensweise wurde jedoch aufgrund von Sicherheitsbedenken, dass hierdurch eine Rückverfolgung auf den jeweiligen Autor nicht auszuschließen sei, abgewandelt. Die zweite und dritte Befragungsrunde wurde daher als ausfüllbares, aber schreibgeschütztes Dokument per Email an die Mitarbeiter entsandt und auf diesem Wege nach der Bearbeitung wieder entgegengenommen, sodass jegliche Meinungsäußerung als vom Textverarbeitungsprogramm vereinheitlichte Zeichenfolge vorlag. Weiterhin wurde eine Identifizierungsmöglichkeit mit vorangegangenen Befragungsrunden abgelehnt. Somit war es nicht möglich, im Sinne einer Längsschnittstudie (mithilfe von Kodierungsmaßnahmen) die Entwicklung einzelner (anonymisierter) Befragungsteilnehmer im Bezug auf die Akzeptanz der NoMix-Toilettenanlagen zu erfassen (vgl. Bortz und Döring, 2006; Schnell et al., 2005; Pöge, 2011).

Die Fragebögen (Kapitel 6.3) wurden eingeleitet durch Bemerkungen über Änderungen und Besonderheiten und enthielten eine kurze Anleitung bzw. Hilfestellung zum Ausfüllen. Darüber hinaus waren Mailadressen sowie Telefonnummern angegeben, die bei möglicherweise auftretenden Fragen den Kontakt zu den Verantwortlichen der Befragung ermöglichten.

Der Fragebogen selbst enthielt zunächst Fragen über die Inanspruchnahme, Qualität und Notwendigkeit grundlegender und weiterführender Informationen zu den NoMix-Toilettenanlagen. Hierdurch sollte erfasst werden, wie groß der Einfluss einer umfassenden Information bzw. Inkenntnissetzung der Mitarbeiter in Haus 1 ist, und wie sehr diese von den angebotenen Informationen Gebrauch machen. Der darauffolgende Abschnitt konzentrierte sich auf die Nutzungspräferenz und -frequenz der NoMix-Toilettenanlagen sowie auf gewünschte Maßnahmen wie z.B. eine Desinfektionsmöglichkeit oder Toilettenbrillenauflage. Außerdem wurde das Verständnis der technischen Funktion des Trennmechanismus und der beiden Öffnungen abgefragt. Ein weiterer Abschnitt bezog sich auf möglicherweise erlebte Probleme bei der Nutzung. Dies schloss neben unsauberen Toilettenanlagen und -kabinen sowie Geruchsbelästigung auch technische Probleme wie z.B. eine unzureichende Spülung ein. Zur Präzisierung des letzten Punktes wurde die Art und Häufigkeit des Spülens erfasst, da dies im Hinblick auf das erklärte Ziel der Wassereinsparung von übergeordneter Relevanz erschien. Die Befragungsteilnehmer wurden außerdem gebeten, Gebrauch und Sauberkeit der NoMix-Toilettenanlagen mit konventionellen Toiletten zu vergleichen und mögliche Vor- und Nachteile der NoMix-Toiletten herauszustellen. Im Folgenden wurde erfragt, ob eine persönliche Nutzung (z.B. im Privathaushalt) vorstellbar wäre, und ob die Befragten zum

Kauf verschiedener mit Hilfe der gewonnenen Nährstoffe hergestellter Produkte bewegt werden könnten. Dies sollte im Zusammenhang mit der Landwirte- und Konsumentenbefragung der Uni Bonn Aufschluss darüber geben, ob bzw. inwieweit solche Produkte Akzeptanz finden. Die folgenden Fragen erfassten verschiedene soziodemographische Merkmale wie Geschlecht, Nationalität, Alter und Ausbildung. In diesem Abschnitt befanden sich außerdem die ab dem zweiten Fragebogen entfernten Fragen zur Dauer der Beschäftigung.

Im Anschluss wurden geschlechtsspezifische Fragen gestellt, die sich auf der Seite der weiblichen Befragungsteilnehmer auf die Möglichkeit der Entsorgung von Damenhygieneartikeln bezogen, und auf der Seite der Männer die zusätzlich eingebauten wasserlosen NoMix-Urinale behandelten. Bei jeder Befragungsrunde wurden außerdem Zusatzfragen für beide Geschlechter implementiert, die auf (z.B. organisatorischen) Veränderungen und Erkenntnissen der letzten Befragungsrunden basierten. Beispielfhaft kann hier die Frage zur Zustimmung oder Ablehnung des Rückbaus der NoMix-Toilettenanlagen in bestimmten Bereichen des Hauses genannt werden. Abschließend hatten alle Befragungsteilnehmer die Möglichkeit, einen Fließtext zu verfassen, der in seiner Orientierung unbeschränkt war und jegliche Äußerungen um das Projekt SANIRESCH und die NoMix-Toilettenanlagen enthalten konnte. Die Anzahl der Fragen bewegte sich, je nach der Menge der Zusatzfragen zwischen 60 und 72.

Die Befragungsergebnisse wurden in eine zuvor erstellte Datenbank der Statistiksoftware SPSS Version 18 übertragen und mit dieser ausgewertet. Hauptsächlich wurden zur Ermittlung der Akzeptanz der NoMix-Toilettenanlagen Häufigkeitsauszählungen, Kreuztabellierungen und grundlegende Zusammenhangsanalysen durchgeführt. Im Folgenden soll besonders, neben der Vorstellung der Ergebnisse der dritten Befragung, eine vergleichende Darstellung der drei Befragungsdurchgänge erfolgen, die auf die zentralen Fragestellungen der Akzeptanz der NoMix-Toilettenanlagen eingeht.

Die in der dritten Befragungsrunde neu integrierten Zusatzfragen orientierten sich besonders an der Einschätzung der Reinigungsmaßnahmen der Toiletten. Hierdurch sollte evaluiert werden, welche Rolle die regelmäßige Toilettenreinigung durch die täglich anwesenden Reinigungskräfte spielt. Um diese Frage zu beantworten, wurde am 28.03.2012 parallel zur 3. Befragungsrunde der Mitarbeiter in Haus 1 auch eine Begehung der dortigen Toilettenanlagen durchgeführt. Die Reinigungskräfte wurden dabei bei ihrer Arbeit beobachtet und befragt, um zusätzliche Informationen über die Vorgehensweise bei der Reinigung und Wartung der NoMix-Toilettenanlagen zu erhalten. Die auf diesem Wege erlangten Erkenntnisse sollen hier neben der Darstellung der Fragebogenauswertungen eine Antwort auf die Frage nach der Relevanz der Reinigung, Reinigungskräfte und ihrer notwendigen Einweisung in die spezielle Wartung der NoMix-Anlagen geben.

Zeitgleich mit jeder Befragungsrunde der Nutzer wurden Gespräche mit Mitarbeitern der Haustechnik sowie Gruppeninterviews mit den Reinigungskräften durchgeführt, um deren Einschätzung der NoMix-Toiletten zu berücksichtigen. Dabei ergab sich bei den Reinigungs-

kräften das Problem, dass die Gespräche auf Grund fehlender Deutsch-Kenntnisse nur über Dolmetscher geführt werden konnten und teilweise nur unter Beisein des deutschen Vorarbeiters. In Ergänzung dazu fand auch eine Begehung und Begleitung des Reinigungspersonals während des Reinigungsprozesses statt.

### **3.6.2.2 Ergebnisse und Diskussionen**

#### **3.6.2.2.1 Haustechnik**

Nach Einbau der NoMix-Toiletten und wasserlosen Urinale wurde die Haustechnik verstärkt mit Geruchsproblemen konfrontiert, die aber durch den Einsatz neuer Geruchsverschlüsse in den Urinalen sowie der Einführung einer zusätzlichen wöchentlichen Einbringung spezieller Reinigungsmittel reduziert werden konnten. Einen Teil der berichteten Probleme sieht die Haustechnik im Design der Toilettenschüsseln, das – verbunden mit unzureichendem Wasserdruck – als Ursache für Papieranstauungen und Verstopfungen ausgemacht wird (siehe hierzu auch Kapitel 3.1.3). Im Laufe des Projektes (noch im Jahr 2009) wurde der Wasserdruck auf allen Etagen auf ein gleiches Niveau erhöht, sodass man von einer Optimierung ausgeht.

Von Seiten der Haustechnik wurden unzureichende Informationen über die neue Technik vor deren Implementierung bedauert, sodass erst Erfahrungen im laufenden Betrieb gesammelt werden mussten. Von Seiten der Nutzer geäußerte Beschwerden (siehe weiter unten) werden allerdings weniger der Technik an sich zugeordnet als vielmehr dem Bereich von Nutzungs- und Reinigungsfehlern. Wenn man von Seiten der Haustechnik in den letzten Gesprächen von einer Optimierung des Systems spricht, so wird damit betont, dass sich von Seiten der Haustechnik keine Maßnahmen mehr ergreifen lassen, die das System in irgendeiner Weise verbessern könnten. Die Aussage ist jedoch insofern zu relativieren, als dass die technische Wartung der Toilettentechnik im Rahmen des Projektes durch die Herstellerfirma übernommen wurde.

#### **3.6.2.2.2 Reinigungspersonal**

Von den Reinigungskräften wurden anfangs ein erhöhter Reinigungsaufwand und damit auch ein erhöhter Zeitbedarf geäußert. Insbesondere wurde aber die Prozedur der Reinigung und des Austausches der Geruchsverschlüsse in den wasserlosen Urinalen als äußerst ekelregend beschrieben (siehe auch Kapitel 3.1.3.3). Außerdem entstand bei den Gesprächen der Eindruck, dass die Reinigungsprozedur zumindest von einigen Reinigungskräften nicht in der gewünschten Weise durchgeführt wurde. Auf Grund dieser Beobachtung wurden im Laufe des Projektes die Reinigungsmaßnahmen wiederholt erläutert und die Nutzung spezieller Reinigungsmittel erklärt.

In den NoMix-Toiletten bereiten eingetrocknete Fäkalreste besondere Probleme, da sie nur mit erheblichem Kraftaufwand und dem Einsatz großer Wassermengen zu beseitigen seien. Dies führt nach Ansicht des Reinigungspersonals zu einem vermehrten Zeitaufwand, der jedoch in der Kalkulation der Reinigungsfirma nicht berücksichtigt werde.

Allgemein wird die Meinung vertreten, dass die NoMix-Toiletten insgesamt schlechter seien als konventionelle Toiletten, dass sie häufiger verstopft und auch schmutziger seien, und dass sich in den Urinalen gelbe Ablagerungen am Rand zeigten, deren Beseitigung Probleme bereiteten. Dies wird nicht auf übliche Nutzungsfolgen zurückgeführt, sondern auf den Einsatz der neuen Technik. Im Laufe der Untersuchung werden diese Ansichten jedoch etwas relativiert und vermehrt die Frage aufgeworfen, ob nicht eine unachtsame Nutzung (oder „Nicht-Nutzung“ bereitgestellter Toilettenbürsten) zu den wahrgenommenen Problemen ursächlich beiträgt.

Dass anfangs adäquate Reinigungsmittel nicht zur Verfügung standen bzw. deren Anwendung nicht ausreichend kommuniziert wurde, hat sicherlich auch zu einer gewissen Verunsicherung des Reinigungspersonals beigetragen. Die während der letzten Befragungsrunde durchgeführte Beobachtung der Toilettenreinigung auf den einzelnen Etagen zeigte, dass die zu Beginn der Untersuchung geäußerten Probleme nicht mehr in gleichem Maße wahrgenommen wurden. „Technische“ Veränderungen (z.B. Einsatz neuer Urinalverschlüsse und spezieller Reinigungsmittel) sowie die Entwicklung einer gewissen Routine haben dazu genauso beigetragen wie wiederholte Informationen des Reinigungspersonals.

Bereits hier zeigt sich, dass der Einsatz der neuen Technik dringend verlangt, das Reinigungspersonal in einen Kommunikationsprozess einzubinden, der Reinigungsprozeduren, sachgemäße Verwendung von speziellen Reinigungsmitteln sowie der Handhabung der Technik, aber auch den möglicherweise erhöhten zeitlichen Aufwand für die Reinigung einschließt. Sowohl das Outsourcing der Reinigungsarbeiten als auch die Tatsache, dass nicht ausreichend deutsch sprechendes Personal zum Einsatz kam, haben einen solchen Kommunikationsprozess erschwert.

### **3.6.2.2.3 Nutzer**

Bei allen drei Befragungsrunden wurden die rund 400 Mitarbeiter angeschrieben, die im für die Untersuchung relevanten Gebäudeteil tätig sind. Die Anzahl der Rückläufe ging dabei über die Befragungsrunden zurück. Während in der ersten Befragung 127 ausgefüllte Fragebögen zurückgeschickt wurden, konnten in der zweiten Runde nur 67 Antwortbögen gezählt werden. An der dritten und letzten Befragung beteiligten sich nur 36 der angeschriebenen Personen. Diese niedrige Fallzahl muss bei Aussagen über die Reliabilität der Nutzungsbewertungen der NoMix-Toilettenanlagen berücksichtigt werden und beschränkt somit die Aussagekraft.

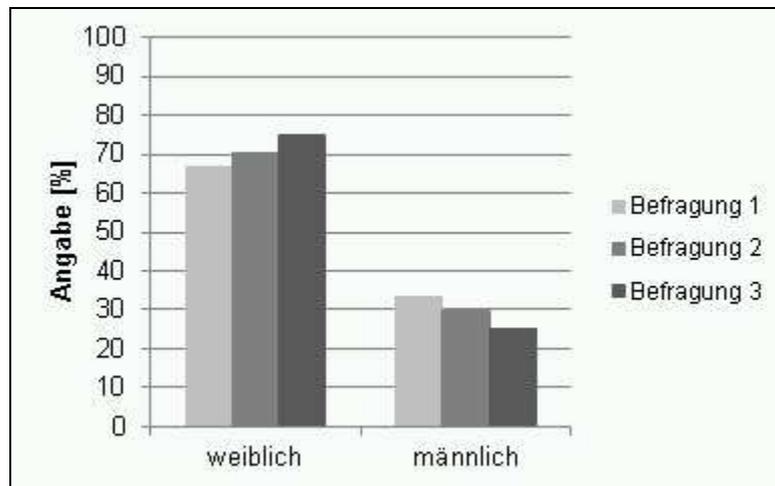
Überdurchschnittlich viele Befragungsteilnehmer sind weiblich<sup>2</sup> (75% in der 3. Befragungsrunde<sup>3</sup>; Abbildung 81). Die Beteiligung männlicher Mitarbeiter an der Befragung ist rückläufig. Als Ursache hierfür kann neben Zeitmangel oder Desinteresse der Anteil weiblicher Mitarbei-

---

<sup>2</sup> Soweit nicht explizit angegeben sind alle Signifikanzen auf dem 5%- $\alpha$ -Fehlerniveau basierend.

<sup>3</sup> Soweit nicht gesondert gekennzeichnet handelt es sich bei allen Aussagen, die Bezug auf nur eine Befragung nehmen, um Ergebnisse der dritten Befragungsrunde.

ter im untersuchten Gebäudeteil der GIZ vermutet werden. Da jedoch keine Daten über die Geschlechterverteilung (bzw. deren Veränderung im Laufe des Projektes) im untersuchten Gebäudebereich vorliegen, können keine genaueren Schlüsse hieraus gezogen werden.



**Abbildung 81: Geschlechterverteilung.**

Das Alter der Befragten ist in allen Befragungsrunden recht gleichmäßig verteilt. In der ersten Befragung antworteten Mitarbeiter von 19 bis 64 Jahren, in der zweiten Runde von 20 bis 64 Jahren und in der dritten Befragungsrunde von 24 bis 63 Jahren, wobei eine recht gleichmäßige Altersverteilung beobachtbar ist. 40% der Befragten der zweiten Runde hatten zuvor noch an keiner Befragung zur Nutzung der NoMix-Toilettenanlagen teilgenommen, während in der dritten Befragung ein ähnlicher Wert (38,9%) erkennbar ist. Aufgrund der sinkenden Anzahl der Rückläufer lässt sich sagen, dass die Bereitschaft zur wiederholten Beantwortung des Fragebogens niedrig ist. Das Interesse der Befragten, die eigenen Ansichten und Erfahrungen in die Weiterbringung des Projektes einzubringen, ist mit steigender Laufzeit desselben gesunken. Es ist jedoch aufgrund der anonymen Befragung nicht möglich, zu evaluieren, zu welchem Teil diese beantworteten Fragebögen von Teilnehmern stammt, die sich bisher bei jeglichen vorangegangenen Befragungen enthalten hat, und wie viele erst nach der ersten oder zweiten Befragungsrunde ihre Arbeit im befragungsrelevanten Teil des Hauses aufgenommen haben, und somit bis dahin auch nicht in Kontakt mit den NoMix-Toiletten kommen konnten. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass auf Grund geäußelter Datenschutzbedenken einige Fragen, die noch in der ersten Erhebung integriert waren, entfernt wurden. Die Fragen, die aus diesem Grund nicht mehr gestellt wurden<sup>4</sup>, bezogen sich auf die Dauer des Arbeitsverhältnisses mit der GIZ sowie der Tätigkeit im mit den NoMix-Toilettenanlagen ausgestatteten Haus 1.

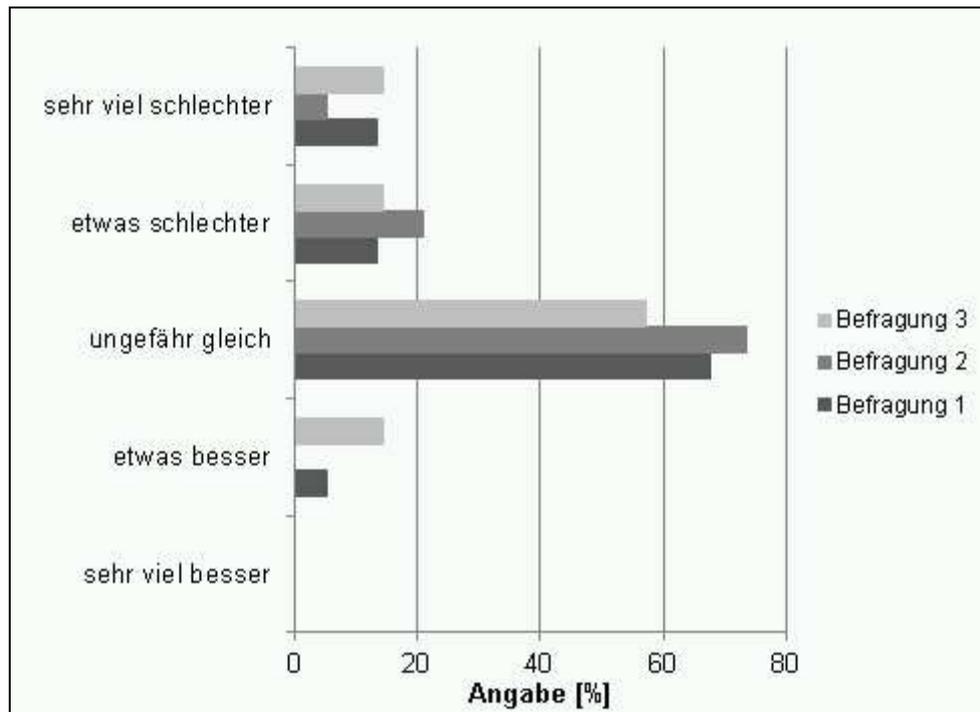
Aus gegebenem Anlass ist die Datenauswertung daher im Hinblick darauf zu betrachten, dass keine Langzeitstudie im klassischen Sinne vorliegt. Es sind keine individuellen Auffas-

<sup>4</sup> Unabhängig hiervon wurden auch weitere Fragen aus logischen Gründen in ihrer Formulierung geändert oder ausgelassen. Siehe hierzu z.B. Frage 19 sowie die aktuellen Zusatzfragen.

sungs- oder Bewertungsveränderungen aus den vorliegenden Angaben ableitbar, da kein direkter Vergleich zwischen den Aussagen von identischen Befragten möglich ist. Wie deutlich wird, stellt der hohe Anteil derer, die bei der zweiten oder dritten Befragung zum ersten Mal teilnehmen (und die Unsicherheit über den Grund des erstmaligen Teilnehmens), im Hinblick auf die Analyse einer Akzeptanz-Tendenz ein methodologisches Problem dar.

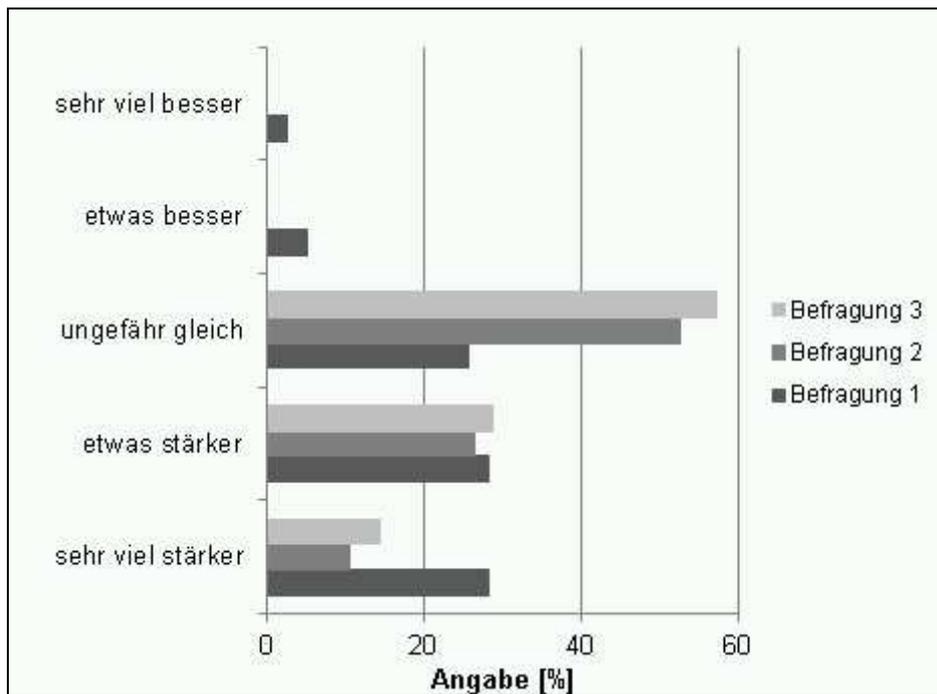
In der dritten Befragungsrunde wurden die Teilnehmer auf ihre Beteiligung am Projekt vor Projektbeginn befragt. Es konnte ermittelt werden, dass 54,5% der Befragten zum Projektbeginn bereits im betroffenen Gebäudeteil tätig und vom Projekt betroffen waren. Von den Mitarbeitern, die bereits vor Projektbeginn hätten einbezogen werden können, wurden genau zwei Drittel nicht hierbei berücksichtigt. Tendenziell fällt die Bewertung der NoMix-Toiletten durch diese Befragten schlechter aus, als durch die vor dem Toiletteneinbau einbezogenen Probanden (nicht signifikant). Die geringe Anzahl der Antwortbögen sollte hierbei jedoch noch einmal betont werden, aufgrund derer keine definitiven deduktiven Schlüsse (Schnell et al., 2005) gezogen werden können. Von den in der dritten Runde befragten Personen wurde kein einziger in die Projektplanung einbezogen, und ein geringer Anteil erhielt vorher Informationen über die Nutzung (27,8%) oder wurde gar nach seiner Meinung zur Einführung der Toilettenanlagen gefragt (11,1%; Prozentangaben sind Anteile der zu Projektbeginn bereits im Gebäudeteil arbeitenden Befragten).

Wie oben bereits erwähnt wurde, kommen in der 3. Befragungsrunde nur 25% der Rückläufer von männlichen Personen (siehe auch Abbildung 81). Die Bewertung der wasserlosen Urinale ist daher weitgehend nur mangelhaft repräsentativ, was im Vergleich zwischen den drei Befragungen berücksichtigt werden sollte.



**Abbildung 82: Bewertung der Sauberkeit von wasserlosen Urinalen im Vergleich zu konventionellen Urinalen.**

Wie aus Abbildung 82 deutlich hervorgeht, bewerteten die befragten Männer die Urinale in Bezug auf ihre Sauberkeit nur in seltenen Fällen besser als konventionelle Modelle. Zum Urinieren nutzen 100% der Herren die eingebauten Urinale, wobei 28,6% die wasserlosen Urinale der Firma Keramag schlechter als konventionelle Urinale bewerteten. In der dritten Befragung scheint die Bewertungsverteilung gleichmäßiger auszufallen als in den zwei vorangegangenen Untersuchungen, doch diese Auffälligkeit muss unter dem Aspekt betrachtet werden, dass lediglich sieben Männer die Grundgesamtheit der hier betrachteten Daten ausmachen. Bei der Analyse aller Befragungsrunden kann das wasserlose Urinal jedoch recht durchschnittlich abschneiden, wobei der Bewertungsschwerpunkt der Sauberkeit den konventionellen Urinalen nur wenig nachsteht.

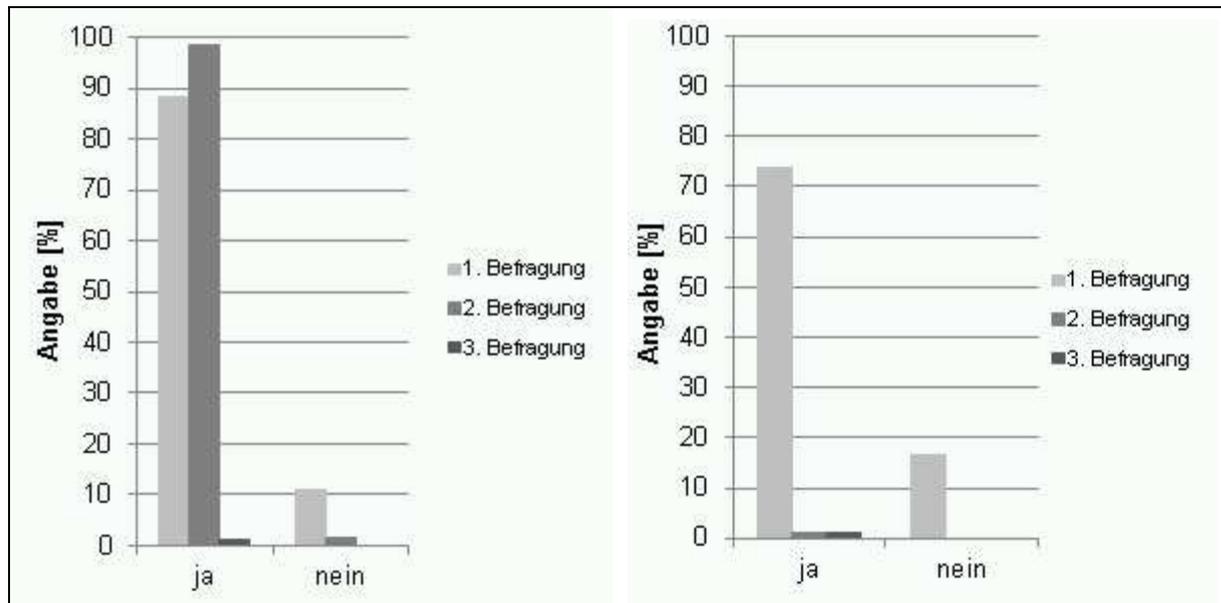


**Abbildung 83: Bewertung der Geruchsbelästigung von wasserlosen Urinalen im Vergleich zu konventionellen Urinalen.**

Die Geruchsbelästigung durch wasserlose Urinale hingegen wird kritischer bewertet (Abbildung 83). Der geringe Anteil derer, die die NoMix-Modelle besser bewertet haben als konventionelle Urinale, ist nur in der ersten Befragung zu sehen. Ursachen für die veränderte Einschätzung lassen sich aus den Ergebnissen der Befragung selbst nicht ableiten. Möglich wäre, dass die positiver eingestellten Mitarbeiter aus unbekanntem Gründen an den weiteren Untersuchungen nicht teilgenommen haben. Andererseits könnten die Urinale durch den längeren Einsatz zu einer stärkeren Geruchsentwicklung geführt haben; oder die Einstellung gegenüber den wasserlosen Modellen hat sich generell verschlechtert, weshalb eine kritischere Bewertung abgegeben wurde. Ein Blick auf den Vergleich aller Befragungsrunden verrät jedoch, dass ein steigender Anteil, in der dritten Runde 57,1% der Befragten, die wasserlosen Urinale im Vergleich zu konventionellen Urinalen als vergleichbar bewertet. Tendenziell ist die Bewertung der wasserlosen Urinale aller Teilnehmer jedoch etwas schlechter ausgefallen als die Bewertung konventioneller Modelle.

Der Gebrauch der wasserlosen Urinale wird von den Nutzern weitgehend als mit konventionellen Modellen vergleichbar empfunden. Während einzelne Befragte die Urinale ablehnen, erkennt der Großteil der Befragten keinen Unterschied oder bewertet die wasserlosen Urinale sogar als besser in Bezug auf den Gebrauch (Frage 57: „Wie empfinden Sie die Sauberkeit der Urinale im Vergleich zu konventionellen Urinalen?“). Zusammengefasst erhalten die wasserlosen Urinale eine den konventionellen Modellen ähnliche Bewertung, wobei Gebrauch und Sauberkeit als gleichwertig oder gar besser, die Geruchsbelästigung jedoch als etwas stärker angesehen wird. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die wasserlosen Urinale bei den Nutzern weitgehend Akzeptanz finden.

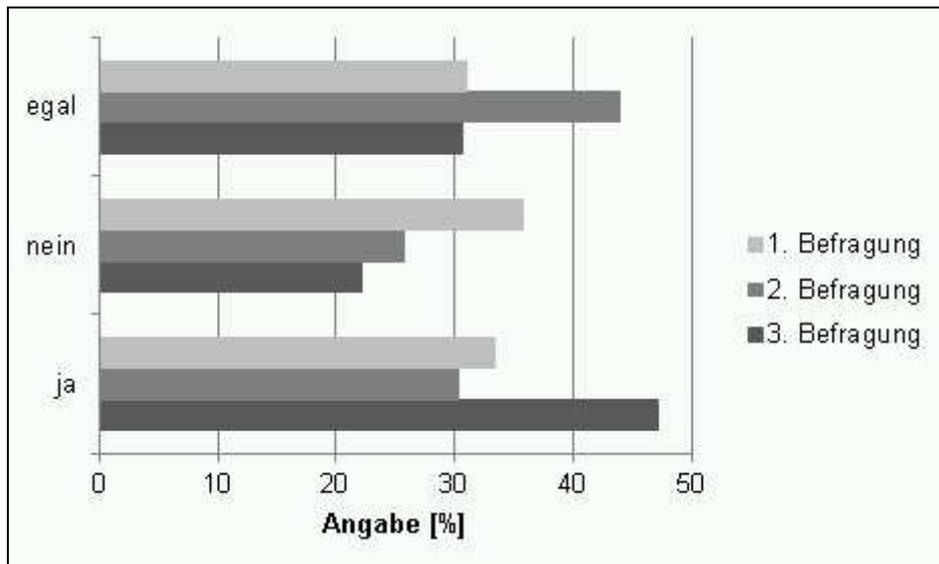
Im Folgenden soll nun betrachtet werden, ob die NoMix-Toiletten in ähnlichem Maße von den Nutzern akzeptiert werden.



**Abbildung 84: Links: Wissen um Trennmechanismus; Rechts: Wissen um Papierentsorgung in hinterer Öffnung der Toilettenschüssel.**

Es ist deutlich sichtbar, dass die Nutzer im Laufe der Zeit über die technischen Besonderheiten wie den Trennmechanismus oder die richtige Nutzung der hinteren Entsorgungsöffnung der Toilettenschüsseln ein besseres Wissen erlangt haben. In der dritten Befragungsrunde konnten alle Teilnehmer die angegebenen Fragen positiv beantworten. Es ist jedoch deutlich sichtbar, dass einigen - wenngleich wenigen - Teilnehmern auch in der zweiten Befragung noch nicht bewusst war, dass das Setzen auf die Toilettenbrille den Trennmechanismus auslöst. Ob dieser Wissensmangel auf die vielen Neueinstellungen bzw. die häufigen Bürowechsel zwischen den GIZ-Gebäuden nach Projektbeginn zurückzuführen ist, kann hier aus o.g. Gründen nicht ermittelt werden. Es kann jedoch festgestellt werden, dass 100% der Befragten eine Information für Erstnutzer für notwendig erachten (Frage 5: „Halten Sie Informationen über die NoMix-Toiletten für Erstnutzer insgesamt für ...?“). Insgesamt lässt sich somit festhalten, dass die in den Toiletten eingesetzten Informationstafeln ihre Wirkung hatten.

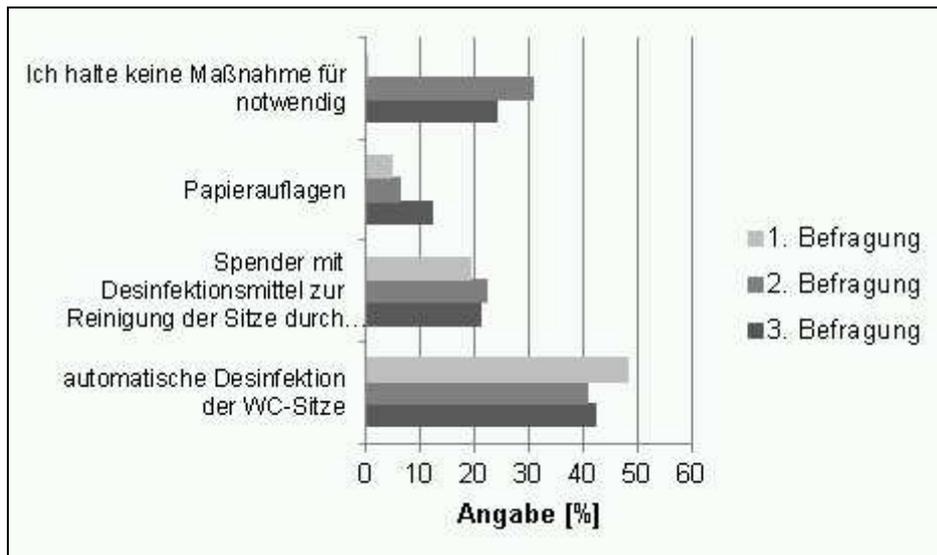
Die Frage, ob die Nutzer der NoMix-Toiletten auch bereit wären, das benutzte Papier in einem separaten Abfallkorb zu entsorgen, wird von einem überwiegenden Teil der Befragten abgelehnt. Antworteten in der ersten Befragungsrunde noch 59% mit „nein“, waren es in der zweiten und dritten Runde bereits 65,9% bzw. 65,5%.



**Abbildung 85: Wunsch nach einem anderen Trennmechanismus.**

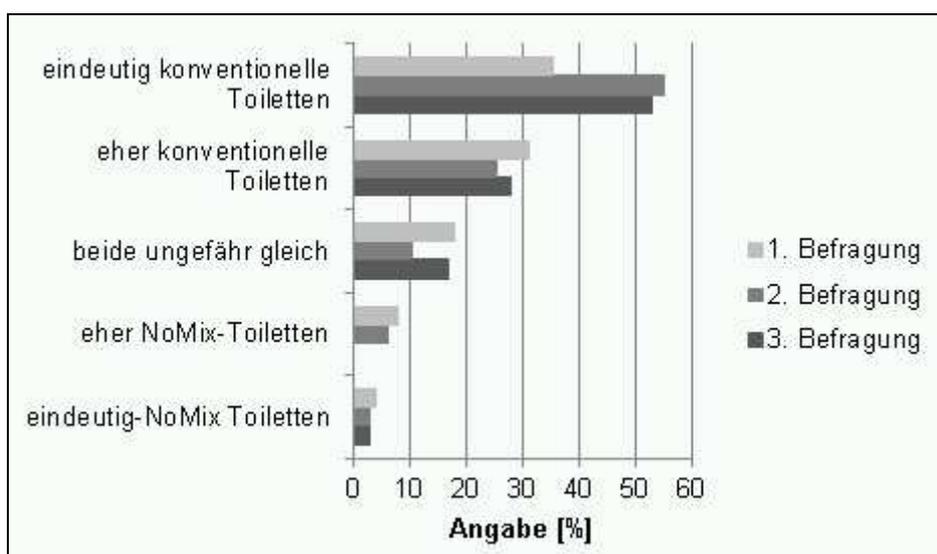
Einen alternativen Trennmechanismus würden 47,2% der befragten Personen bevorzugen. Ein Grund hierfür ist etwa die Tatsache, dass 11,1% der Teilnehmer es ablehnen, sich auf öffentlichen Toiletten hinzusetzen. In den vorangegangenen zwei Befragungsrunden hatten jeweils nur etwa 30% der Teilnehmer angegeben, einen anderen Mechanismus zu bevorzugen.

Im Falle der Frage nach den gewünschten Zusatzmaßnahmen, die bei der Nutzung der No-Mix-Toiletten zur Verfügung stehen sollen, zeigt sich zu einem hohen Prozentsatz, dass sich die Befragungsteilnehmer eine automatische Desinfektion der Sitze wünschen. Ein weiterer Wunsch bezieht sich erneut auf die Möglichkeit der Desinfektion, hier jedoch durch das Anbringen eines Spenders zur manuellen Verwendung durch den Nutzer. Etwa ein Viertel der Befragten halten keine Maßnahmen für notwendig. In ihrer Ausprägung und Verteilung bleiben die Umfrageergebnisse über die drei Befragungsrunden größtenteils konstant. Interessant ist, dass ein Großteil der Nutzer die angesprochenen Maßnahmen nicht nur dann nutzen würde, wenn dies aufgrund offensichtlicher Unsauberkeit der Toilette notwendig ist, sondern bei jedem Besuch. Auch diese Meinung bleibt über die drei Befragungsrunden konstant hoch.



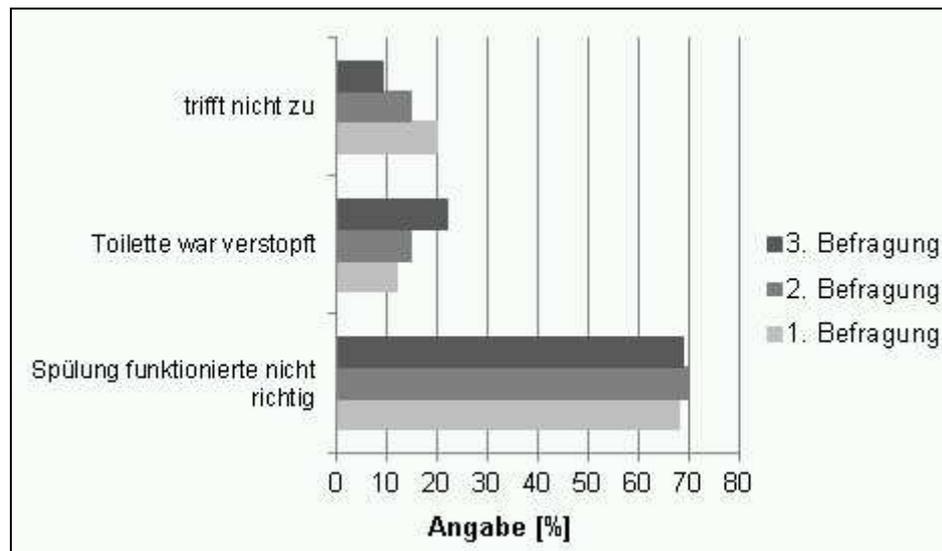
**Abbildung 86: Wunsch nach verschiedenen in den NoMix-Toilettenanlagen angebotenen hygienischen Zusatzmaßnahmen.**

Aus Abbildung 87 kann die Nutzungspräferenz der befragten Personen abgelesen werden. Es gibt einen geringen Anteil von Nutzern, die die NoMix-Modelle bevorzugen, während der Großteil der Befragten eher oder sogar eindeutig zu den konventionellen Toiletten tendiert (27,8% und 52,8%). Es scheint eine zunehmende Ablehnung gegenüber den NoMix-Modellen zu geben, da die Nutzer bei der zweiten und dritten Befragung eine deutlichere Tendenz zur Bevorzugung konventioneller Toiletten zeigen. 11,4% der Probanden gaben an, die NoMix-Toiletten ausschließlich in Notfällen zu benutzen. Obwohl die Befragten in den meisten Fällen eine Bevorzugung der konventionellen Toiletten angaben (80,6%), werden die NoMix-Toiletten von 74,3% der Befragten regelmäßig oder immer genutzt, obwohl die alternativen, konventionellen Modelle auf allen Etagen mit wenigen Schritten mehr erreichbar wären.



**Abbildung 87: Nutzungspräferenz der Teilnehmer.**

Ein möglicher Grund für die Ablehnung gegenüber den NoMix-Toiletten besteht in den bei der Nutzung auftretenden Problemen. Nur 13,9% der Teilnehmer gaben an, die NoMix-Anlage bisher ohne Probleme genutzt zu haben. In allen Befragungsrunden hatten knapp 70% aller Teilnehmer bereits mindestens einmal Probleme mit der Toilettenspülung, und ein ansteigender Prozentsatz von 21,9% in der dritten Runde stand bereits vor dem Problem einer verstopften Toilette. Mit zunehmender Projektdauer wurden mehr Teilnehmer mit technischen Problemen bei der Nutzung konfrontiert.



**Abbildung 88: Technische Probleme bei der Nutzung von NoMix-Toiletten.**

Neben dem negativen Aspekt der technischen Probleme der NoMix-Toiletten klagten die Befragten auch über hygienische Mängel. So war etwa bei 41,7% der Befragten<sup>5</sup> der WC-Sitz nach eigener Anschauung nicht sauber, 13,9% berichteten von einer verunreinigten Toilettenkabine. Bei 52,8% der Befragten wurde eine zu starke Geruchsbelästigung als hygienisches Problem angegeben, und sogar 77,8% berichten von einer schmutzigen Toilettenschüssel. Eine nach Geschlecht aufgeteilte Betrachtung der hygienischen Probleme aus Befragungsrunde 2 ergab, dass die hygienischen Probleme signifikant häufiger von Frauen angegeben werden, also öfter in Damentoiletten auftreten oder von weiblichen Nutzern stärker als störend wahrgenommen werden.

**Tabelle 39: Hygienische Probleme bei der Nutzung von NoMix-Toiletten nach Geschlecht.**

Hygienische Probleme	Männlich	Weiblich
	[%]	
<b>WC-Schüssel schmutzig</b>	30	70
<b>Zu starke Geruchsbelästigung</b>	20	80
<b>WC-Sitz nicht sauber</b>	0	100
<b>Toilettenkabine verunreinigt</b>	0	100

<sup>5</sup> Die Angaben beziehen sich stets auf mindestens einmal aufgetretene Probleme bei der Nutzung.

Eine mögliche Ursache für Verschmutzungen in den Toilettenschüsseln besteht in der zu schwachen Spülkraft: 68,5% der Befragten gaben an, dass bei der Spülung der NoMix-Toiletten häufig (51,4%) oder immer (17,1%) Probleme auftreten (Frage 19), und bei immerhin weiteren 20% treten besagte Probleme manchmal auf. Zwei Drittel der Nutzer halten es für nötig, bei jedem Toilettengang mindestens zweimal die normale Spültaste zu betätigen, während nur 11,4% die Spartaste für das Spülen für ausreichend hält. Tatsächlich gaben 80,6% der Teilnehmer an, die derzeit eingestellte Spülkraft für nicht ausreichend zu halten. Aus den Gesprächen mit der Haustechnik ergab sich, dass aus technischen Gründen eine weitere Erhöhung der Spülkraft bei den verbauten Spülkästen nicht möglich war.

Betrachtet man zusätzlich die Frage 21 („Halten Sie die derzeit eingestellte Spülkraft in den NoMix-Toiletten für ausreichend?“), so zeigt sich, dass trotz einer zwischenzeitlichen Anpassung der Spülkraft diese über alle drei Befragungsrunden als nicht ausreichend empfunden wird. Im Vergleich zur ersten Befragung steigt der prozentuale Anteil derer, die mit „nein“ antworten, später sogar um mehr als 20% an.

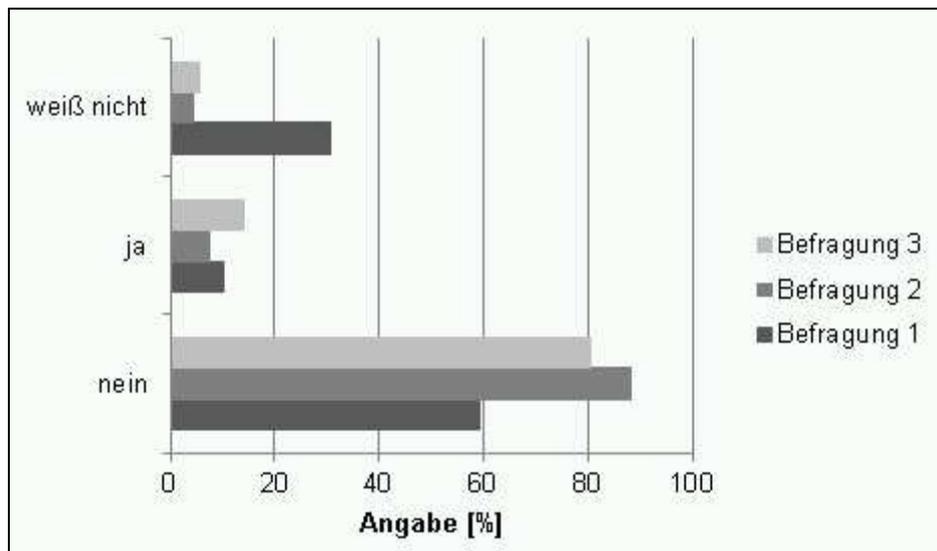
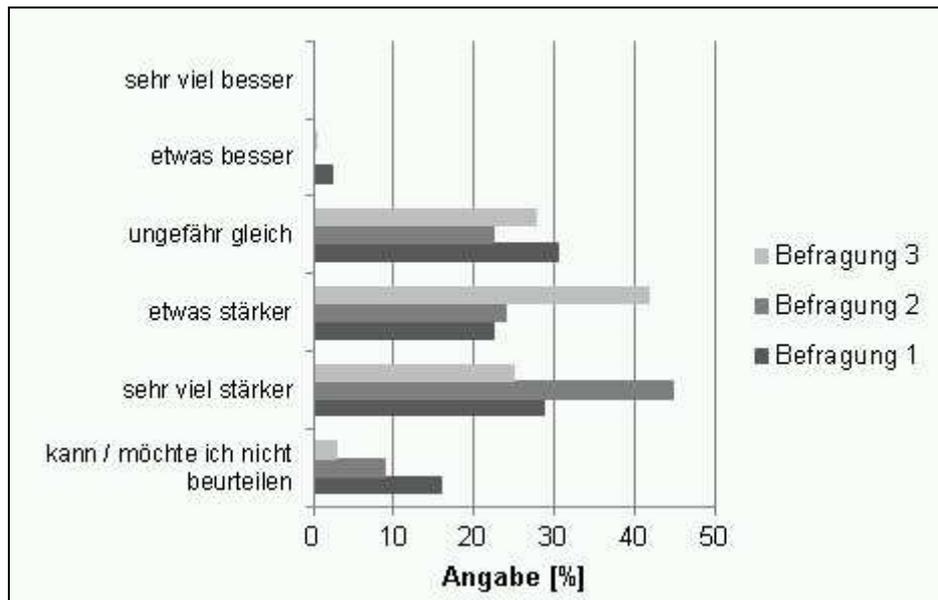


Abbildung 89: Frage 21: „Halten Sie die derzeit eingestellte Spülkraft in den NoMix-Toiletten für ausreichend?“.

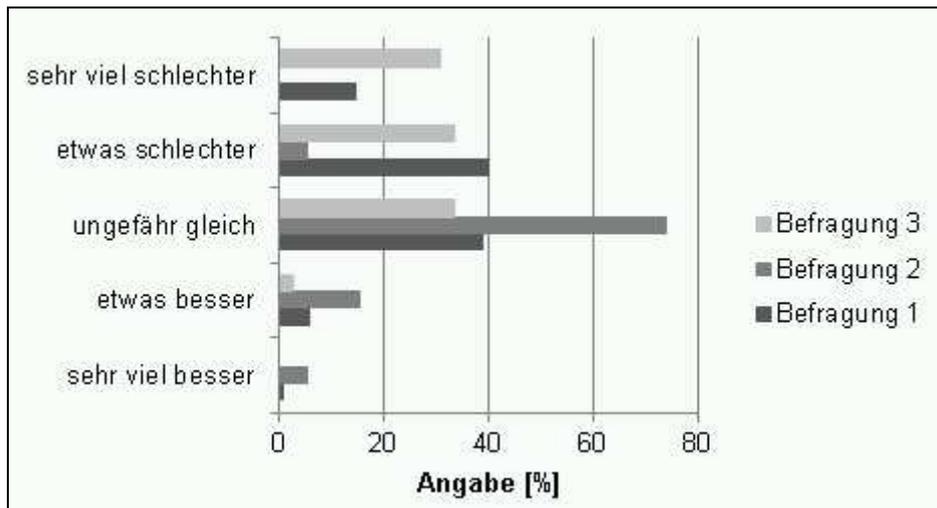


**Abbildung 90: Geruchsbelästigung der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten.**

In keiner der drei Untersuchungen gab auch nur ein Proband an, die NoMix-Toilette stelle eine sehr viel geringere Geruchsbelastung als eine konventionelle Toilette dar. In der letzten Befragung empfanden im Vergleich 25% die NoMix-Toiletten als sehr viel stärkere und 41,7% als etwas stärkere Geruchsbelästigung. Im Vergleich zwischen den Ergebnissen der zweiten und dritten Befragung fällt auf, dass der negative Eindruck bei den Teilnehmern etwas zurückgegangen ist. Es wird vermutet, dass unter anderem die „**radikaleren**“ Gegner der NoMix-Toiletten aufgrund des Bekanntwerdens ihres definitiv geplanten Rückbaus keine Notwendigkeit mehr in der Fragebogenbeantwortung gesehen haben, was sich auch in der Rückläuferanzahl bemerkbar gemacht haben könnte. Faktisch ist jedoch eine deutlich negative Tendenz der Geruchsempfindung bezüglich der NoMix-Toiletten aus den Daten ablesbar. Die Bewertung der Toiletten fällt damit deutlich schlechter aus als die Bewertung der Geruchsbelastung durch die wasserlosen Urinale. Tendenziell bewerteten die männlichen Teilnehmer die Geruchsbelästigung der Toiletten als weniger negativ als weibliche Befragte<sup>6</sup>. Zu bedenken ist aber, dass Frauen bei jedem Toilettengang die Kabinen betreten müssen, und dadurch öfter mit etwaigen Problemen konfrontiert werden.

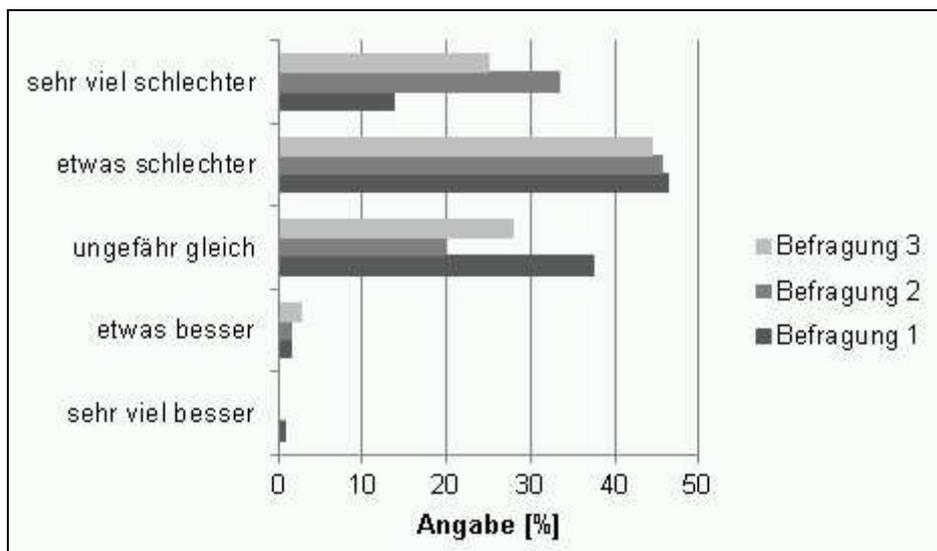
Der Gebrauch der NoMix-Toiletten wird kritisch bewertet. Während in der ersten Befragung ein kleiner Teil der Befragten sich sehr positiv oder sehr negativ hierzu äußerte, bestand in der zweiten Befragung der Großteil aller Ansichten in einer neutralen Aussage. In der letzten Runde zeigen die Befragten sich mit der Nutzung der NoMix-Toiletten als unzufrieden. 30,6% der Befragten empfinden den Gebrauch der Toiletten als sehr viel schlechter im Vergleich zu konventionellen Modellen.

<sup>6</sup> Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass in der beschriebenen dritten Befragung nur 7 männliche Teilnehmer vorliegen.



**Abbildung 91: Gebrauchsempfinden der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten.**

Lediglich ein gutes Drittel der Befragten (36,1%) bewertet den Gebrauch der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten als gleich oder besser. Diese schlechte Bewertung steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit der als unzureichend empfundenen Spülung sowie den häufig auftretenden Problemen bei der Nutzung.



**Abbildung 92: Sauberkeitsempfinden bei NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten.**

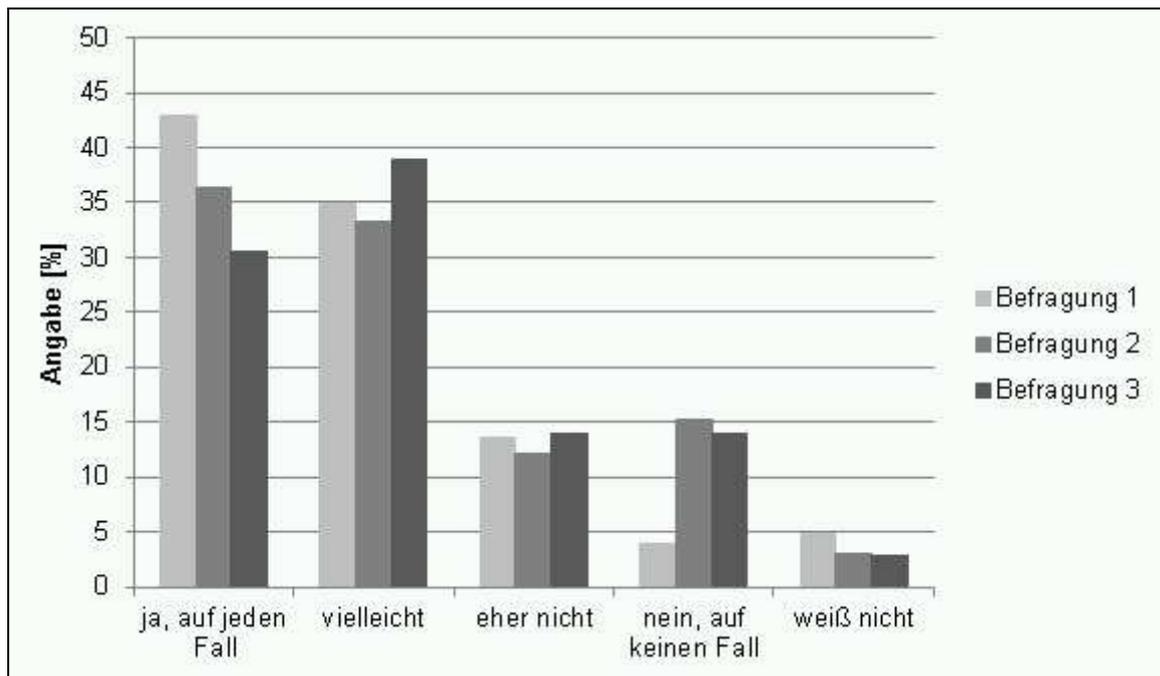
Auch bei der Betrachtung der Angaben der Teilnehmer über die Sauberkeit der NoMix-Toiletten kann nur ein negativer Schluss gezogen werden. Bereits in der ersten Befragung, bei der in vielen anderen Fragen noch weitgehend neutrale Bewertungen gegeben wurden, wurde die Sauberkeit der NoMix-Toiletten als mangelhaft bewertet. In der dritten Befragung haben 25% der Probanden die Sauberkeit im Vergleich zu konventionellen Modellen als sehr viel schlechter eingestuft, und immerhin 44,4% bewerteten die Sauberkeit als etwas schlechter. Lediglich 2,8%, was eine absolute Häufigkeit von nur einem Teilnehmer bedeutet, beur-

teilte die Sauberkeit der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten als besser.

Hieraus lässt sich bereits erahnen, was die Nutzer als Hauptprobleme der NoMix-Toiletten empfinden. Von den Teilnehmern gaben 80,6% an, die Spülkraft als eines der Hauptprobleme anzusehen. 55,6% der Befragten hält die Hygiene der Toiletten für problematisch. Immerhin 27,8% sehen ein Hauptproblem im Design der Toilettenschlüssel. Positiv ist, dass lediglich 2,8% die zu komplizierte Nutzung als Problem angaben. Nur 5,7% der Befragten konnten keine Probleme erkennen. Als Ursachen für die genannten Hauptprobleme der NoMix-Toiletten wurden etwa eine unzureichende Reinigung (36,1%), die unsachgemäße Nutzung (33,3%) sowie die mangelnde Wartung der Toilettenanlagen (8,3%) genannt.

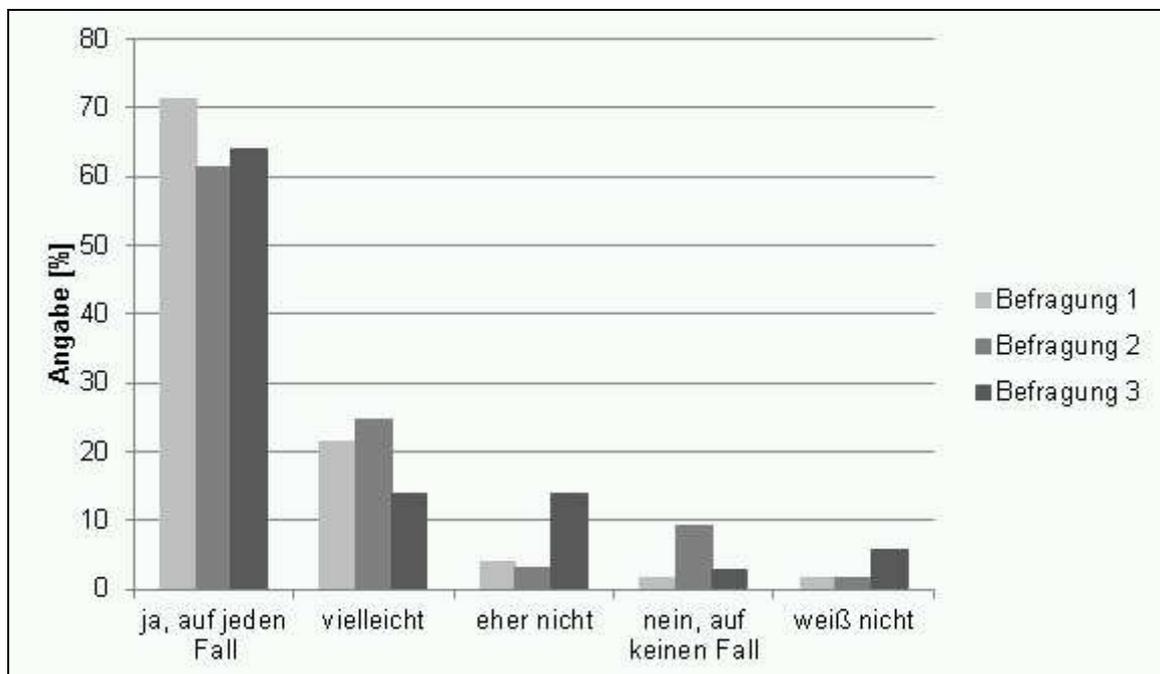
Aus den genannten Problemen ist ein recht zurückhaltendes Interesse für die Nutzung der NoMix-Toiletten im Privathaushalt bereits vermutbar. 72,2% der Teilnehmer lehnten die Erwägung der Nutzung von NoMix-Toiletten im eigenen Haus ab. Als Gründe für diese Ablehnung wurden die mögliche Geruchsbelästigung sowie hygienische Bedenken (je 36,1%), der hohe Anschaffungspreis (33,3%) sowie die höheren Unterhaltskosten (19,4%) genannt (Mehrfachnennungen waren möglich). Offene Nennungen belegen zudem, dass die Idee der Einrichtung der NoMix-Toiletten mit der Vorstellung von dem Einbau einer überdimensionierten Tankanlage im Keller verbunden ist. Die getrennte Sammlung von Urin und Feststoffen zur Nutzung als Düngemittel wird jedoch vom Großteil der Befragten positiv aufgenommen. Für 69,5% der Teilnehmer stellt diese Praxis eine gute (41,7%) oder gar sehr gute (27,8%) Idee dar.

Die Teilnehmer gaben jedoch auch Vorteile an, die sie in der Nutzung von NoMix-Toiletten sehen können (Frage 27: „Worin besteht Ihrer Meinung nach der Hauptvorteile der NoMix-Toiletten?“). Die Wiederverwertung von Nährstoffen durch das Recycling von Urin wurde von 60% der Befragten als positiv bewertet. Die Fragen 34 und 35 (für Details siehe Abbildung 93 und Abbildung 94) ermittelten hierbei, ob die Nutzer sich vorstellen können, Produkte zu kaufen, die mithilfe dieser Nährstoffe produziert wurden.



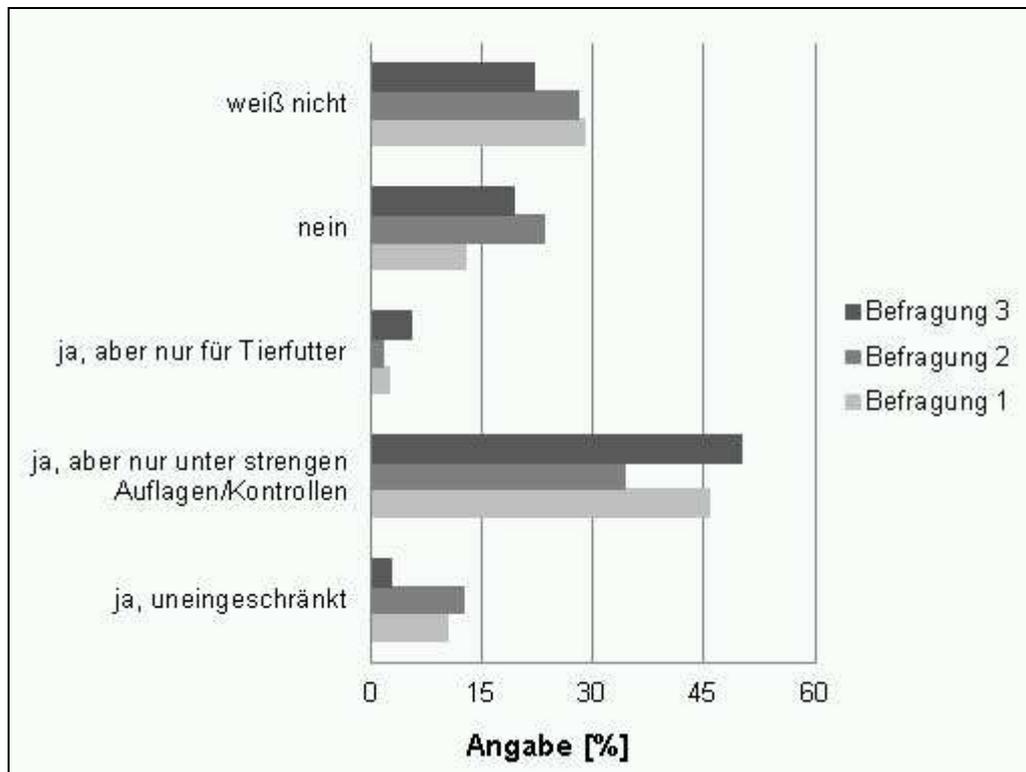
**Abbildung 93: Entwicklung der Frage 34 „Würden Sie Obst oder Gemüse kaufen, das entsprechend der Richtlinien der WHO mit diesen gewonnenen Nährstoffen gedüngt worden ist?“.**

Die Antworten bleiben innerhalb aller drei Befragungsrunden auf einem gleich hohen Niveau, ca. 60-70% der Befragten stehen einem Lebensmittelkauf nicht negativ gegenüber.



**Abbildung 94: Entwicklung der Frage 35 „Würden Sie nicht-essbare Produkte (wie z.B. Blumen oder Baumwollprodukte) kaufen, die mit den aus der getrennten Sammlung gewonnenen Nährstoffe gedüngt worden sind?“.**

Bei der Frage nach dem Kauf von nicht-essbaren Produkten zeigt sich eine noch deutlichere Zustimmung, die ebenfalls über die drei Erhebungsrunden gleich bleibt. Konstant mehr als 60% stimmten zu und stellten fest, dass sie solche Produkte auf jeden Fall kaufen würden.



**Abbildung 95: Entwicklung der Frage 37 „Sollte die Nutzung des über NoMix-Toiletten gewonnenen Urins auch im Biolandbau zugelassen werden?“.**

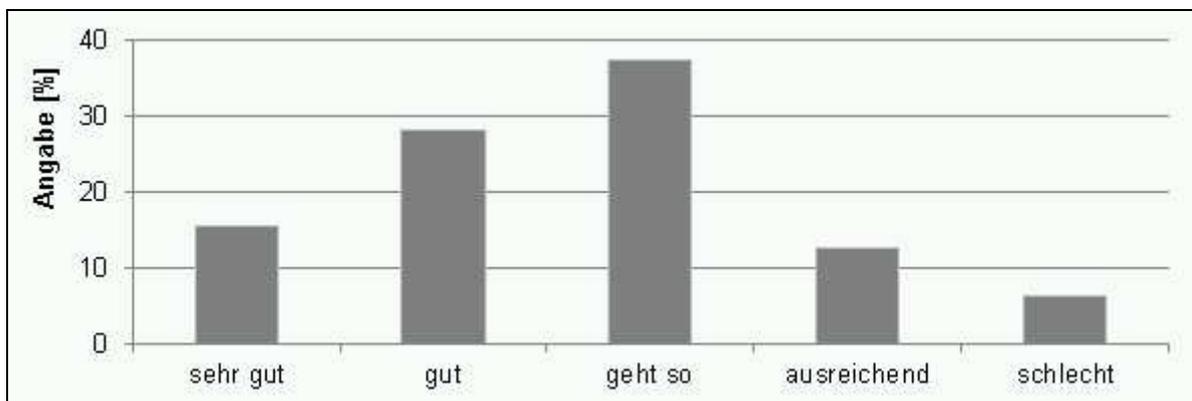
Im Falle der Frage, ob auch im Biolandbau mit den durch die NoMix-Toiletten gewonnenen Nährstoffen gedüngt werden soll, zeigen sich leicht zurückhaltendere Meinungen als bei den zuvor betrachteten. Auch hier bleiben die Umfrageergebnisse größtenteils konstant – einem uneingeschränkten Einsatz im Biolandbau stimmen jedoch ohne strenge Auflagen bzw. Kontrollen nur wenige Umfrageteilnehmer zu.

Obwohl viele Teilnehmer Spülprobleme bei der Nutzung der NoMix-Toiletten angaben, gaben 11,4% der Befragten die Wassereinsparung der Anlagen als Hauptvorteil an. 22,9% der Teilnehmer konnten keine Vorteile der NoMix-Toiletten erkennen, und 37,5% betrachteten die Entwicklung gar als eine technische Spielerei. Für 25% der Befragten stellen die NoMix-Toiletten einen Beitrag zum Umweltschutz dar, und 34,4% halten sie für eine insgesamt sinnvolle Entwicklung. In den Schlussbemerkungen der Teilnehmer wurde in allen drei Befragungsrunden vermehrt angegeben, dass die NoMix-Toiletten eine sinnvolle Technik für Entwicklungsländer darstellen, für die eigene Umgebung jedoch als empfunden werden.

Die in der dritten Befragungsrunde hinzugefügten Zusatzfragen bezogen sich, wie bereits erwähnt, in besonderem Maße auf die Reinigung und Wartung der NoMix-Toiletten. Die neu integrierte Frage „Halten Sie die aktuelle Reinigung / Wartung der wasserlosen Urinale durch

das Reinigungspersonal für ausreichend?“ sollte einen Aufschluss darüber geben, ob die wasserlosen Urinale zur Zufriedenheit der männlichen Nutzer instandgehalten werden. Durch die geringe Anzahl der Rückläufe kann jedoch aus den Daten nur abgelesen werden, dass keiner der sieben männlichen Befragungsteilnehmer die Reinigung und Wartung für unzureichend hält.

Eine weitere Frage bezog sich darauf, ob die zur Verfügung gestellten Toilettenbürsten für eine Reinigung der NoMix-Toilettenschüsseln geeignet sind. Hintergrund für diese Frage war die geäußerte Überlegung, dass durch die designbedingt kleinere hintere Öffnung der Toiletten eine umfassende Säuberung durch Toilettenbürsten, die auf den Gebrauch in konventionellen Toiletten ausgelegt sind, nur schwer möglich ist. 40% der Befragten halten die Toilettenbürsten nicht für geeignet, NoMix-Toiletten mit ihnen zu reinigen. Zahlreichen offenen Nennungen zufolge ist durch die häufigere Verschmutzung der Toiletten (siehe Fazit) auch ein häufigerer Einsatz der Bürsten vonnöten, die jedoch vom Nutzer zu selten gereinigt bzw. von den Reinigungskräften ersetzt werden. Die in den offenen Nennungen hinterlassenen Kommentare legen nahe, dass eine Verschlimmerung der hygienischen Zustände der NoMix-Toiletten durch ein Zusammenspiel von designbedingt kompliziertem Säubern, häufigem Gebrauch der (nicht geeigneten), schnell abgenutzten Toilettenbürsten und häufiger Nichtsäuberung der Bürste aufgrund des geringen Wasservolumens und der langen Auffüllzeit des Wasserbehälters ausgelöst wird.

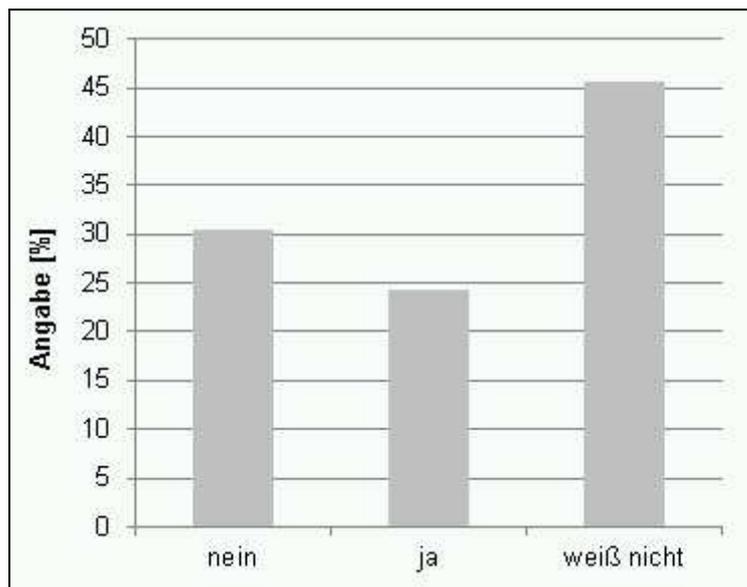


**Abbildung 96: Einschätzung der Qualität der NoMix-Toilettenreinigung durch das Personal in Prozent.**

Die Frage nach der allgemeinen Qualität der Toilettenreinigung durch das Reinigungspersonal zeigt sich tendenziell eher durchschnittlich bis gut. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Mehrheit der Befragten eine häufigere Reinigung der Toilettenanlagen als sinnvoll erachtet. Über 60% der Antworten auf die Frage „Glauben Sie, dass eine mehrfache tägliche Reinigung die Sauberkeit der NoMix-Toiletten verbessern würde?“, wird mit „ja, teilweise“ oder „ja, vollkommen“ beantwortet. Bei Betrachtung der sonstigen Umfrageergebnisse und Einbezug der Äußerungen der offenen Nennungen kann davon ausgegangen werden, dass die Befragten, die „Schuld“ für beschmutzte Toiletten nicht in mangelnder Reinigung durch das Reinigungspersonal suchen, sondern dies eher auf unsachgemäßen Gebrauch oder das Design

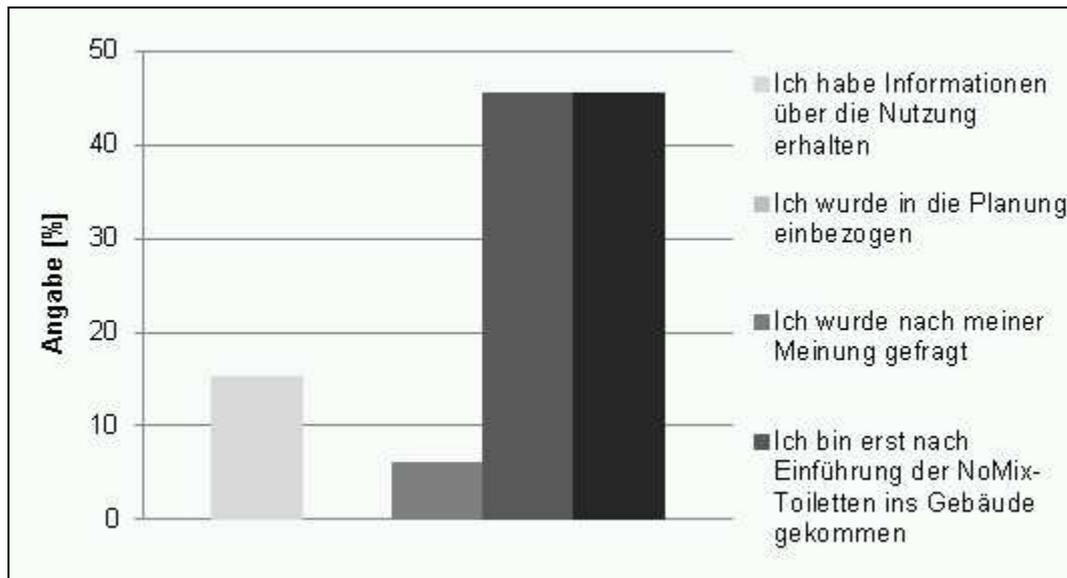
der Toiletten zurückführen – und dennoch mehrheitlich zu dem Schluss kommen, dass eine häufigere Reinigung auch die Sauberkeit verbessern würde.

Im Zusammenhang mit der Reinigungsqualität durch das Personal wurde außerdem die Frage gestellt, ob eine Unterschriftspflicht auf einer Reinigungsliste die Reinigungsleistung verbessern könnte (siehe Abbildung 97). Ein Großteil der Befragten ist sich somit nicht sicher, ob eine solche Maßnahme wirklich zu einer Verbesserung der Hygienesituation führen würde.



**Abbildung 97: Einschätzung der Effektivität der Einführung einer Reinigungsliste in Prozent.**

Mit Blick auf das abschließende Fazit soll auch die Frage 71 vorgestellt werden, die im Zuge der letzten Umfragerunde mittels der Möglichkeit der Mehrfachnennung die Einbindung der Befragungsteilnehmer vor Einführung der NoMix-Toilettenanlagen erfasst hat (Abbildung 98). Hierbei ist zu bemerken, dass ein Drittel derjenigen, die in keiner Weise in das Projekt einbezogen wurden (also „nein“ angegeben haben), schon zu seinem Beginn im Gebäude gearbeitet haben.



**Abbildung 98: Prozentuale Nennungen der Mehrfachantwort nach dem Einbezug der Mitarbeiter in das Projekt SANIRESCH.**

Zusammenfassend zeigt sich, dass eine Bewertung der NoMix-Toilettenanlagen, die über den Zeitraum der drei Befragungsrunden, besonders in den Fragen nach Gebrauch, Sauberkeit und Nutzungswillen, entweder auf gleichem Niveau bleibt oder sich verschlechtert. Hierbei ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die sinkende Anzahl der Rückläufe sich auch auf das Verhältnis bzw. die Tendenz der Bewertungen auswirken kann. Ein solcher systematischer „Drop-Out“, der Befragungsteilnehmer ausfallen lässt, die eine bestimmte Meinung vertreten, führt zu einer statistischen Verzerrung der Umfrageergebnisse (Bortz und Döring, 2006). Es kann vermutet werden, dass im Falle der Befragung der NoMix-Toilettenanlagen im Laufe der Befragungsrunden besonders diejenigen Teilnehmer übriggeblieben sind, die eine starke Abneigung hegen oder (z.B. durch intrinsische Überzeugung des ökologischen Nutzens) ihren Zuspruch ausdrücken wollen. In diesem Falle würden durch besondere Anti- oder Sympathie mit den Toilettenanlagen verbundene Mitarbeiter zu einer erneuten Befragungsteilnahme bewogen werden. Dagegen kann ein Ausbleiben derjenigen Befragungsteilnehmer vermutet werden, die den Toilettenanlagen und dem Projekt neutral gegenüberstehen bzw. sowohl Vor- als auch Nachteile objektiv und konstruktiv anbringen könnten.

Dies kann auch an verschiedenen offenen Abschlussnennungen verdeutlicht werden, bei denen besonders in den späteren Befragungsrunden extremere Ausrichtungen in Richtung einer ablehnenden (oder zustimmenden) Haltung deutlich wird. Während in der ersten Befragungsrunde vereinzelt zustimmende Kommentare handschriftlich ergänzt wurden, die die Vorteile der NoMix-Toiletten herausstellten und neben konstruktiven Verbesserungsvorschlägen zum Fortführen des Projektes aufforderten, findet sich diese Art des Zuspruchs in der zweiten Befragungsrunde kaum, und in der dritten Befragungsrunde in Form zweier Äußerungen, die mit Formulierungen wie „mit gutem Beispiel voran“ eine ideologische Grundeinstellung vermuten lassen. Viele der ablehnenden Kommentare beschränken sich daher in den späteren Befragungen besonders darauf, einen sofortigen Rückbau in konventionelle Anlagen zu fordern, da die NoMix-Anlagen durch Geruchs- und Hygienebelastungen eine

unzumutbare Belastung darstellen. Trotz der während der Projektlaufzeit angehobenen Wassermenge beim Spülen zeigt sich innerhalb der Fragen und Kommentare, dass die Notwendigkeit des mehrmaligen Spülens weiterhin als Zumutung gesehen wird.

Verbessert hat sich im Verlauf der Befragungsrunden das Wissen um die Bedienung der Toilettenanlagen. Zum Ende der dritten Befragungsrunde wussten alle Befragungsteilnehmer, dass der Mechanismus zur Urintrennung durch das Hinunterdrücken der Toilettenbrille ausgelöst wird, somit also ein Hinsetzen zur ordnungsgemäßen Funktion der NoMix-Toilette vonnöten ist.

Die Akzeptanz ist in puncto Hygiene und Geruchsbelastung schlechter als bei konventionellen Toiletten. Weiterhin bestätigt sich, besonders durch die Sichtung der offenen Nennungen, das Ergebnis, dass durch das Design der Toiletten in öffentlichen Gebäuden ein erhöhter Reinigungsaufwand entsteht, da durch die Separierung der Stoffe die hintere Öffnung der Toilette kleiner ausfällt als bei konventionellen Toiletten – und dies zu häufigeren Verschmutzungen der Toilettenschüssel und damit einhergehenden Gerüchen führt. Aus diesem Grund kann sich den wiederholten Hinweisen des Novaquatis-Endberichtes angeschlossen werden, dass für eine Akzeptanz der NoMix-Toiletten durch die spezielle Handhabung und das Design eine „sorgfältige Begleitung“ der Nutzer vonnöten ist (Larsen und Lienert, 2007). Im Zuge des hier begleiteten Projektes im Haus 1 des GIZ bedeutet dies jedoch neben einer umfassenden Informierung auch den frühzeitigen Einbezug der später von den Toilettenanlagen betroffenen Mitarbeiter.

Insgesamt kann beobachtet werden, dass die Urinale besser angenommen werden als die in den Kabinen befindlichen Toilettenschüsseln. Der Grund hierfür liegt, so kann zumindest vermutet werden, darin, dass sich wasserlose Urinale im Gebrauch und im Design kaum von konventionellen wassergespülten Urinalen unterscheiden, während der Unterschied zwischen konventioneller Toilette und NoMix-Toilette weitaus größer erscheint. Zu erwähnen sind hier die oben angesprochenen Punkte der unterschiedlichen und für unzureichend informierte Nutzer komplizierteren Handhabung, und der daraus resultierenden hygienischen Probleme. Dies lässt vermuten, dass Frauen den NoMix-Toiletten tendenziell negativer gegenüberstehen, da sie bei jedem Toilettengang die in der Umfrage problematischer beurteilten NoMix-Toiletten verwenden, während die Männer die angesprochenen hygienischen und technischen Hauptkritikpunkte durch einen Gang an das Urinal umgehen können.

### **3.6.3 Akzeptanz der Landwirte und Konsumenten (Universität Bonn)**

#### **3.6.3.1 Material und Methoden**

Die Akzeptanzanalyse fand in schriftlicher Form im Rahmen einer postalischen Befragung statt (Kapitel 6.3). Die schriftliche Befragungsform wurde aufgrund der verhältnismäßig geringen Fallzahlen und der homogenen Zielgruppen gewählt. Die Zielgruppen der Studie bildeten zum einen Landwirte und Gartenbauer und zum anderen Konsumenten bzw. Endverbraucher landwirtschaftlicher Produkte in Nordrhein-Westfalen. Mit Hilfe des Fragebogens

wurden sozioökonomische Rahmenbedingungen, Betriebsgröße, ökologisches Hintergrundwissen und die Einstellung bzw. Meinung hinsichtlich eines Urin-Düngers von Konsumenten und Landwirten erfasst. Dabei wurden 400 Landwirte und 500 Konsumenten befragt. Die Auswahl der landwirtschaftlichen Betriebe erfolgt unter Zuhilfenahme der Datenbank der Landwirtschaftskammer NRW. Diese listet alle Ausbildungsbetriebe für Landwirtschaft und Gartenbau. Für die Befragung wurden explizit Ausbildungsbetriebe herangezogen, da diese meist innovativ und aufgeschlossen gegenüber neuen Methoden und Technologien sind. Aufgrund ihrer Ausbildungs- und Lehrfunktion sind die Betriebe zudem in der Regel auf dem neusten Stand der Technik und bilden sich laufend fort. Darüber hinaus unterstützen sie die Weitergabe innovativer Technologien und haben somit Multiplikatorfunktion.

Die Konsumentenadressen wurden durch die Firma Schober GmbH per Zufallsgenerator aus der Grundgesamtheit einer Einwohner-Datenbank des Bundeslandes NRW gezogen. Der Datenbank liegen Adressen aus öffentlichen Verzeichnissen und Befragungen zugrunde (Schober GmbH, 2012). Um die Konsumenten zuordnen zu können, wurden den befragten Konsumenten Fragen zur Einwohnerzahl, der Haushaltsgröße und zur Wohnumgebung (rural vs. urban) gestellt. Zuerst erfolgte die Entwicklung der beiden Fragebögen auf Basis soziologischer Umfrageforschungsmethoden. Anschließend durchliefen die Fragebögen einen Pretest und wurde entsprechend adaptiert, bevor sie in den Erhebungen Anwendung fanden.

Um einen möglichst hohen Rücklauf zu gewährleisten wurde für die landwirtschaftliche Befragung eine arbeitsarme Zeit im Winter ausgewählt. Die Befragung erfolgte im Februar 2012. Die Umfrage der Konsumenten wurde im Mai 2012 abgeschlossen. In einer kurzen Einleitung wurden im Hinblick auf einen möglichst hohen Rücklauf zunächst in beiden Befragungen die Ziele der Befragungen definiert und die universitäre Einbindung der Umfrage in das Gesamtvorhaben erläutert. Dabei wurde herausgestellt, dass die Teilnahme zum Gelingen des wissenschaftlichen, nichtkommerziellen Forschungsprojektes beiträgt. Außerdem wurden Angaben zum Ausfüllen des Fragebogens gemacht.

Die Fragebögen waren in die nachfolgenden vier Themenbereiche gegliedert:

- Allgemeine Angaben / Sozioökonomische Fragen (Alter, Geschlecht, Schulbildung, Beruf, Betriebsgröße, Haushaltsgröße, etc.)
- Fragen zum Themenkomplex „Düngung und Abwasser“
- Einstellung zum Thema „Dünger aus Urin“
- Akzeptanz im Hinblick auf den Einsatz von Dünger auf Basis von Urin und Akzeptanz derartig produzierter landwirtschaftlicher Waren

Die Themenbereiche eins und zwei dienten der Erfassung sozioökonomischer Rahmenbedingungen und des ökologischen Hintergrundwissens. Die Erfassung der Akzeptanz erfolgte in den Themenbereichen drei und vier. Letztere waren so konzipiert, um etwas über die Haltung, Akzeptanz und Meinung hinsichtlich von Düngern auf Basis von Urin in Erfahrung zu bringen. Hierfür wurden bspw. ordinale Fragenpaare entwickelt, um Merkmalsausprägungen

zu messen und in eine hierarchische Ordnung zu bringen. So hatten die Befragten zum Beispiel die Möglichkeit bei der Frage „interessieren Sie sich für umweltrelevante Themen“ zwischen den Antworten „ja“, „eher ja“, „eher nein“ und „nein“ zu wählen. Skalen wurden verwendet, um bestimmte Merkmale beurteilen und quantifizieren zu können.

Die Befragungsdaten wurden mit Hilfe der Statistiksoftware SPSS Version 20 ausgewertet. Dafür wurde zunächst eine Datenbank mit den entsprechenden Merkmalen erstellt, in die die Daten übertragen wurden. Zur Ermittlung der Akzeptanz wurden im Wesentlichen Häufigkeitsauszählungen durchgeführt.

### **3.6.3.2 Ergebnisse und Diskussionen**

#### **3.6.3.2.1 Rücklaufquote**

Die Rücklaufquote von schriftlichen Befragungen kann als Hinweis für die Aktualität, die Brisanz und das Interesse der Zielgruppen herangezogen werden. Aufgrund einer starken Zunahme von Befragungen in diversen Themenbereichen und Gebieten (Politik, Marktforschung, etc.) innerhalb der letzten Jahrzehnte hat die Bereitschaft, an Umfragen teilzunehmen, generell eine eher sinkende Tendenz. Die Rücklaufquote beider Befragungen war gut und lag mit 27% der Landwirte im mittleren Bereich der in der Literatur angegebenen Bereiche für schriftliche Befragungen von 10-60% (Jacob et al., 2011). Der Rücklauf der Konsumentenbefragung fiel geringer aus und lag mit 19% eher im unteren Bereich.

National und international gibt es bisher wenig vergleichbare Studien. Griesen (2010) fand in seiner Studie zur Akzeptanz von Biogasanlagen bei Landwirten und Bevölkerung ähnliche Resonanz und erreichte einen Rücklauf von 29% bei Landwirten und 16% in der Bevölkerung. Eine Pilotstudie in der Schweiz zur Akzeptanz von NoMix-Toiletten und zur Nutzung der gewonnenen Nährstoffe als Dünger, erreichte in einer Umfrage lokaler Landwirte ebenfalls eine Rücklaufquote von 27% (Lienert, 2007). Die Ergebnisse von Konsumentenbefragungen der Schweizer Studie lassen sich mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie nicht vergleichen, da eine andere Befragungsmethode herangezogen wurde. Nachfolgend sind die Ergebnisse der beiden Befragungen detailliert dargestellt.

#### **3.6.3.2.2 Sozioökonomische Rahmenbedingungen**

95% der befragten Landwirte waren männlich, nur 5% waren weiblich. Die Altersgruppe der 40-50 und der 50-60 jährigen war in der Landwirtschaft mit 72% am stärksten vertreten. Lediglich 23% der Befragten waren der Altersklassen 20-30 und 30-40 zuzuordnen. 4% der Befragten waren älter als 60 Jahre (Tabelle 40). Mehr als die Hälfte der Landwirte hatte einen Abschluss als Meister, 32% der Befragten hatte ein landwirtschaftliches Studium absolviert.

Die Stichprobe der der Konsumentenbefragung wies ein Geschlechterverhältnis von 35% weiblichen und 54% männlichen Teilnehmern aus; 12% machten keine Angaben. Die Gruppe der über 60jährigen war mit 42,3% am stärksten vertreten. Die 40-50jährigen und die 50-

60-jährigen waren mit jeweils 20,6% und 25,8% vertreten. Die jüngeren Generationen der 20-40-Jährigen waren in der Stichprobe eher unterrepräsentiert; nur insgesamt 11,4% war diesen beiden Alterklassen zuzuordnen.

**Tabelle 40: Altersverteilung der Stichprobe (a) Landwirtschaft, (b) Konsumenten in %.**

Altersverteilung in Klassen und Jahren	20 <	20-30	30-40	40-50	50-60	>60
	[%]					
<b>Landwirtschaft</b>	1,9	4,7	16,8	38,3	34,6	3,7
<b>Konsumenten</b>	0	5,2	6,2	20,6	25,8	42,3

Etwa die Hälfte der Landwirte, die an der Befragung teilnahmen (43%), bewirtschaften große Betriebe mit einer Betriebsfläche von 50-100 ha (Tabelle 41). Ein Viertel der Landwirte (25%) unterhält einen Hof mit einer Betriebsfläche von 101-200 ha. Die mittlere Betriebsgröße von 10-50 ha war in der Stichprobe mit 8% eher unterrepräsentiert, ebenso eine Betriebsgröße von mehr als 200 ha (nur 5,1%). Bei der hohen Betriebszahl von 15% mit 0-10 ha handelt es sich um Gartenbaubetriebe. Im Vergleich zur Verteilung der durchschnittlichen Betriebsgröße in NRW fällt auf, dass hauptsächlich Betriebe mit einer größeren Betriebsgröße ( $\geq 50$  ha) an der Befragung teilnahmen. Die Analyse der Betriebszweige ergab, dass 71% der befragten landwirtschaftlichen Betriebe Ackerbau betreiben. Jeder zweite bewirtschaftet Grünland und knapp 40% besitzen Milchvieh. Die Rindermast und Schweineproduktion ist in der Stichprobe mit 18% und 30% weniger häufig vertreten.

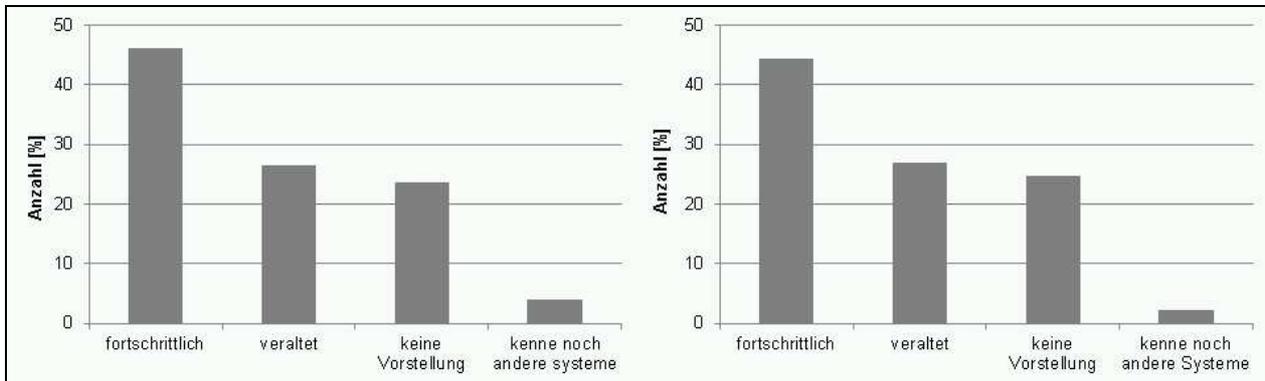
**Tabelle 41: Links: Verteilung der Betriebsgrößen; Rechts: Verteilung der Haushaltsgrößen.**

Landwirtschaft		Konsumenten	
Betriebsgrößen	Anteil	Haushaltsgrößen	Anteil
[ha]	[%]	[Personenanzahl]	[%]
0 – 10	15,3	1	9,3
10 – 20	2,0	2	56,7
20 – 50	6,1	3	16,5
50 – 100	42,9	4	9,3
101 – 200	24,5	>5	5,2
> 200	5,1	Keine Angaben	3,1
Keine Angaben	4,1		

### 3.6.3.2.3 Düngung, Abwasser und Hintergrundwissen

Im zweiten Teil der Befragung wurden die Landwirte zum Thema Dünger, Abwasser und Hintergrundwissen befragt. Auch die Konsumentenbefragung enthielt einige Fragen zum ökologischen Hintergrundwissen und explizit zum Thema „Wasser“ und „Abwasser und Düngung“, um den Informationsgrad in Bezug auf Nährstoffe, Sanitärkonzepte und Abwasserbehandlung zu erfassen. 83% der befragten Landwirte gaben an, dass der Einsatz von menschlichen Fäkalien in der landwirtschaftlichen Erzeugung früher gängige Praxis war, bei den Konsumenten waren es 71%. Dass sich der hohe Nährstoffgehalt in Urin gut als Dünger

recyclen lässt, war 2/3 der befragten Landwirte klar; etwa die Hälfte der Stichprobe der Konsumenten bejahte dies ebenfalls. Der Anteil der Befragten, die hierzu keine Angaben machten war mit 25% bei den Landwirten und 32% bei den Konsumenten verhältnismäßig hoch.



**Abbildung 99: Bewertung des aktuellen Sanitärsystems. Links: Landwirtschaft; Rechts: Verbraucher.**

Weiterhin sollte herausgefunden werden, ob neben dem existierenden Sanitärkonzept weitere Verfahren der Abwasserentsorgung in der Landwirtschaft bekannt sind. Darüber hinaus wurden die Landwirte gebeten, das derzeitige Abwassersystem zu bewerten. Fast die Hälfte der befragten Landwirte beurteilt unser derzeitiges Abwassersystem als fortschrittlich, jeder Vierte als veraltet (Abbildung 99, links). Lediglich 4% der Befragten gaben an, auch andere Systeme zu kennen.

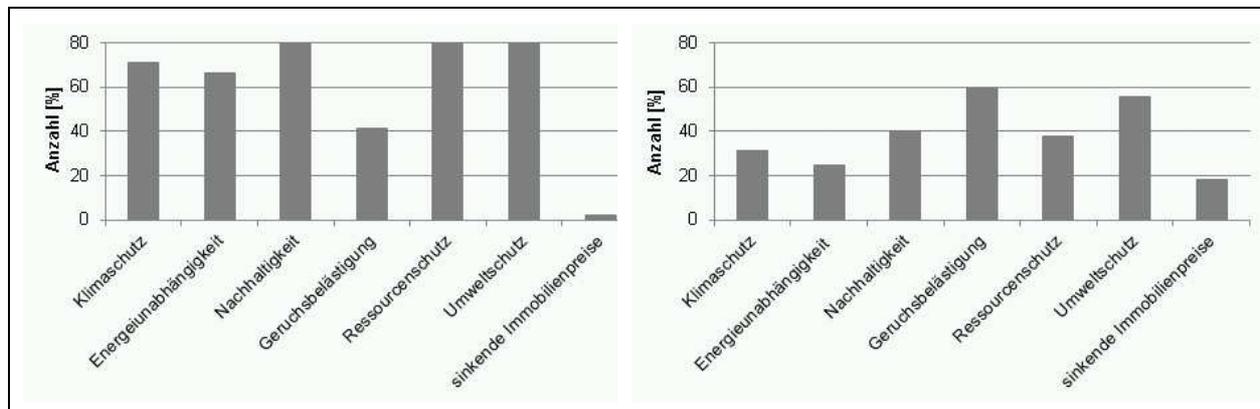
Ein ähnliches Bild ergab die Befragung der Konsumenten. Hier gaben 44% der Befragten an, dass Sanitärsystem als fortschrittlich zu bewerten; 26% halten es für eher veraltet. Über andere Systeme hatten lediglich 2% Kenntnis. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass neuartige Sanitärkonzepte und -systeme bisher in der breiten Öffentlichkeit eher wenig bekannt sind. Hinsichtlich des Bekanntheitsgrades neuer Technologien, Systeme und Ansätze besteht somit Aufklärungsbedarf.

Ein weiteres Ergebnis der Konsumentenbefragung ist, dass in der untersuchten Stichprobe relativ wenige Kenntnisse über Abwasseraufbereitung vorhanden waren. Auf die Frage „Welche der nachfolgenden im Abwasser enthaltenen Stoffe werden bei der Aufreinigung in Kläranlagen entfernt?“ (Mehrfachnennungen waren möglich) gaben nur 37% der Befragten an, dass N-Fractionen dem Abwasser entzogen werden. 50% der Befragten entschieden, dass dem Abwasser die P-Fractionen aus Abwasser entzogen werden. Der prozentual größte Teil der Konsumenten (68%) gab an, dass dem Abwasser hauptsächlich Schwermetalle entzogen werden. Eine Aufbereitung im Hinblick auf Pharmazeutikarückstände wurde von 32% der Befragten vermutet. Die Thematik der Abwasseraufbereitung bzw. des Wasserkreislaufs findet in Deutschland in der schulischen Erziehung schon früh Berücksichtigung. Dass die Kenntnisse zur Abwasseraufbereitung trotzdem so gering ausfielen, könnte darauf zurückzuführen sein, dass in der vorliegenden Stichprobe verstärkt ältere Menschen (>40 Jahre) vertreten waren.

Diese Tendenz setzt sich in der Frage zur Endlichkeit bestimmter Ressourcen fort. Die überwiegende Mehrheit der Befragten (67%) gab an, keine Kenntnisse in Bezug auf die Endlichkeit weltweiter Phosphorvorkommen zu haben. Obwohl bei den Befragten wenig Fachwissen um Nährstoffkreisläufe Potential der Rückführung von Nährstoffen in der Kreislaufwirtschaft vorhanden war, wurde die Idee der Verwendung von Nährstoffen in der landwirtschaftlichen Produktion meist positiv bewertet.

### 3.6.3.2.4 Einstellung zum Thema „Dünger aus Urin“

Im darauf folgenden Teil wurden die Landwirte und Konsumenten hinsichtlich ihrer Assoziationen in Bezug auf den Einsatz von Düngemitteln aus Urin in der landwirtschaftlichen Erzeugung befragt (Abbildung 100). Obwohl die Idee eines Urin-basierten Düngers relativ neu ist, überwogen bei den meisten Landwirten der untersuchten Stichprobe positive Assoziationen im Zusammenhang mit dem Themenkomplex Urin und Düngung. Dieses Ergebnis ist positiv zu bewerten, aber insofern kritisch zu beurteilen, als dass es sich insgesamt um eine relativ kleine Stichprobe handelt. Außerdem ist davon auszugehen, dass aller Wahrscheinlichkeit nach eher die interessierten und dieser Idee gegenüber aufgeschlossene Landwirte bereit waren, die Studie zu unterstützen und infolgedessen an der Befragung teilnahmen. Auffallend war in dem Zusammenhang jedoch, dass lediglich ein Landwirt die Umfrage nutzte, um seinen Unmut über diese innovative Technologie bzw. Idee kundzutun. Auf nationaler wie internationaler Ebene erlauben die Ergebnisse zunächst jedoch keine generelle und repräsentative Aussage hinsichtlich der Akzeptanz eines Urin-basierten Düngers. Trotzdem zeigen sie eine Tendenz, inwieweit ein derartiges Produkt in der Praxis Anwendung finden könnte.



**Abbildung 100:** Assoziationen der Befragten zu einem Urin-basierten Dünger; Links: Landwirte; Rechts: Konsumenten.

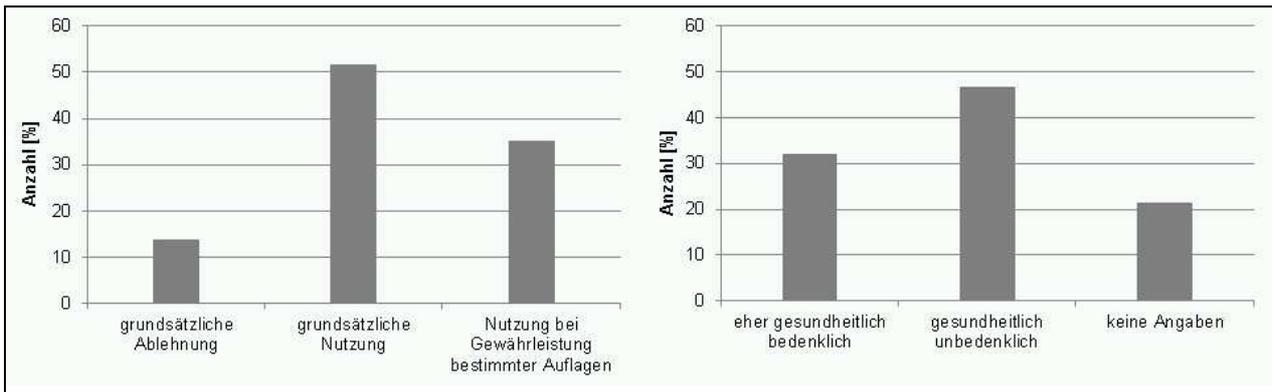
Besonders häufig wurden von den Landwirten im Zusammenhang mit einer Urindüngung die Themen Nachhaltigkeit, Ressourcenschutz und Umweltschutz assoziiert. Bei mehr als 80% der Landwirte überwogen im Zusammenhang mit Urindünger ökologisch orientierte Assoziationen. Weniger als die Hälfte (41%) der befragten Landwirte hatten Bedenken im Bezug auf etwaige negative Auswirkungen wie bspw. Geruchsbelästigung. Dass der Einsatz von Dünger aus Urin Auswirkungen auf die Attraktivität eines ländlichen Wohnortes haben könnte und sich in sinkenden Immobilienpreisen niederschlagen könnte, befürchteten nur 2% der Be-

fragten. Auf Konsumentenebene ergab sich hinsichtlich eines Düngers auf Basis von Urin ein deutlich negativeres Bild. Die Assoziation der Geruchsbelästigung überwog mit 60%. Die Angst vor sinkenden Immobilienpreisen durch die Ausbringung eines ebensolchen Düngers war ebenfalls deutlich höher, als die der Landwirte und lag bei 18%. Umweltschutz, (55%), Ressourcenschutz (38%) Nachhaltigkeit (40%) und Klimaschutz (31%) wurden verhältnismäßig weniger oft mit einem neuartigen Dünger auf Basis von Urin von Konsumenten in Verbindung gebracht. Insgesamt wurden in der Stichprobe der befragten Konsumenten die eher positiv konnotierten Eigenschaften deutlich weniger mit einem potentiellen Dünger auf Basis von Urin in Verbindung gebracht (Abbildung 100).

Als potentielle Nutzer eines Düngers auf Basis von Urin wurden die Landwirte befragt, ob sie einen derartigen Dünger nutzen würden. Nur etwa jeder Zehnte der Befragten lehnt die Verwendung von Dünger aus Urin grundsätzlich ab (Abbildung 101; links). Die Hälfte der Landwirte würde einen Dünger aus Urin grundsätzlich nutzen. Ähnliche Werte in Bezug auf die Nutzung eines Urin-basierten Düngers fand Lienert et al. (2003) in ihrer Studie zur Akzeptanz in der Schweiz. Hier sprachen sich 57% der befragten Landwirte für die Verwertung von Urin in der landwirtschaftlichen Produktion aus; 33% lehnten den Einsatz prinzipiell ab. In einer weiteren Akzeptanz Studie in Berlin fand Muskulus (2008) ähnliche Werte wenn auch in einer anderen Verteilung. Hier gaben 25% der Landwirte an, einen Dünger auf Basis von Urin uneingeschränkt zu nutzen; 53% kreuzten „unter Umständen“ an.

Sowohl in der Berliner Studie mit insgesamt 78% eher positiven Antworten als auch in der vorliegenden Untersuchung mit insgesamt 85% überwog bei den Landwirten eine grundsätzlich akzeptierende Einstellung eines derartigen Produkts. Eine grundsätzlich ablehnende Haltung kam in allen drei Studien deutlich weniger zum Ausdruck. Die Befragten der Studie in NRW hatten wie auch in der Studie von Muskulus (2008) bei der Frage der Nutzung neben den Antwortmöglichkeiten „grundsätzlich ja“ und „grundsätzlich nein“ die Möglichkeit, Eigenschaften bzw. Voraussetzungen eines solchen Düngerproduktes zu benennen und somit die Nutzung an bestimmte Prämissen zu koppeln. Zu den meist genannten Einschränkungen der Landwirte im Hinblick auf die Nutzung eines Urin-basierten Düngers zählten Sicherheitsbedenken bezüglich Pharmazeutikarückständen und Hormonen im Urin. Zudem wurden Bedenken im Zusammenhang mit der Akzeptanz auf Verbraucherebene geäußert und somit der Absatz derartig produzierter Produkte in Frage gestellt. Als weitere Voraussetzungen, um Urin zu verwenden, wurden eine genaue Nährstoffdeklaration, eine Umweltverträglichkeitsprüfung sowie eine Zertifizierung genannt. Zudem soll der Urin schadstofffrei - insbesondere ohne Schwermetallbelastung - sein.

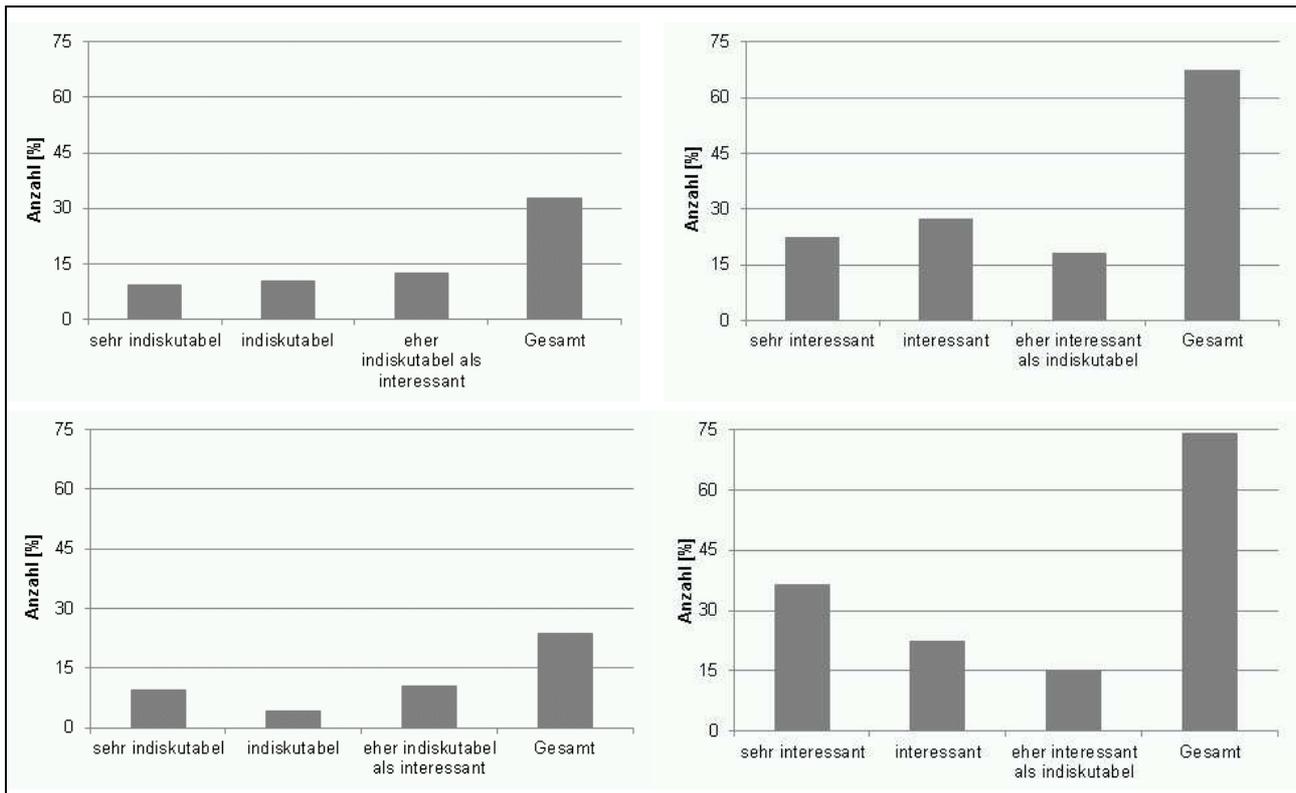
Auch die Meinung bezüglich des Einflusses auf die Gesundheit wurde ermittelt (Abbildung 101, rechts). Die Meinungen hierüber sind geteilt: Fast jeder Zweite hält den Einsatz für gesundheitlich unbedenklich, 30% jedoch für bedenklich.



**Abbildung 101:** Links: Nutzung von Urin-basierten Düngern in der landwirtschaftlichen Produktion; Rechts: gesundheitliche Einschätzung eines Urin-basierten Düngers durch die Landwirte.

Zur Beurteilung bzw. Einordnung von Eigenschaften wird in der soziologischen Umfrageforschung häufig ein Polaritätsprofil entwickelt und zur mehrdimensionalen Messung der untersuchten Objekte, hier einem Urin-basierten Dünger, herangezogen. Ein Polaritätsprofil enthält sogenannte Gegensatzpaare, deren Polung, Positionierung und Codierung innerhalb der Frage variiert, um die Aufmerksamkeit zu erhöhen. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargestellt. Zum Zeitpunkt der Studie ist die oben beschriebene Vorgehensweise im Zusammenhang mit der Untersuchung eines Urin-basierten Düngers einzigartig. Die vorliegenden Ergebnisse können also nicht mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen oder durch solche ergänzt werden.

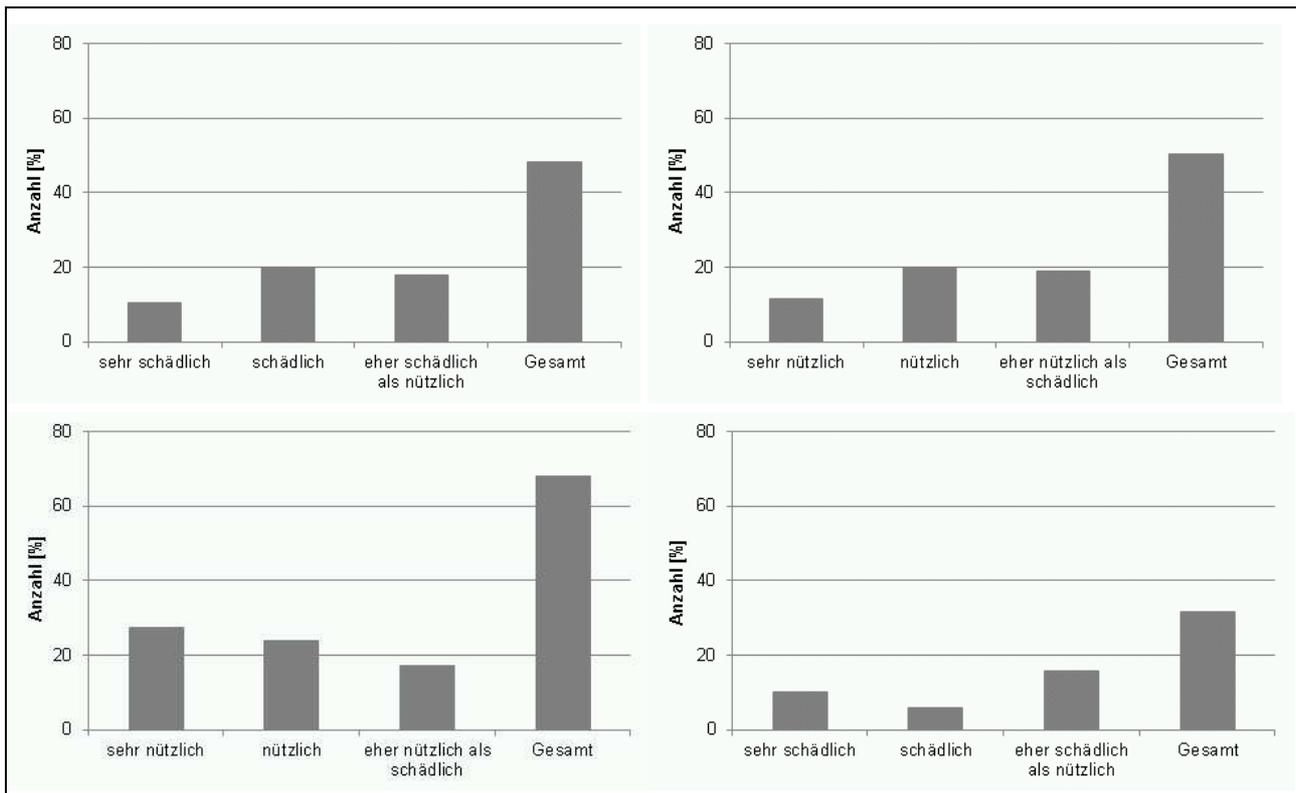
In beiden Befragungen wurden die Teilnehmer aufgefordert, den Einsatz eines Urin-basierten Düngers auf einer Skala von eins bis sechs einzuordnen und auf diese Weise die Idee der Nährstoffrückgewinnung und den Einsatz in der landwirtschaftlichen Produktion zu bewerten. Dargestellt sind jeweils die gültigen Prozente des Stichprobenumfangs. Dabei äußerten insgesamt 67% der Landwirte und 74% der Konsumenten eine positive Meinung hinsichtlich eines Urin-basierten Düngers und hielten diese Technologie für eine interessante oder sogar für eine sehr interessante Idee (Abbildung 102). Nur 32% der Landwirte und 23% der Konsumenten äußerten eine explizit negative Einstellung hinsichtlich dieser Idee.



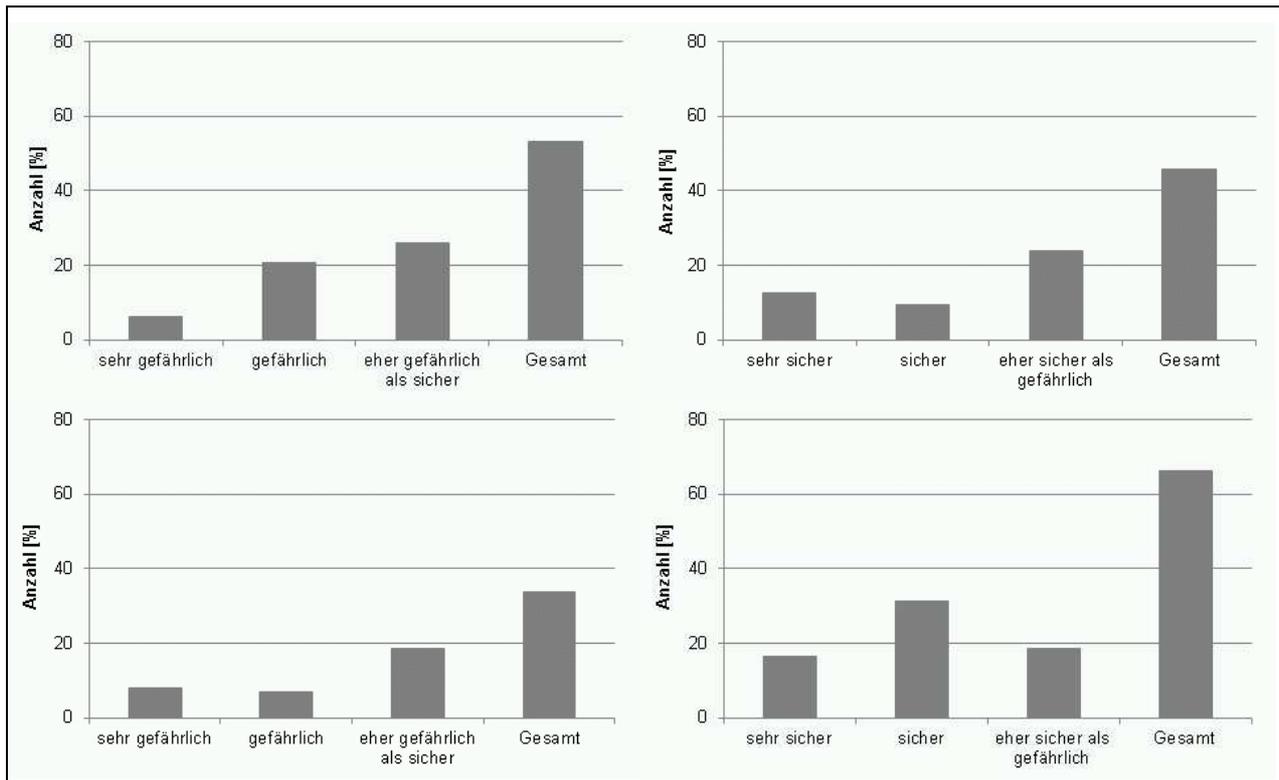
**Abbildung 102: Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe von Gegensatzpaaren. Links: indiskutable Idee; Rechts: interessante Idee. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung.**

Bei der Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe der Gegensatzpaare nützlich vs. schädlich und gefährlich vs. sicher zeigten sich unterschiedliche Einordnungen der Landwirte und Konsumenten (Abbildung 102). Hier fiel die Beurteilung durch die Konsumenten positiver aus, während in der Einschätzung einer Wiederverwertung von Urin in der landwirtschaftlichen Praxis in Bezug auf die Nützlichkeit und die Sicherheit Einschränkungen der Landwirte zum Ausdruck kamen. Diese nicht uneingeschränkt positive Haltung der Landwirte hinsichtlich der Idee der Wiederverwertung von Urin in der landwirtschaftlichen Erzeugung deckt sich weitestgehend mit den Ergebnissen der Frage nach der Nutzung eines Urin-basierten Düngers (Abbildung 101) und weist so eine Konsistenz hinsichtlich der Beurteilung eines Urin-basierten Düngers durch die Landwirte auf. Die Ergebnisse zeigen erneut, dass Landwirte einen Urin-basierten Dünger nicht uneingeschränkt nutzen würden, unter der Prämisse eines sicheren und geprüften Produktes, also der Sicherheit in Bezug auf Schadstoffe und Pharmazeutika, jedoch durchaus bereit wären, ein derartiges Produkt in der Erzeugung landwirtschaftlicher Güter zu nutzen. Im Hinblick auf potentielle Gefahren wie bspw. Schadstoff- und Medikamentenbelastung eines potentiellen neuen Düngeproduktes ist der Sensibilisierungsgrad der Landwirte höher einzuschätzen als der der Konsumenten, was sich in den Untersuchungsergebnissen widerspiegelt. Trotz der Einschränkungen besteht in der untersuchten Stichprobe jedoch grundsätzlich Aufgeschlossenheit gegenüber der Idee der Nährstoffwiederverwertung und dem Schließen von Nährstoffkreisläufen unter den Landwirten.

In der Konsumentenbefragung überwog bei beiden Aspekten (nützlich vs. schädlich und gefährlich vs. sicher) die positive Einschätzung eines Urin-basierten Düngers in der landwirtschaftlichen Produktion. Insgesamt 67% der Strichprobe ordnete die Idee als sehr nützlich ein, insgesamt 67% beurteilen ein derartiges Düngersystem als entweder sehr sicher, sicher oder eher sicher (Abbildung 103). Die beiden Extrempositionen sehr schädlich und schädlich sowie sehr gefährlich und gefährlich wurden von den befragten Konsumenten am wenigsten mit einem Urin-basierten Dünger in Verbindung gebracht, so dass sie den geringsten prozentualen Anteil ausmachen (Abbildung 103).



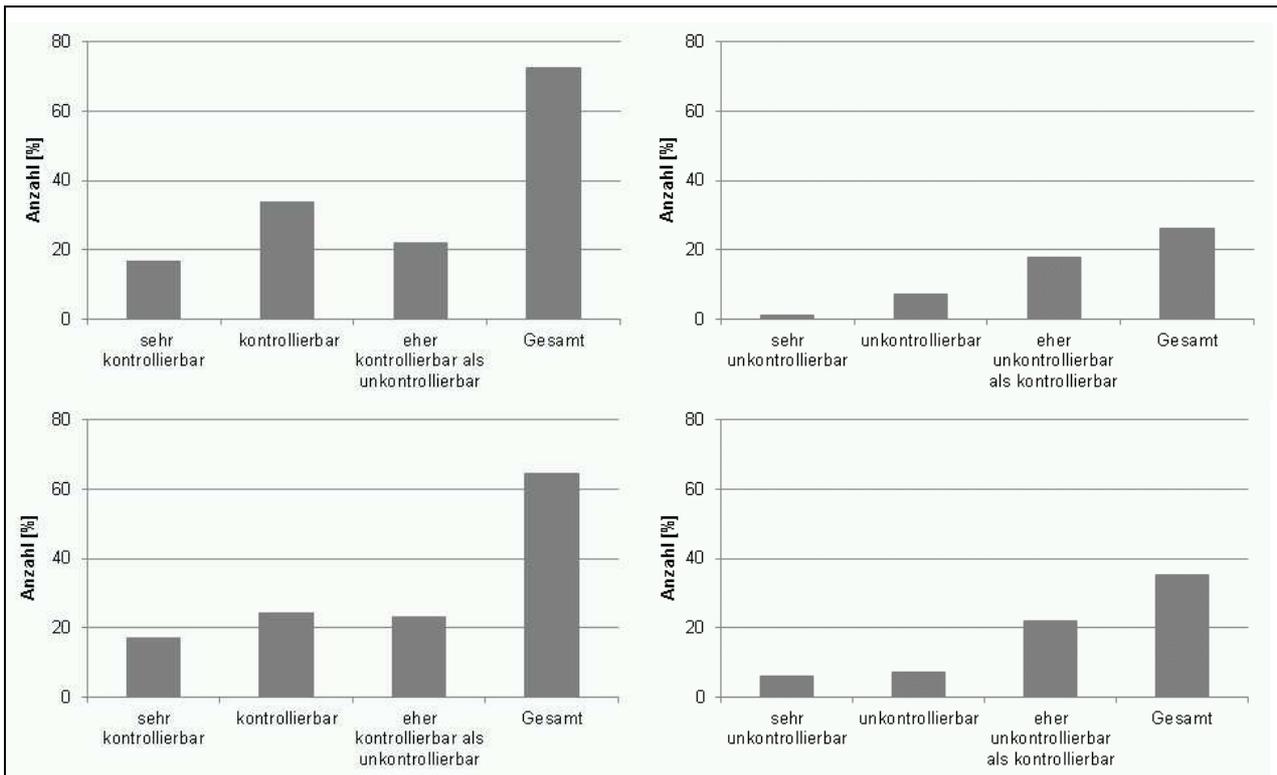
**Abbildung 103: Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe von Gegensatzpaaren. Links: nützlich; Rechts: schädlich. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung.**



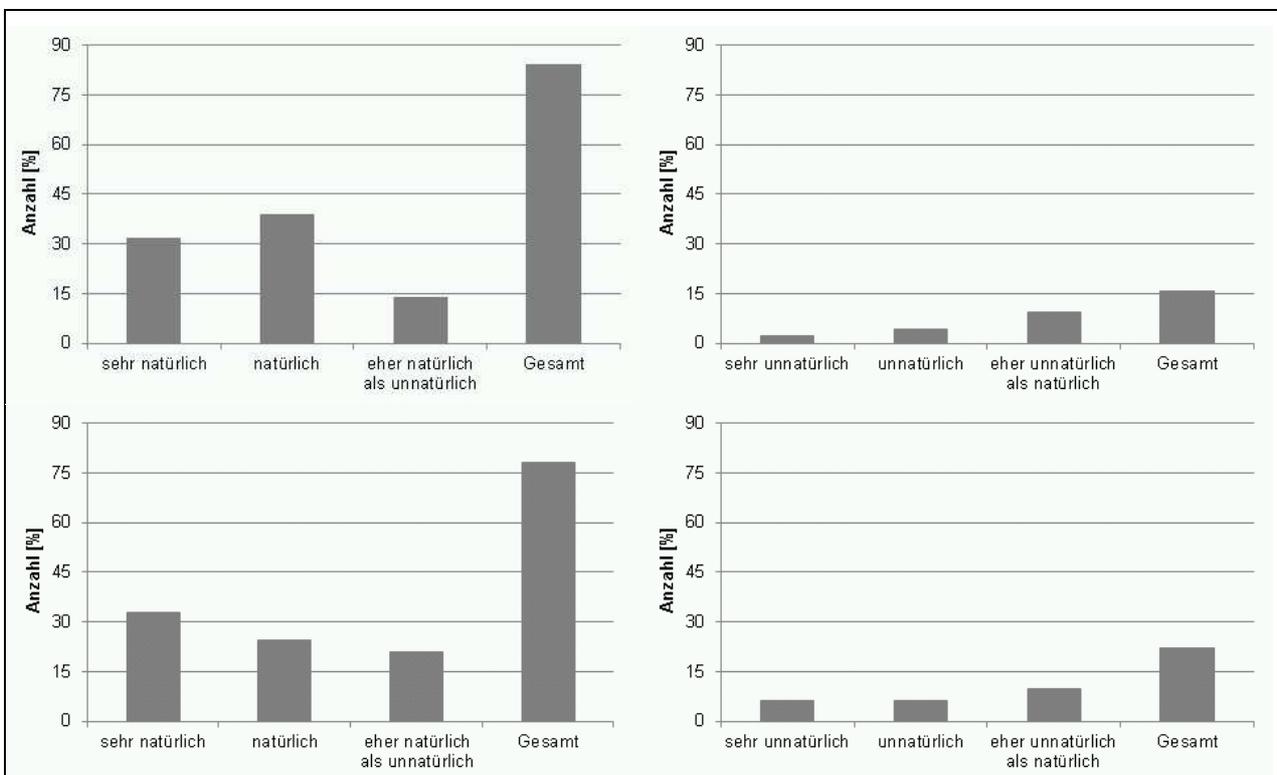
**Abbildung 104: Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe des Gegensatzpaares. Links: gefährlich; Rechts: sicher. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung.**

Von den Landwirten in Bezug auf Nutzung eines Urin-basierten Düngers benannte einschränkende Kriterien wie Schwermetall- und Medikamentenbelastung werden von der Mehrzahl der Landwirte jedoch als „kontrollierbar“ eingeschätzt. Dies verdeutlicht die Verteilung der Ergebnisse des Gegensatzpaares kontrollierbar vs. unkontrollierbar (Abbildung 105). Die geringsten prozentualen Anteile am Umfang der Stichprobe finden sich in den Charakteristika „sehr unkontrollierbar“, „unkontrollierbar“ und „eher unkontrollierbar als kontrollierbar“ und machen insgesamt nur 26% der untersuchten Stichprobe aus.

Auch bei der Konsumentenbefragung ergab sich im Zusammenhang mit der Einordnung der Sicherheit eines Urin-basierten Düngers ein ähnliches Bild wie in der landwirtschaftlichen Befragung (Abbildung 105). Die Hälfte der Befragten (50%) hält einen Urin-basierten Dünger in der landwirtschaftlichen Erzeugung als „sehr kontrollierbar“, „kontrollierbar“ bzw. als „eher kontrollierbar als unkontrollierbar“. Jeder dritte Befragte ordnet einem solchen Dünger unkontrollierbare Eigenschaften zu. Die beiden Extrempositionen „sehr unkontrollierbar“ und „unkontrollierbar“ wurden prozentual von den wenigsten Befragten in Erwägung gezogen.



**Abbildung 105:** Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe des Gegensatzpaares. Links: kontrollierbar; Rechts: unkontrollierbar. Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung.

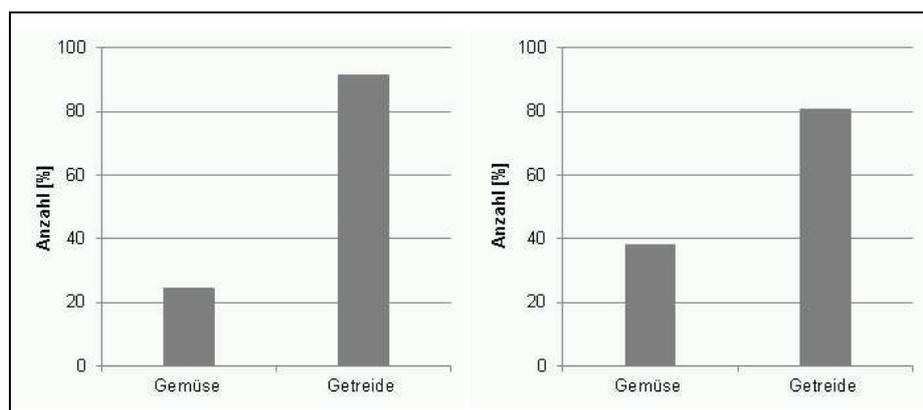


**Abbildung 106:** Einordnung eines Urin-basierten Düngers mit Hilfe des Gegensatzpaares. Links: natürlich; Rechts: unnatürlich; Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung.

Bei der Einordnung eines Düngers auf Basis von Urin ergab sich sowohl bei den Landwirten als auch bei den Konsumenten ein einheitliches Bild zugunsten der Attribute „sehr natürlich“, „natürlich“ sowie „eher natürlich als unnatürlich“ (Abbildung 106). Insgesamt 84% der Landwirte empfinden einen potentiellen Einsatz von Urin in der landwirtschaftlichen Erzeugung als natürlich, nur 15% als unnatürlich. Die beiden Extrempositionen „sehr unnatürlich“ und „unnatürlich“ wurden sowohl von den Landwirten als auch von den Konsumenten im Vergleich mit den positiven Attributen (Abbildung 106, links dargestellt) sehr selten von den Befragten gewählt. Hinsichtlich der Notwendigkeit eines neuen Düngers aus Urin, sprachen sich 65% dafür aus und nur 1/3 dagegen. Insgesamt herrscht eine positive Meinung gegenüber einem solchen Produkt. Nur 1/5 der Landwirte gaben eine negative Bewertung ab.

### 3.6.3.2.5 Akzeptanz des Einsatzes eines Urin-basierten Düngers

Da Landwirte nicht nur Produzenten sondern gleichzeitig auch Konsumenten sind, wurden im letzten Abschnitt der Befragung neben der Erfassung von Akzeptanzwerte in Bezug auf den Einsatz eines Urin-basierten Düngers in der landwirtschaftlichen Produktion auch Akzeptanzwerte im Hinblick auf den Konsum Urin gedüngter Produkte ermittelt. Hierbei wurden die Applikationsformen des Düngers in „flüssig“ und „Pulver“ unterteilt und verschiedene Anbausysteme, beziehungsweise Marktfrüchte (Salat, Getreide, Gemüse, Nüsse, Blumen) unterschieden. In der Darstellung der Ergebnisse finden aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich die Gegenüberstellung der Resultate von Getreide als Vertreter der Körnerfrüchte und Grundnahrungsmittel und Gemüse Verwendung. Die Ergebnisse der Akzeptanz von Landwirten und Konsumenten unterscheiden sich sowohl in Bezug auf die Applikationsform als auch in Bezug auf die Marktfrüchte. Abbildung 107 und Abbildung 108 zeigen, dass es unter den befragten Landwirten unabhängig von der Applikationsform eine wesentlich höhere Akzeptanz eines Urin-basierten Düngers bei Getreide als bei Gemüse gibt.

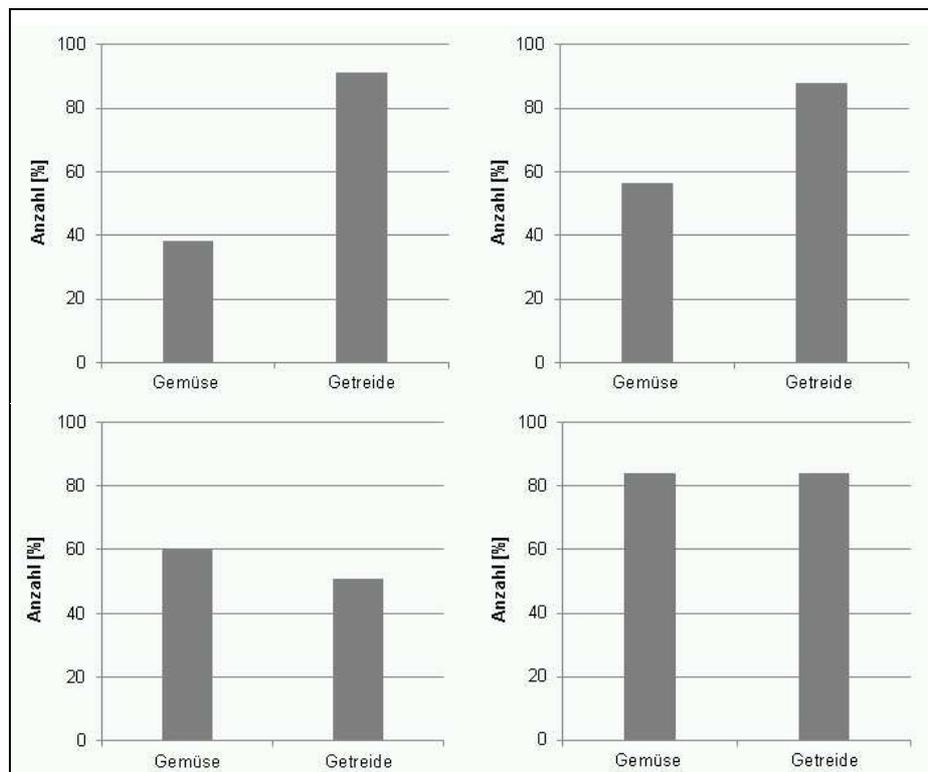


**Abbildung 107:** Akzeptanz von Landwirten in Bezug auf den Einsatz unterschiedlicher Applikationsformen bei Gemüse und Getreide. Links: Applikation in flüssiger Form; Rechts in Pulverform (z.B. MAP).

Bei der Frage nach dem Konsumverhalten zeichnet sich bei den Landwirten ein ähnliches Bild ab. Auch hier würde prinzipiell Getreide (90%) eher gekauft werden als Gemüse (40%). Die Applikationsform wirkt sich sowohl bei Getreide als auch bei Gemüse förderlich auf den Akzeptanzwert aus und resultiert bei Gemüse in einer etwas erhöhten Akzeptanz gegenüber

der flüssig gedüngten Variante. Die Akzeptanz eines Urin-basierten Düngers in der Gemüseproduktion ist in Pulverform im Vergleich zur flüssigen Applikation also eher gegeben.

Bei den befragten Konsumenten zeigten sich im Zusammenhang mit der Applikationsform weniger stark ausgeprägte Unterschiede innerhalb der beiden Anbausysteme „Gemüse“ und „Getreide“ (Abbildung 108). Insgesamt fand die flüssige Applikation mit Akzeptanzwerten zwischen 50-60% bei beiden dargestellten Anbausystemen weniger Zustimmung als die Pulvervariante mit jeweils 82%. Die Akzeptanzwerte lagen bei beiden Anbausystemen mit minimalen Werten von 40% und maximalen von 90% auf einem mittleren bis hohen Niveau. Die Ergebnisse aus der Akzeptanzstudie bei Landwirten und Konsumenten spiegeln sich in einer ähnlichen Form in den Akzeptanzwerten der Nutzer bzw. der GIZ-Mitarbeiter in Bezug auf den Konsum von landwirtschaftlichen Produkten, die mit Urin-basierten Düngern erzeugt wurden wieder (vgl. Abbildung 93 und Abbildung 94). Hier lagen die Akzeptanzwerte zwischen 30 und 70%. Auch in anderen Studien wie bspw. der Untersuchung von Muskulus (2008) gab es im Zusammenhang mit Produkten die auf der Basis eines Urindüngers erzeugt wurden, hohe Akzeptanzwerte (76% Zustimmung). Mit Einschränkungen in Bezug auf die Repräsentativität kann man aus den vorliegenden Ergebnissen ableiten, dass der Absatz Urin-gedüngter Produkte durchaus möglich ist, sofern bestimmte Kriterien bzw. Standards wie Sicherheit und Pharmazeutikarückstände erfüllt werden bzw. garantiert sind.



**Abbildung 108:** Konsum von Gemüse und Getreide, das mit einem Urin-basierten Dünger produziert wurde. Links: flüssige Applikation; Rechts: Applikation in Pulverform (z.B. MAP). Oben: Darstellung der landwirtschaftlichen Befragung; Unten: Darstellung der Konsumentenbefragung.

### 3.6.3.2.6 Einschätzung des Marktpotentials

Neben den Akzeptanzwerten eines Urin-basierten Düngers in der landwirtschaftlichen Produktion wurden die Landwirte als potentielle Abnehmer eines Düngerproduktes auf Basis von Urin hinsichtlich der Konditionen befragt, zu denen sie ein derartiges Düngerprodukt kaufen würden. Der Preis eines Produktes hat immer Indikatorfunktion und kann so zur Einschätzung des Marktpotentials herangezogen werden. Lediglich 27% der befragten Landwirte würden einen Dünger auf Basis von Urin kaufen, wenn er denselben Preis wie ein konventioneller Mineraldünger hätte. In der Schweizer Studie zur Akzeptanz von Urin-basierten Düngern von Lienert et al. (2003) gaben 34% der Landwirte an, denselben Preis zu zahlen. Die Mehrheit der Landwirte in NRW gab an, einen derartigen Dünger zu nutzen, wenn der umsonst/zur Abholung (27%) oder günstiger (55%) als konventioneller Mineraldünger wäre. Daraus lässt sich schließen, dass ein Düngerprodukt auf Basis von Urin zurzeit kein Produkt ist, das als „high desirable“ eingestuft werden kann. Unter der Voraussetzung bestimmter Konditionen und preislicher Anpassungen bestehen jedoch durchaus gute Marktchancen für ein solches Produkt.

### 3.6.4 Fazit

Die Erhebungen zur Akzeptanz im Zusammenhang mit alternativen Sanitärsystemen und ihren Nebenprodukten stellt eine Basis dar, um die naturwissenschaftlich - technischen Untersuchungen zum Themenkomplex NoMix-Toilettenanlagen, Einsatz von Urin und Urin-basierten Düngern durch soziokulturelle Akzeptanzforschung zu ergänzen. Neben der Weiterentwicklung technischer und produktionstechnischer Aspekte eines neuen Sanitärkonzeptes, sollten insbesondere im Hinblick auf eine erfolgreiche Implementierung innovativer Technologien soziokulturelle Rahmenbedingungen der Zielgruppen erfasst werden. Diese Studie leistet einen ersten Beitrag, um Trends und Handlungsschwerpunkte im Hinblick auf eine Einführung und Weiterentwicklung eines innovativen Sanitärkonzeptes und daraus „hergestellter“ bzw. generierter Nebenprodukte (wie bspw. ein Urin-basierter Dünger oder MAP) abzuleiten.

#### 3.6.4.1 Akzeptanz der NoMix-Anlagen

Die Auswertung der Nutzerbefragung zeigt, dass in allen Bereichen Handlungsbedarf besteht, um die Akzeptanz eines alternativen Sanitärsystems zu erhöhen bzw. mehr Befürworter für das Konzept der Kreislaufwirtschaft zu gewinnen. Dabei gibt es je nach Betrachtungsebene unterschiedliche Handlungsschwerpunkte. Die Ergebnisse der Studie machen deutlich, dass die prinzipielle Idee der Wiederverwertung von Nährstoffen in der landwirtschaftlichen Produktion bei einer breiten Mehrheit meist Zustimmung findet. Einschränkend gibt es auf allen Ebenen aber auch viele offene Fragen in Bezug auf einzelne Systemkomponenten wie bspw. die Unbedenklichkeit im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Produktion/Düngung oder die unzureichende Bewertung der bisherigen technischen Ausführung insbesondere der installierten NoMix-Toiletten.

Eine wichtige Voraussetzung für die Akzeptanz ist in jedem Fall die umfangreiche Information der Nutzer über Funktion und Nutzen. Es zeigt sich jedoch, dass nur wenige der Befragungsteilnehmer in allen drei Befragungsdurchgängen genug Eigeninitiative besaßen, um sich über die gegebenen Informationen hinaus mit dem Projekt SANIRESCH zu beschäftigen, etwa durch den Besuch der Homepage<sup>7</sup>. Viele der Nutzer erhielten somit nur die Informationen, die in den Toilettenkabinen ausgehängt waren und über den grundlegenden Zweck der Toiletten informierten. Es ist jedoch zu beobachten, dass mit steigendem informiert sein über die gesamte Thematik auch die Akzeptanz der Toilettenanlagen steigt – ein besser informierter NoMix-Nutzer bewertete somit auch positiver. Die Ergebnisse der Befragung ähneln somit zum Teil den Erkenntnissen, die im Endbericht des Projektes NOVAQUATIS (Lienert, 2007) festgehalten wurden.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sowohl von Seiten der Haustechnik und des Reinigungspersonals als auch von Seiten der Nutzer frühzeitige Informationen und eine Einbindung in den Prozess der Implementierung als wichtig empfunden werden. Eine offensive und umfassende Kommunikationsstrategie sollte dazu beitragen können, die Voraussetzungen für die Akzeptanz alternativer Sanitäreinrichtungen zu erhöhen, wobei eine leichte Handhabung der Technik zusammen mit der Sicherstellung der hygienischen Bedürfnisse der Nutzer Grundbedingung bleiben.

#### **3.6.4.2 Akzeptanz unter Landwirten und Konsumenten**

Die Umfrage der Universität Bonn fand im Gegensatz zu der Untersuchung der RWTH Aachen nur einmalig statt. Folglich gibt es keine Ergebnisse mehrerer Umfragen, die man detailliert vergleichen kann z.B. bezüglich der Entwicklungen im Zusammenhang mit der Informationspolitik oder anderen Steuerungsmaßnahmen. Die Untersuchung stellt in der vorliegenden Form auf der Ebene der Landwirtschaft und der der Verbraucher eine Momentaufnahme der Situation im Bundesland NRW dar. Außerdem bestand im Zusammenhang mit der Befragung von Konsumenten und Landwirten die Schwierigkeit, dass sehr viele Fragen hypothetischen Charakter hatten, da es einen Urin-basierten Dünger bisher auf dem deutschen Markt noch nicht gibt. Eine allgemeingültige, generelle Aussage zur Akzeptanz in Bezug auf die bundesweite Nutzung eines Urin-basierten Düngers in der Landwirtschaft und die Produktakzeptanz der Verbraucher lässt sich somit nicht treffen. Hierfür wären weitere Studien auf nationaler und internationaler Ebene erforderlich. Dennoch lassen sich erste Trends und Handlungsschwerpunkte aus den vorliegenden Ergebnissen ableiten.

Insgesamt ist eine sehr positive Einschätzung hinsichtlich der Verwendung von Urin und Urin-Produkten in der landwirtschaftlichen Produktion feststellen. Die meisten Landwirte as-

---

<sup>7</sup> Hier kann auch die letzte in der Befragungsrunde 3 eingeführte Frage 72: „Ist Ihnen bekannt, dass mittlerweile die komplette Abwassersanierung im Keller (U2) installiert worden ist (Struvitreaktor für Urin, Membranbioreaktor für Braunwasser und Grauwasser)?“ beispielhaft genannt werden. Den Umfrageergebnissen beantworten über 70% der Befragten diese Frage mit „nein“.

soziieren mit solch einem Dünger überwiegend positive Attribute wie Umweltschutz, Ressourcenschutz und Nachhaltigkeit. Die Mehrheit der Landwirte würde einen Dünger auf Basis von Urin nutzen. Einschränkend wurden jedoch Bedenken hinsichtlich der Sicherheit und der langfristigen gesundheitlichen Unbedenklichkeit benannt. Weiterhin äußerten Landwirte im Zusammenhang mit dem Einsatz eines Urin-basierten Düngers Bedenken hinsichtlich der Akzeptanz auf Verbraucherebene. Die Ergebnisse der Umfrage zeigen jedoch, dass die Akzeptanz der Konsumenten von uringedüngten Produkten je nach Marktfrucht und Anbausystem recht hoch ist und sich solche Produkte unter bestimmten Voraussetzungen durchaus absetzen ließen.

Hinsichtlich der Rahmenbedingungen eines Urin-basierten Düngers lässt sich aus den Ergebnissen der Umfrage ableiten, dass der Preis für ein derartiges Produkt nicht zu hoch sein dürfte, um von den Landwirten als eine Alternative zu herkömmlichen Mineraldünger akzeptiert zu werden. Das verdeutlicht, dass ein solcher Dünger zur Zeit kein Produkt ist, was als „high-desirable“ eingestuft werden kann, unter bestimmten Rahmenbedingungen und einem verhältnismäßig geringen Preis jedoch durchaus Absatz finden könnte. Für die Produktakzeptanz der Landwirte wäre weiterhin von großer Bedeutung, dass im Hinblick auf den Einsatz eines Urin-basierten Düngers Richtlinien, Standards und sonstige Kriterien festgelegt werden würden, um eine Anwendersicherheit zu garantieren. Dies würde bedeuten, dass Urin bzw. Urinprodukte von einer dazu befugten Stelle wie bspw. dem Düngemittelbeirat als Düngemittel anerkannt und zugelassen werden würde. Ein entsprechender Antrag wurde von der Universität Bonn im Zusammenhang mit dem Vorhaben im November 2012 vorbereitet.

Aus den Ergebnissen zum Hintergrundwissen lässt sich ableiten, dass in der breiten Öffentlichkeit bisher wenig über alternative Sanitärsysteme und -konzepte bekannt ist. Auch waren die Kenntnisse zur Abwasseraufbereitung gering. Um einen bewussteren Umgang mit Ressourcen zu fördern, ist die Vermittlung von Basiskennnissen zur Abwasseraufbereitung weiterhin angezeigt. Das gilt sowohl für herkömmliche, derzeitige Systeme wie auch für alternative NASS-Systeme und Anwendungen. Die Vorteile der Nährstoffrückgewinnung in alternativen NASS Systemen wird auf lange Sicht gegenüber gegenwärtigen „End of Pipe-Ansätzen“ im Zuge der fortschreitenden Ressourcenverknappung immer mehr an Bedeutung gewinnen. Eine stärkere Sensibilisierung für diese Thematik könnte unter Umständen dazu beitragen, eine noch größere Akzeptanz für die wachsende Notwendigkeit von alternativen Systemen und dem Thema „Schließen von Nährstoffkreisläufen“ zu erreichen. Hierzu gehören auch Fachtagungen und die interdisziplinäre Vermittlung von Kenntnissen, um den Bekanntheitsgrad und die Akzeptanz alternativer Konzepte zu erhöhen.

## 3.7 Wirtschaftlichkeit (Verantwortlich: GIZ/Universität Bonn)

### 3.7.1 Ziele der Projektkomponente

Im Rahmen des SANIRESCH-Projekts wurde die Wirtschaftlichkeit des gewählten Systems, eines 3-Stoffstromsystems mit Spültrenntoilette (DWA, 2010), und seiner einzelnen Komponenten analysiert und mit dem konventionellen Frankfurter Abwassersystem verglichen (kurz „Wirtschaftlichkeit Gebäude“). Es wurden über den gesamten Projektzeitraum die Kosten erfasst. Dies beinhaltete die Investitions-, Reinvestitions- und laufenden Kosten. Außerdem wurde die Wirtschaftlichkeit von zwei Wegen der Urinnutzung (kurz „Wirtschaftlichkeit landwirtschaftliche Nutzung“) betrachtet: direkte Applikation des gelagerten Urins als auch MAP-Fällung und Nutzung des produzierten Düngemittels. Wichtig war insbesondere, herauszufinden welche Faktoren einen besonders großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des SANIRESCH-Systems haben.

Aufgrund von Ergebnissen aus Studien anderer Projekte und ersten, in Studentendarbeiten ermittelten eigenen Zwischenergebnissen (Lazo Paéz, 2010; Braum, 2011) wurde erwartet, dass besonders das dreifache Leitungssystem (Oldenburg, 2007), der hohe Preis der NoMix-Toiletten (Winker und Saadoun, 2011), die beträchtlichen Energiekosten der MBRs und die manuelle Arbeitszeit am MAP-Reaktor einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben.

### 3.7.2 Material und Methoden

Um die Wirtschaftlichkeitsanalyse möglichst realistisch zu gestalten, wurde nicht das tatsächlich implementierte SANIRESCH-System, das sich nur auf den mittleren Bereich des Gebäudes beschränkt, betrachtet, sondern das System bezogen auf das gesamte Bürogebäude. Dies wird täglich von ca. 650 Personen ganztägig genutzt, dies beinhaltet Mitarbeiter, Gäste und Dienstleister. Dies beinhaltete neben der Aufaddierung der Stoffstromvolumina auch eine größere Dimensionierung der beiden MBR-Anlagen, während die MAP-Fällungsanlage wie in Kapitel 3.2.2.1.1 beschrieben, belassen werden konnte.

Für die Grauwasserbehandlung wurde die Membrane Clear Box (MCB) 3x2-2 von HUBER SE ausgewählt, welche bis zu  $3,75 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  behandeln kann. Außerdem wurden Vorlage und Puffer etwas größer, angepasst an den höheren Grauwasseranfall von ca.  $3010 \text{ l d}^{-1}$ , dimensioniert. Ihre technische Ausführung blieb jedoch gleich (siehe Kapitel 3.2.2.2.1). Für die Braunwasserbehandlung wurde für das an Werktagen anfallende Volumen von  $7250 \text{ l d}^{-1}$  das Modul MCB 4x3-1 ausgewählt. Da es sich um ein deutlich größeres Volumen handelt (das aktuelle Volumen eines Toilettenstrangs aus dem mittleren Gebäudebereich liegt bei ca.  $2.000 \text{ l}$ , siehe auch Tabelle 11), muss auch eine andere Vorreinigung berücksichtigt werden. Hierfür wurde als Lösung ein herkömmliches Sedimentationsbecken ( $10 \text{ m}^3$ ) bestehend aus einem PE-Tank mit Füllstandanzeige und Schlammabzug herangezogen. Zusätzlich wurde als Speicher für das Servicewassers ebenfalls ein PE-Tank mit  $10 \text{ m}^3$  berücksichtigt.

Da beide Anlagen in einem Bürogebäude stehen und somit nur werktags betrieben werden und am Wochenende im Sparmodus laufen, wird mit Stromkosten von 1070 € a<sup>-1</sup> für die Grauwasser- und von 2510 € a<sup>-1</sup> für die Braunwasserbehandlung gerechnet.

### 3.7.2.1 Kostenvergleich nach LAWA

Als Methodik wurde die Kostenvergleichsrechnung (KVR) nach LAWA (2005) gewählt. Diese Leitlinien wurden speziell für Wasser- und Abwasservorhaben entwickelt, um die kosteneffizienteste Lösung mittels einer relativen Kostenvergleichsrechnung zu identifizieren und wurden bereits in anderen Projekten erfolgreich angewandt (Oldenburg, 2007; Meininger, 2012).

Basierend auf verschiedenen Szenarien, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben sind, wurden der Projektkostenbarwert (PKBW), die Jahreskosten (JK) und die Dynamische Gestehungskosten (DGK) mithilfe einer KVR berechnet. Diese stützen sich wiederum auf die zuvor im gesamten Projektverlauf ermittelten Investitions-, Reinvestitions- und laufenden Projektkosten. Als Bezugsjahr für alle Kosten wurde das Jahr 2010 als Hauptjahr für die Implementierung der Behandlungsanlagen gewählt. Alle älteren Installationen wie sanitäre Anlagen in den Toilettenräumen, Rohrleitungen, Urinsammeltanks und die Entlüftung wurden entsprechend aufgezinnt. Alle später vorgenommenen Installationen wurden entsprechend gemäß LAWA (2005) diskontiert. Alle Kosten wurden als Bruttokosten inklusive Mehrwertsteuer berücksichtigt. Für den Strompreis sowie die Wasser- und Abwassergebühren wurden die Preise und Tarife vor Ort herangezogen.

Bei einer KVR ist zudem eine Reihe von Annahmen zu treffen, die für das Projekt wie folgt festgelegt wurden. Die Projektlaufzeit beträgt 30 Jahre und der Zinssatz 3% (LAWA, 2005). Die Laufzeit der einzelnen Komponenten des Systems wird individuell in die Betrachtung mit einbezogen. Hier werden die wichtigsten genannt: Toiletten, Urinale und andere Sanitärartikel – 15 Jahre (Prager, 2002); Urinlagertanks – 35 Jahre (Prager, 2002); MBRs – 15 Jahre (HUBER SE, 2012, mündliche Kommunikation); MAP-Fällungsreaktor – 25 Jahre (HUBER SE, 2012, mündliche Kommunikation); Wasser-/Abwasserleitungen – 45/35 Jahre (Prager, 2002).

Der Nährstoffgehalt des Bodens liegt in Klasse C (gutversorgter Boden, KTBL, 2009) und der Nährstoffbedarf der Pflanzen wird komplett gedeckt, ggf. durch Addition von zusätzlichem Dünger, für die Nährstoffe N, P, K, Mg und Ca. Ein gutversorgter Boden der Klasse C wird mit 120 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, 26 kg P ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, 100 kg K ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>, 24 kg Ca ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> und 11 kg Mg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> gedüngt. Die Menge, die auf einen ha der unterschiedlichen Dünger ausgebracht werden, sind: 48 m<sup>3</sup> Urin, 152 kg MAP, 481 kg KAS und 141 kg Triplephos.

Im Fall der SANIRESCH-Dünger wurde deren Wert in der KVR positiv den Produktions-/Lagerkosten gegengerechnet. Der Wert des Urins wurde analog der Kosten für Zusatzdünger nach den einzelnen enthaltenen Nährstoffmengen für N, P, K, CA und Mg berechnet. Für MAP wurde ein Wert von 300 € t<sup>-1</sup> angesetzt. Dieser Wert wurde über zwei Berechnungsme-

thoden bestimmt. Zum einen über den Preis für Diammonphosphat unter Berücksichtigung des P-Anteils und zum anderen über die Aufaddierung der enthaltenen Einzelnährstoffe. Beide Berechnungswege führten zu einem Preis von ca. 320 € t<sup>-1</sup>. Daher entschieden wir uns für den etwas konservativer gewählten Wert von 300 € t<sup>-1</sup>. Dies geht auch einher mit dem Ergebnis der Umfrage bei Landwirten, die hauptsächlich angaben, dass die Nutzung von Urin und MAP zur Düngung nur dann attraktiv sei, wenn diese kostenlos oder günstiger als auf dem Markt verfügbare Düngemittel sind (Kapitel 3.6.3.2.6). Es wurde jedoch entschieden, dass es prinzipiell keinen Sinn macht eine kostenlose Vergabe zu betrachten.

Als Mineraldüngervergleich wurde Kalkammonsulfat (KAS) für Urin und Triple-Superphosphat (Triplephos) für MAP herangezogen. Deren Preise (KAS: 310 € t<sup>-1</sup>; Triplephos: 550 € t<sup>-1</sup>) wurden bei verschiedenen Düngemittelvertreibern in der Region erfragt und gemittelt. Diese beinhalten die Lieferung des Düngers frei Hof. Die Preise für die einzelnen Nährstoffe wurden über das Onlineportal der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalens (Agrarmarkt NRW, 2012) ermittelt und sind Tabelle 42 zu entnehmen.

**Tabelle 42: Preise der Einzelnährstoffe wie sie in dieser KVR berücksichtigt wurden (Agrarmarkt NRW, 2012).**

Nährstoff	Preis
	[€ t <sup>-1</sup> ]
Stickstoff (N)	1,00
Phosphor (P)	2,30
Kalium (K)	0,90
Calcium (Ca)	3,40
Magnesium (Mg)	0,47

Die im SANIRESCH-Projekt produzierten Dünger können pro Jahr bei Urin 2,83 ha und bei MAP 0,39 ha versorgen. Die PKB beziehen sich je nach Szenario auf diese beiden Flächen. Im KTBL (2009) wird von einer Entfernung Hof-Feld von 2000 m bei einer durchschnittlichen Feldgröße von 2 ha und von 4000 m von 20 ha ausgegangen. Da die dort vorgelegten landwirtschaftlichen Kennzahlen den deutschen Durchschnitt widerspiegeln, wurde auch hier von einer Hof-Feld bzw. Gebäude-Feld-Entfernung von 2000 m ausgegangen. Diese Annahme ist auch gemessen an den real existierenden Bedingungen realistisch einzuschätzen. Die logistischen Optionen werden in Kapitel 3.7.2.4 im Detail vorgestellt.

Das konventionelle Abwassersystem wird über die Wasser- und Abwassergebühr der Stadt Eschborn berücksichtigt. Hierin sind natürlich nicht die volkswirtschaftlichen Kosten für die Infrastrukturerhaltung vollständig abgebildet. Auch wurde eine Entlastung des konventionellen Systems bei anderweitiger Abwasserreinigung nicht gegengerechnet. Ebenso nicht berücksichtigt ist die Anschlussgebühr des Gebäudes an den Kanal, da der Anschluss bereits in den frühen 70er Jahren erfolgte und die Kosten nicht mehr genau zu ermitteln sind.

### 3.7.2.2 Betrachtete Szenarien und Sensitivitätsanalysen

Die Wirtschaftlichkeit des SANIRESCH-Konzepts wurde mittels zweier Analysen betrachtet (siehe Abbildung 109) und für beide wurden unabhängig Szenarien kreiert und Sensitivitätsanalysen entworfen. Beide Analysen betrachten immer das gesamte Bürogebäude, nie wurde nur der mittlere Gebäudeteil, in dem im Rahmen des Projekts das neuartige Sanitärkonzept installiert wurde, betrachtet.

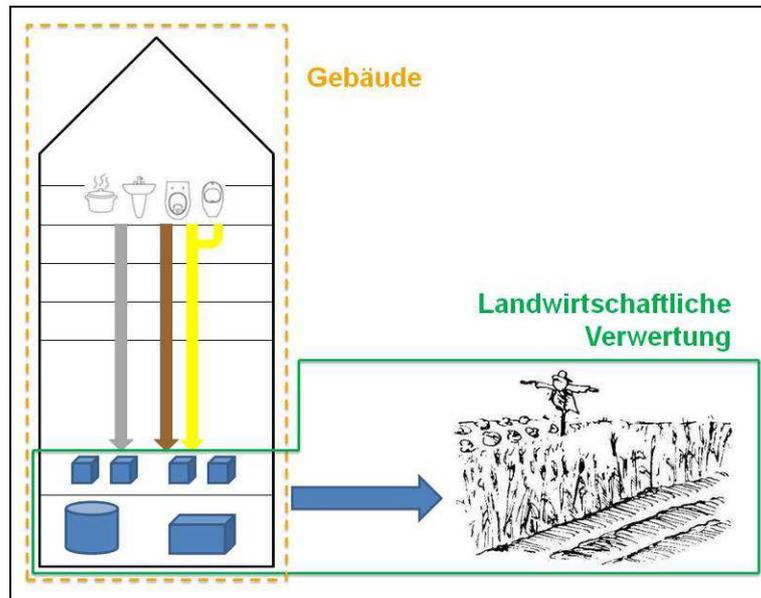


Abbildung 109: Darstellung der beiden in den Wirtschaftlichkeitsanalyse „Gebäude“ (gestrichelte Linie) und „Landwirtschaftliche Verwertung“ (durchgezogene Linie) betrachteten Systeme, ihre Systemgrenzen und ihrer Überschneidungen.

### 3.7.2.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse „Gebäude“

Innerhalb der Wirtschaftlichkeitsanalyse „Gebäude“ wurden drei Szenarien betrachtet:

- Szenario A: SANIRESCH-System mit Abholung des gelagerten Urins durch einen Landwirt
- Szenario B: SANIRESCH-System mit MAP-Fällung und dessen Verkauf ab Gebäude
- Szenario C: Konventionelles Abwassersystem wie im restlichen Gebäude implementiert

Es wurden unterschiedlichste Sensitivitätsanalysen betrachtet. Hier werden nur die mit einer hohen Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit vorgestellt. Dabei handelt es sich um:

- Erhöhung der Automatisierung innerhalb der MAP-Fällung
- Erhöhung der Lebensdauer der Ersatzteile der NoMix-Toiletten
- Absenkung der Investitionskosten für NoMix-Toiletten und wasserlose Urinale

### 3.7.2.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse „Landwirtschaftliche Verwertung“

Innerhalb der Wirtschaftlichkeitsanalyse „Landwirtschaftliche Verwertung“ wurden insgesamt drei Szenarien mit verschiedenen logistischen Variationen betrachtet. Hierbei wurden die kostengünstigsten und am ehesten durchzuführenden Szenarien einer ersten Analyse durch Braum (2011) weiterentwickelt:

- Szenario I: Urinverwertung nach Lagerung mit großem Lager neben dem Bürogebäude
- Szenario II: Urinverwertung nach Lagerung mit großem Lager in Feldnähe
- Szenario III: MAP-Verwertung mit Lagerung des MAPs im Gebäude
- Szenario IV: konventionelle Düngung mit Mineraldünger

Dabei kamen verschieden Optionen zur Logistik zum Einsatz. So wurden für die Urinlagerung IBC-Tanks und Plastikblasen sowie für den Transport verschiedene Optionen wie eigenes Gerät, Mietfahrzeuge, Spedition und Ausführung durch einen Landwirt betrachtet. Die Optionen wurden je nach Szenario I-III miteinander kombiniert.

Es wurden unterschiedlichste Sensitivitätsanalysen betrachtet. Hier werden nur die mit einer hohen Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit vorgestellt. Dabei handelt es sich um:

- Absenkung des Grundstückspreises in Eschborn
- Erhöhung des Phosphorpreises bzw. aller Nährstoffpreise
- Senkung der Kosten innerhalb der MAP-Produktion

## 3.7.3 Ergebnisse und Diskussionen

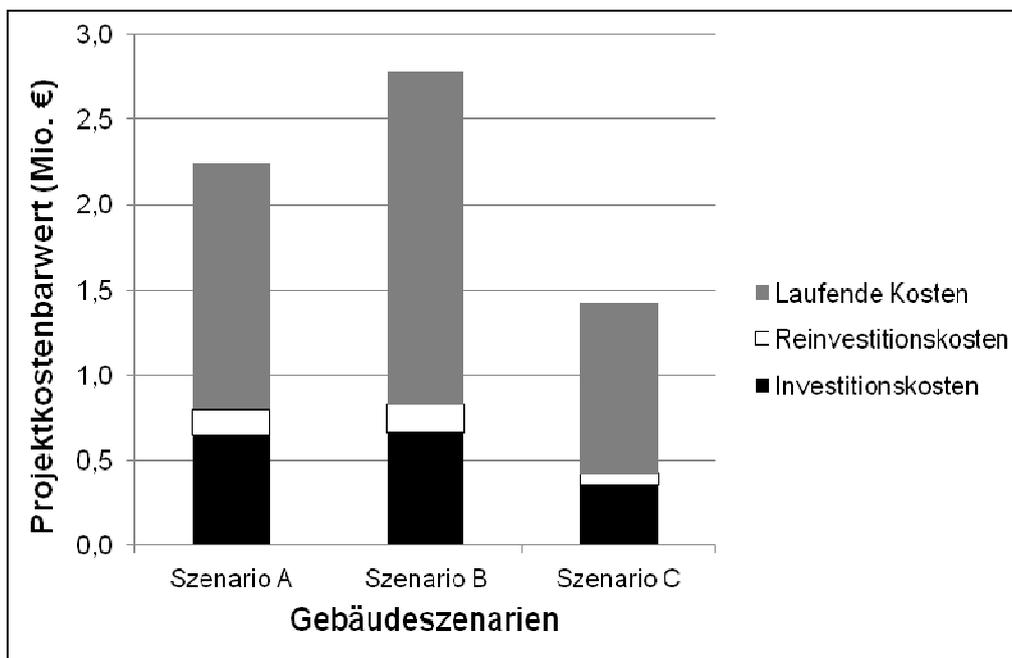
### 3.7.3.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse „Gebäude“

**Tabelle 43: Projektkostenbarwert (PKBW), Jahreskosten (JK) und Dynamische Gestehungskosten (DGK) der drei Szenarien.**

Szenario	PKBW	JK	DGK
	[€]		[€cents Nutzung <sup>1</sup> ]
<b>A</b>	2.237.900	114.300	10,43
<b>B</b>	2.783.800	142.100	12,97
<b>C</b>	1.427.700	72.800	6,65

Der Unterschied mit 2,54 €cents/Nutzung zwischen den beiden SANIRESCH-Alternativen (Szenarien A und B) ist relativ gering im Vergleich zu dem doch großen zum konventionellen System (siehe Tabelle 43). Diesen deutlichen Kostenunterschied zwischen den SANIRESCH-Varianten und dem konventionellen Szenario spiegeln nicht nur der Projektkostenbarwert (PKBW) sondern auch die Jahreskosten (JK) und die Dynamischen Gestehungskosten (DGK) wieder.

Der Unterschied zwischen den Szenarien A/B und C ergibt sich durch die deutlich höheren laufenden Kosten (siehe Abbildung 110). Diese haben einen größeren Einfluss als höhere Investitionskosten verursacht etwa durch dreifache Leitungsführung und höhere Stückpreise der Toiletten, auch wenn diese einen gewissen Einfluss haben. So sind die Investitionskosten für Szenario A und B 1,8-mal so hoch wie für das konventionelle Szenario. Bei den laufenden Kosten sind die hohen Kosten für den Unterhalt der NoMix-Toiletten mit ca. 25.000 € pro Jahr zu nennen im Vergleich zu 2400 € in Szenario C. Sowie ergibt sich der große Unterschied zwischen Szenario A und B aus dem Betrieb der MAP-Fällungsanlage, die laufenden Kosten von 26.600€/Jahr hat. Letztere haben wir aufgrund der deutlicheren Darstellung sogar auch die Anzahl der Toiletten- und Urinalnutzungen und nicht auf die m<sup>3</sup> Abwasser bezogen, da der Abwasseranfall in den SANIRESCH-Varianten durch die wassersparenden Maßnahmen geringer ausfällt. Durch den Verbau von wasserlosen Urinalen, dem geringeren Spülmenge pro Spülgang der NoMix-Toiletten und der wassersparenden Armaturen wurde hier auf ein wassersparendes System Wert gelegt.



**Abbildung 110: Projektkostenbarwert „Gebäude“ der drei Szenarien: A – SANIRESCH mit Urinnutzung, B – SANIRESCH mit MAP-Fällung, C – konv. System.**

Eine hohe Sensitivität und großes Potential für eine bessere Wirtschaftlichkeit verzeichnet ein höherer Automatisierungsgrad der MAP-Fällung. Die benötigte manuelle Arbeitszeit von 4,35 h/Charge, wobei eine Charge 8 Fällungszyklen enthält, verhindert eine Wirtschaftlichkeit der MAP-Produktion. Wenn eine Automatisierung von 75% bzw. 95% erreicht wird, verringert das den PKBW und die JK um 9,8% bzw. 12,4% und resultiert in DGK von 11,7 bzw. 11,4 €cents/Nutzung. Doch zeigt die Analyse auch deutlich, dass allein damit die Wirtschaftlichkeit von Szenario A oder auch C nicht erreicht werden kann.

Ein weiterer Aspekt, der für eine deutliche Kostensenkung der beiden neuartigen Konzepte sorgen würde, ist eine Verbesserung der Lebensdauer der Ersatzteile der NoMix-Toiletten

kombiniert mit einer Absenkung der Investitionskosten für Toiletten und Urinale (siehe Tabelle 44). Die DGK für Szenario A erreichen hier bei einer Erhöhung der Lebenszeit der Ersatzteile um 30% (diese beträgt für die Ventile im optimalen Fall 495 Tage, errechnet wurde von Roediger Vacuum eine durchschnittliche Lebenszeit von 337 Tagen, Kapitel 3.1.3.2) und einer Reduktion der Investitionskosten um 25%, welche bei größerer Nachfrage durchaus realistisch ist, mit 6,98 €cents/Nutzung nahezu die DGK von Szenario C.

**Tabelle 44: Auswirkung einer höheren Lebenszeit der Ersatzteile der NoMix-Toiletten kombiniert mit einer Reduktion der Investitionskosten (IK) für Toiletten und Urinale, betrachtet für Szenario A und B.**

Erhöhung der Lebenszeit der Ersatzteile	[%]	10	20	30	Ausgangswerte
Reduktion der IK für Toiletten & Urinale	[%]	5	15	25	
<b>Szenario A</b>					
DGK	[€cents Nutzung <sup>-1</sup> ]	7,66	7,32	6,98	10,4
Änderung	[%]	26,6	29,8	33,1	
<b>Szenario B</b>					
DGK	[€cents Nutzung <sup>-1</sup> ]	10,2	9,9	9,5	13,0
Änderung	[%]	21,4	24,0	26,6	

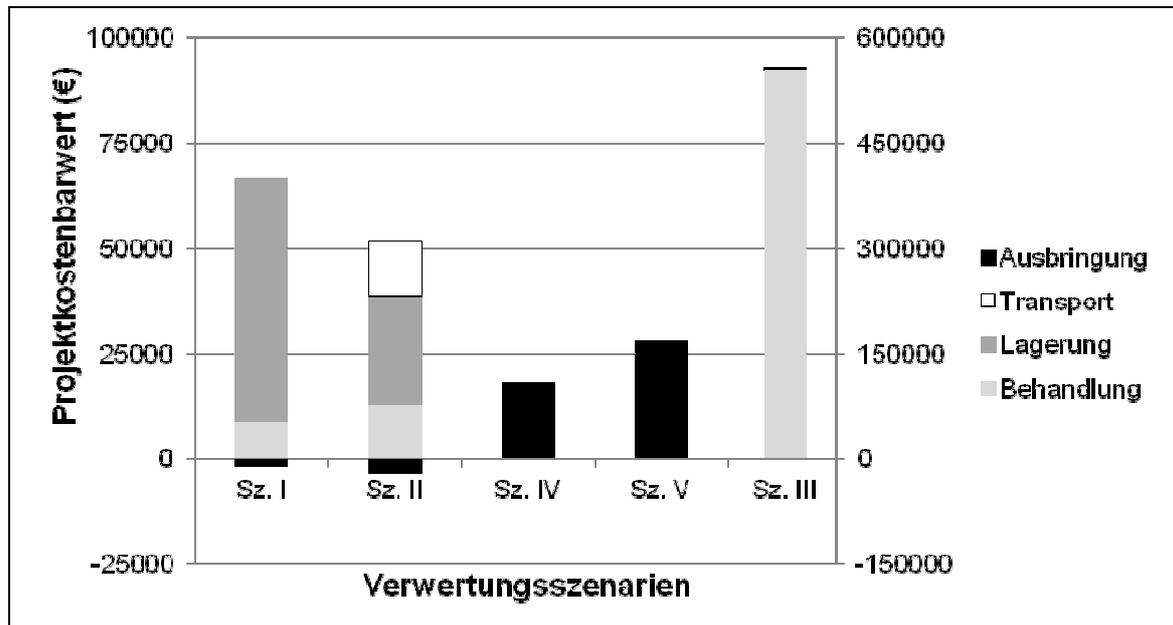
Diese Annäherung an die DGK des konventionellen Systems nur anhand der beiden Parameter „Erhöhung der Lebenszeit der Ersatzteile“ und „Reduktion der Investitionskosten für Toiletten und Urinale“ zeigt auf, dass das SANIRESCH-Konzept in seiner Gebäudetechnik, insbesondere wenn noch eine höhere Automatisierung der MAP-Fällung erfolgt, wirtschaftlich werden kann.

### 3.7.3.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse „Landwirtschaftliche Verwertung“

Im Falle von Szenario I und II werden Behandlung und Lagerung dahingehend unterschieden, dass es sich bei der Behandlung um den ersten Schritt der Lagerung im Gebäude der GIZ in den 8 m<sup>3</sup> Tanks (siehe Kapitel 3.3.3.2) handelt, der auch für Szenario IV so gegeben ist. Auch wenn für Szenario IV die Speicherkapazität in der Wirtschaftlichkeitsanalyse auf 0,8 m<sup>3</sup> reduziert wurde. Die „Lagerung“ beinhaltet dann die weitere Lagerung des Urins bis zur Ausbringung bei der GIZ oder aber in Feldnähe. Das heißt, dass man strenggenommen für Szenario I und II auch die beiden Aspekte „Behandlung“ und „Lagerung“ zusammen betrachten kann.

Die Analyse der landwirtschaftlichen Szenarios zeigt zunächst, dass eine Lagerung in Nähe der landwirtschaftlichen Flächen aufgrund der deutlich geringeren Grundstückspreise sehr viel attraktiver ist (siehe PKBW für Lagerung von Szenario I in Abbildung 111), wenngleich es zu berücksichtigen gilt, dass dadurch die Transportkosten deutlich steigen. Da deshalb

alle Varianten des Szenarios II (Lagerung in Feldnähe) günstiger waren, wird im weiteren Verlauf für die direkte Nutzung des Urins schwerpunktmäßig Szenario II betrachtet.



**Abbildung 111:** Projektkostenbarwert „Landwirtschaftliche Nutzung“ der fünf Szenarien betrachtet für eine Fläche von 2,83 ha bzw Sz. III für 0,39 ha :

Direkte Urinnutzung: I – Lagerung bei der GIZ, II – Lagerung am Feld; III – Produktion und Nutzung des MAPs, IV – Nutzung von KAS, V – Nutzung von Triplephos. Jeweils dargestellt ist die kostengünstigste Variante jedes Szenarios. Szenario III orientiert sich an der rechten y-Achsenkalierung.

Für die Lagerung in Feldnähe ist die Option einer Lagerung in einer Plastikblase am billigsten. Während in Nähe des Bürogebäudes die IBC-Tanks vorzuziehen sind. IBC-Tanks sind an sich teurer, da sie jedoch stapelbar sind und der Grundstückspreis in Eschborn sehr hoch, ist es insgesamt günstiger.

Über alle Szenarien hinweg, ist die Durchführung des Transports durch den Landwirt immer die kostengünstigste Alternative. Wobei in Szenario II (in Szenario I, IV und V wird nur durch den Landwirt transportiert, daher fällt es aus diesen Vergleich heraus) der PKB dadurch zwischen 9.700 - 27.000 € geringer ist, während es in Szenario III nahezu kein Unterschied (47 € günstiger ist der Landwirt) zwischen der Option Spedition und Landwirt gibt, jedoch einen deutlichen mit 20.100 € zur Option eigenes Auto.

Deutlich teurer als die Urinszenarien ist das Szenario mit MAP-Produktion und -Nutzung. Das liegt insbesondere an den sehr hohen Kosten von 23.600 € a<sup>-1</sup> für die MAP-Produktion. Diese bestehen wiederum zu 78% aus den Kosten für die manuellen Arbeiten im Produktionszyklus (weitere Details siehe in Kapitel 3.7.3.1).

Interessant zu sehen ist der Vergleich der die Düngerkosten pro Hektar (siehe Tabelle 45) zwischen den neuartigen Düngern und den mineralischen Düngern Kalkammonsalpeter

(KAS) und Triple-Superphosphat (Triplephos). Beide Produkte aus alternativer Herstellung liegen deutlich über den Kosten der Mineraldünger, wobei Urin nur 2-3 mal so teuer ist, während MAP um ein bis zu 220 faches darüber liegt.

**Tabelle 45: Düngekosten je Hektar bei Bodenklasse C für verschiedene Düngemittel. Es wurden jeweils die kostengünstigsten Alternativen innerhalb der einzelnen Szenarien dargestellt. T: Transport, L: Lagerung, A: Ausbringung, KAS: Kalkammonsalpeter.**

Szenario	Logistikkette	Kosten je Düngemittelleinheit	Kosten
			[€ ha <sup>-1</sup> ]
<b>Urinnutzung nach Lagerung</b>	T: Landwirt, L: Plastikblase in Feldnähe, A: Pumptankwagen 10m <sup>3</sup>	14,2 € m <sup>-3</sup>	680
<b>MAP-Produktion &amp; Nutzung</b>	L: GIZ, T: Landwirt, A: Anbauschleuderstreuer	309 € kg <sup>-1</sup>	46.900
<b>KAS</b>	L: -, T: Landwirt, A: Anbauschleuderstreuer	0,44 € kg <sup>-1</sup>	212
<b>Triplephos</b>	L: -, T: Landwirt, A: Anbauschleuderstreuer	2,33 € kg <sup>-1</sup>	328

Die Sensitivitätsanalysen zeigen sehr deutlich die relevanten Faktoren für eine Düngung mit SANIRESCH-Produkten. So wäre Szenario 1 bei einem Grundstückspreis in Eschborn von 100 € m<sup>-2</sup> anstelle der aktuellen 500 € m<sup>-2</sup> deutlich attraktiver und käme dann auf Düngekosten von 455 € ha<sup>-1</sup>.

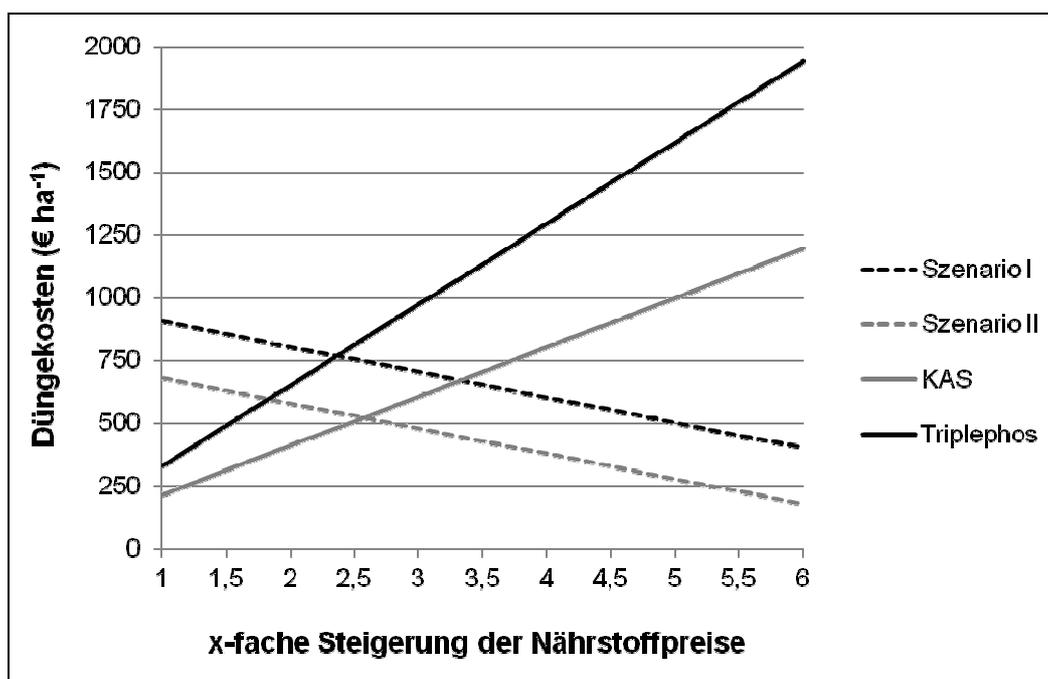
Ein zweiter Aspekt, von dem eine hohe Sensibilität erwartet wurde, ist der Phosphorpreis. Dieser zeigte zwischen Januar 2007 und September 2008 eine Steigerungsrate von 800% (Cordell, 2010). Es zeigte sich, dass die Steigerung des P-Preises als auch die Gesamtsteigerung aller Nährstoffe um das 8-fache großen Einfluss im Falle von Urin (Szenario I und II) auf die DGKs der Szenarien haben (siehe Tabelle 46).

**Tabelle 46: Düngekosten je Hektar Fläche bei einer erneuten Steigung des Phosphorpreises bzw. aller Nährstoffe um 800% bei Bodenklasse C betrachtet nach den verschiedenen Düngemitteln. Es wurden jeweils die kostengünstigsten Alternativen innerhalb der einzelnen Szenarien dargestellt. T: Transport, L: Lagerung, A: Ausbringung, KAS: Kalkammonsalpeter.**

Szenario	Logistikkette	Kosten bei Preissteigerung <sup>1</sup>			
		Phosphor: 800%		Alle Nährstoffe: 800%	
		[€ ha <sup>-1</sup> ]	Änderung in %	[€ ha <sup>-1</sup> ]	Änderung in %
<b>Urinnutzung nach Lagerung</b>	T: Landwirt, L: Plastikblase in Feldnähe, A: Pumptankwagen 10m <sup>3</sup>	775	14	-23,5	-103
<b>MAP-Produktion &amp; Nutzung</b>	L: GIZ, T: Landwirt, A: Anbauschleuderstreuer	45.300	-3,6	46.600	-0,7
<b>KAS</b>	L: -, T: Landwirt, A: Anbauschleuderstreuer	486	129	1590	647
<b>Triplephos</b>	L: -, T: Landwirt, A: Anbauschleuderstreuer	709	116	2590	688

<sup>1</sup> Steigerungsrate angenommen analog der des Phosphorpreises zwischen Januar 2007 und September 2008 (Cordell, 2010).

Abbildung 112 zeigt die Veränderung der Düngekosten in Abhängigkeit vom Nährstoffpreis. Der Urin wird, wenn man sie mit KAS vergleicht, da sie ja hauptsächlich Stickstoffdünger darstellen, ab einem Nährstoffpreisanstieg von 3,3 im Falle von Szenario I und bei 2,6 bei Szenario II wirtschaftlich. Vergleicht man sie mit Triplephos, ist es bereits bei 2,4 (Szenario I) bzw. 1,8 (Szenario II) der Fall.



**Abbildung 112: Veränderung der Düngekosten pro Hektar in Abhängigkeit von den der Steigerung der Nährstoffpreise in den einzelnen Szenarien.**

Weitere Szenarien, die zu kostengünstigeren Alternativen führen, sind in der Ausführung der Behandlung und Lagerung zu finden. Im Falle von Szenario I und II reduziert das Weglassen der Urintankentlüftung die Ausbringungskosten pro Hektar aller Unterszenarien um 47-53%. Diese Kostenreduktion setzt sich zum einen aus geringen Investitions- und laufenden Kosten zusammen. Darüber hinaus bleibt die Stickstoffkonzentration im Urin bei ca.  $6 \text{ g l}^{-1}$  (DWA, 2008; Wohlsager et al., 2010) im Vergleich zu der gemessenen von  $3 \text{ g l}^{-1}$ . Im Falle von Szenario I bei geringeren Grundstückskosten von  $100 \text{ € m}^{-2}$  ist der DGK dann  $241 \text{ € ha}^{-1}$ .

Für die Varianten mit MAP-Produktion konnten jedoch auch solch positive Bedingungen zu keiner deutlichen Kostenreduzierung beitragen. Unter der Annahme, dass die MAP-Produktion weiterentwickelt wird und eine Reaktorautomatisierung möglich wird, die die manuelle Arbeitszeit um 75% senkt, eine Solartrocknung implementiert wird und die Investitionskosten des Fällungsreaktors um 50% reduziert werden, reduzieren sich die Kosten zwar um mehr als die Hälfte, betragen jedoch immer noch DGK von  $18.800 \text{ € ha}^{-1}$ . Daher bleibt hier nur die Option, die Behandlungskosten einmal völlig herauszunehmen und die Kosten für die landwirtschaftliche Nutzung erst ab vorliegendem MAP zu betrachten. Dies bedeutet jedoch, dass die Kosten für die Behandlung vollständig über die Behandlungskosten abgedeckt sind (siehe auch Analyse „Gebäude“, Abbildung 109 und Tabelle 43) und kein Erlös aus der Landwirtschaft zusätzlich benötigt werden darf.

Wenn man die DGK ohne Behandlungskosten (im Falle von Urin (Szenario I und II) beinhaltet das die Lagerung des Urins im Gebäude) betrachtet, ergeben sich für die Urinszenarien I und II nur geringfügig reduzierte dynamische Gestehungskosten von 10-26%, da die Lagerung sehr kostengünstig ist. Für MAP reduzieren sich die DGKs jedoch um 96-100%, was den Einfluss der Behandlung auf die Kosten nochmals zeigt. Ohne Behandlungskosten liegen die DGK bei  $59 \text{ € ha}^{-1}$  bei Transport durch den Landwirt und bei  $63 \text{ € ha}^{-1}$  bei Transport durch eine Spedition. Damit handelt es sich auch bei Szenario III um die kostengünstige Situation verglichen mit den anderen Szenarien ohne Behandlungskosten (Szenario I:  $502 \text{ € ha}^{-1}$ ; Szenario IV und V bleiben gleich mit  $213 \text{ € ha}^{-1}$  (KAS) und  $328 \text{ € ha}^{-1}$  (Triplephos)).

### 3.7.4 Fazit

Die Wirtschaftlichkeit beider betrachteter Analysen „Gebäude“ und „Landwirtschaftliche Nutzung“ ist im aktuellen Fall mit der konventionellen Abwasserbehandlung bzw. mineralischen Düngung nicht konkurrenzfähig. Die DGK beider alternativen Gebäudeszenarien und landwirtschaftlicher Nutzungsszenarien liegen über den konventionellen Szenarien.

Die Sensitivitätsanalysen zeigen jedoch auch, dass Potential für eine bessere Wirtschaftlichkeit vorhanden ist. Bei einer Änderung der beiden Parameter „Erhöhung der Lebenszeit der Ersatzteile“ um 30% und „Reduktion der Investitionskosten für Toiletten und Urinale“ um 25% nähert sich insbesondere Szenario A (DGK Szenario A:  $6,98 \text{ €cents Nutzung}^{-1}$ ; Szenario B:  $9,50 \text{ €cents Nutzung}^{-1}$ ) dem des konventionellen an (DGK:  $6,65 \text{ €cents Nutzung}^{-1}$ ). Der hohe Strombedarf der beiden MBR-Anlagen als auch insgesamt die Implementierung der beiden

MBR-Anlagen ist aus wirtschaftlicher Seite eine interessante Alternative. Wenn dann noch eine höhere Automatisierung der MAP-Fällung in Szenario B erfolgt, kann das Konzept durchaus wirtschaftlich interessant werden. Knackpunkt ist jedoch die MAP-Fällung, da nur hier eine Weiterentwicklung eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit mit sich bringen kann.

Die Betrachtung der landwirtschaftlichen Nutzung zeigt, dass es hier deutlich größerer Einflüsse bedarf, um die neuartigen Dünger mit den kommerziell gehandelten konkurrenzfähig werden zu lassen. Aktuell kann die Urindüngung wirtschaftlich attraktiv sein, wenn die Rahmenbedingungen des Standorts hierfür günstig sind. Diese ist im Falle der GIZ/Eschborn nicht gegeben, andere Untersuchungen zeigen jedoch, dass dies möglich ist (Tidåcker et al., 2007; Maurer et al., 2003; Wittgren et al., 2003). Eine MAP-Düngung ist jedoch nur dann wirtschaftlich realisierbar, wenn der Herstellungspreis für MAP unter dem von gehandelten, kommerziellen Phosphordünger bleibt. Dies wäre jedoch selbst bei deutlicher Erhöhung der Phosphor- und Nährstoffpreise insgesamt nicht zu erwarten.

## 3.8 Internationale Übertragbarkeit (Verantwortlich: GIZ)

### 3.8.1 Ziele der Projektkomponente

In der Projektkomponente „Internationale Übertragbarkeit“ wurde analysiert, welches Potential zur Übertragbarkeit der innerhalb des SANIRESCH-Projektes implementierten Abwasserbehandlungstechnologien Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)-Fällung (aus Urin) sowie die Aufbereitung des Grau- und Braunwassers in zwei gesonderten Membranbioreaktoren (MBR) in andere Regionen aufweisen (vgl. Kapitel 3.2). Das Ziel war es, herauszufinden, welchen Ansprüchen diese drei Anlagen jeweils gerecht werden können und wo, weltweit betrachtet, prinzipiell Bedarf an derlei Abwasserbehandlungsmethoden herrscht und sich daraus eine Nachfrage entwickeln kann. Neben der Überprüfung der technischen Funktionalität und betriebswirtschaftlichen Analyse liegt das Hauptaugenmerk dieser Untersuchung darin, besonders geeignete Regionen und typische Einsatzsituationen anhand von relevanten Kriterien zu identifizieren. Zusätzlich werden Rahmenbedingungen definiert, die eine Einführung der Technologien auch in Schwellen- und Entwicklungsländern begünstigen. Es ist zu erwarten, dass insbesondere Regionen mit großem Nährstoffbedarf und / oder Regionen in denen Wasserknappheit herrscht, als Regionen mit hohem potentiellen Bedarf identifiziert werden. Dabei können die Anlagen entsprechend der jeweiligen Anforderungen einzeln, sowie auch in Kombination miteinander betrachtet werden.

### 3.8.2 Material und Methoden

Im Rahmen des SANIRESCH Projektes wurden mehrere Abschlussarbeiten zum Themenkomplex internationale Übertragbarkeit angefertigt. Eine erste Bearbeitung nahm Josep Maria de Trinchera (2010) in seiner Masterarbeit vor. In der Arbeit wurden die Rahmenbedingungen der internationalen Übertragbarkeit zusammengestellt und bewertet. Im weiteren Verlauf sind drei Arbeiten entstanden, die die internationale Übertragbarkeit der drei Behandlungsanlagen betrachten (Löw, 2011; Wu, 2011; Peng, 2012). Diese Ergebnisse wurden dann in einem abschließenden Schritt weiterüberarbeitet, vereinheitlicht und zusammengeführt.

#### 3.8.2.1 Nutzwertanalyse

Als geeignetes Verfahren zur Betrachtung der internationalen Übertragbarkeit wurde die Nutzwertanalyse (NWA) identifiziert. Generell dient eine Nutzwertanalyse zum Vergleich und zur Bewertung (Priorisierung) vielschichtiger Projekte oder Technologien in Bezug auf ein vorher definiertes Zielsystem (siehe unten). Im ersten Schritt erfolgt die Zusammenstellung der für die Betrachtung relevanten Kriterien, danach werden diese gewichtet, um daraus eine (Ein-) Ordnung der Alternativen durch die Nutzwerte (Gesamtwerte) zu erhalten (Zangemeister, 1976). Der Nutzwert lässt sich als Produkt aus Gewichtungsfaktor (Prozentsatz) und Bewertungsfaktor (Wert zwischen 0 und 10) berechnen und stellt einen Prozentwert im Verhältnis zu einem Erfüllungsgrad von 100% dar.

Das Zielsystem zur Untersuchung der internationalen Übertragbarkeit der Behandlungsmethoden besteht aus folgenden Hauptkriterien: *Gesundheit und Hygiene*, *Finanzielle Kriterien*, *Technologie*, *Umweltbezogene Kriterien* und *Soziokulturelle Kriterien*, und beziehen sich auf die Nachhaltigkeitsaspekte urbanen Abwassermanagements (vgl. Hellström et al., 2000 und SuSanA, 2008). Basierend auf diesen Hauptkriterien lässt sich eine Reihe von Unterkriterien ableiten, die dann nach Einschätzung der Autoren und unter Abstimmung mit verschiedenen Experten (vgl. hierzu Kapitel 3.8.3.1 sowie Löw (2011) und Wu (2011)) gewichtet wurden. Es gilt, je höher ein Gewichtungsfaktor, desto größer wird sein Beitrag zur Gesamtgewichtung eingeschätzt. Am Beispiel von Tabelle 48 wird verdeutlicht wie der Nutzwert berechnet wird. In Spalte A sind die Haupt- und Unterkriterien aufgeführt. Spalte B beinhaltet die zugehörige Gewichtung. Spalte C enthält die Bewertungsfaktoren mit Erläuterungen. Der eigentliche Nutzwert (Spalte D) berechnet sich nun als Produkt aus Gewichtungsfaktor (Spalte B) und Bewertungsfaktor (Spalte C). Bei Tabelle 49 wurde aus Darstellungsgründen auf Spalte D verzichtet.

Im Rahmen des SANIRESCH-Projektes wurden die Nutzwertanalysen (vgl. Tabelle 48 und Tabelle 49) als Werkzeug zur Entscheidungsfindung für eine erfolgreiche Implementierung neuartiger Sanitärsysteme, speziell von MBR- sowie Nährstoffrückgewinnungsanlagen entwickelt und genutzt.

### 3.8.2.2 Identifikation der Hotspots

Eine weitere Verwendung findet die Nutzwertanalyse im Rahmen des SANIRESCH-Projektes zur Identifikation globaler Hotspots, an denen der Einsatz der drei Technologien MAP-Fällungsreaktor sowie Grau- und Braunwasser-MBRS sinnvoll erscheint und ein besonders hoher Bedarf vorhanden sein sollte. Da zur Identifikation dieser Hotspots auf zum Teil begrenzt verfügbare räumliche Daten zurückgegriffen werden muss, wird die Liste der Kriterien aus Kapitel 3.8.2.1 auf jene beschränkt, die eindeutig mit der verfügbaren Datenlage auf globaler Ebene zu belegen sind.

Eine weitere Vereinfachung wurde bezüglich der Auswahl der Länder vorgenommen, die im Rahmen der Hotspotanalysen betrachtet wurden. Bei der Hotspotanalyse zur Nutzung der MAP-Fällung wurden basierend auf dem Indikator Phosphorimporte die 32 Länder mit dem größten Bedarf ausgewählt (FAOSTAT, 2012). Bei den Hotspotanalysen zur Nutzung der MBR-Systeme wurde die Einschränkung mithilfe des Indikators physikalische Wasserknappheit vorgenommen (UNESCO, 2009). Auch hier wurden 32 Länder der Statistik identifiziert. Die Gewichtungen der einzelnen Kriterien haben sich bei dieser Kürzung nicht verändert. Die modifizierten Bewertungsmatrizen für die drei Technologien sind in Tabelle 47 dargestellt.

Aufgrund der Qualität und globalen Verfügbarkeit der Daten hat sich die Nutzung von Umweltkriterien, wie Wasserknappheit, Frischwasserqualität, Nährstoff- bzw. Dünger-Verfügbarkeit, Eutrophierung, Bevölkerungsdichte und Urbanisierungsraten als zielführend erwiesen. Die Quellenangabe zum jeweiligen Kriterium kann ebenfalls in Tabelle 1 nachvollzogen werden. Kriterien, die auf legislativen Regelungen basieren, wie gesetzliche Bestim-

mungen für Abwasserbehandlungstechnologien, direkte staatliche Förderungen für Behandlungsanlagen, indirekte Anreize für ein Grauwasserbehandlungssystem, Energiepreis, Trinkwasserpreis, Abwasserpreis, etc. konnten im globalen Maßstab nicht gebildet werden. Gleiches gilt für Investitionskosten (Behandlungsanlage, Leitungssystem), Betriebskosten (Wartung, Ersatzteile), Grundstückspreise, sowie Anzahl der Personen im Gebäude und Akzeptanz bezüglich der Wiederverwendung, etc. Hier muss für jedes Projekt im Detail entschieden werden, da es sich nicht um Daten handelt, die verallgemeinert werden können.

**Tabelle 47: Bewertungsmatrix der Nutzwertanalysen Grauwasser, Braunwasser und MAP-Fällung zur Identifikation der Hotspots. In der jeweils zweiten Zeile finden sich die Quellenangaben. „Nicht berücksichtigt“ bedeutet, dass dieses Kriterium für die jeweilige Anlage keine Relevanz hat.**

Dimensionen und Kriterien	Gewichtungen		
	Grauwasser-MBR	Braunwasser-MBR	MAP-Fällung
<b>Umweltkriterien gesamt</b>	<b>21%</b>	<b>25%</b>	<b>30%</b>
<b>Eutrophierung</b>	nicht berücksichtigt		6
<i>Quelle</i>	-		<i>(Selman et al., 2008)</i>
<b>Wasserknappheit</b>	12	12	2
<i>Quelle</i>	<i>Physical water scarcity index (UNESCO, 2009)</i>		
<b>Frischwasserqualität</b>	5	5	nicht berücksichtigt
<i>Quelle</i>	<i>Fresh water quality index (Emerson et al., 2010)</i>		-
<b>Nährstoffbedarf</b>	nicht berücksichtigt	4	nicht berücksichtigt
<i>Quelle</i>	-	<i>Weltweiter Düngemittelbedarf (FAO, 2010)</i>	-
<b>Import von Phosphor</b>	nicht berücksichtigt		16
<i>Quelle</i>	-		<i>(FAOSTAT, 2012)</i>
<b>Besiedlungsdichte</b>	2	2	3
<i>Quelle</i>	<i>(Müller, 2000)</i>		
<b>Urbanisationsrate</b>	2	2	3
<i>Quelle</i>	<i>(UN, 2010)</i>		

Um die Ergebnisse der verschiedenen Technologien vergleichbar zu machen, ist die Einführung relativer Werte nötig. Hierzu wurde für die Nutzwerte jeder Technologie eine Transformation der „Umweltkriterien gesamt“ auf einen 100 Punkte-Maßstab vorgenommen. Weiterhin ist zu bemerken, dass bei dieser Form der Analyse verschiedene Aspekte aufgrund nicht

verfügbarer Daten wie z.B. der MgO Preis als wichtiges Erfolgskriterium für die MAP-Fällung (vgl. Etter et al., 2011) nicht berücksichtigt werden konnten.

### 3.8.3 Ergebnisse und Diskussionen

#### 3.8.3.1 Nutzwertanalyse

Zur Darstellung der Nutzwertanalyse wird die Zusammenfassung der einzelnen Hauptkriterien in einer Bewertungsmatrix gewählt (vgl. MAP-Fällung in Tabelle 48 und die beiden MBRs in Tabelle 49).

Die grobe Aufteilung der Bewertungsmatrix zur Nutzwertanalyse der MAP-Fällung (vgl. Tabelle 48) entspricht den in Kapitel 3.8.2.1 genannten Hauptkriterien (vgl. Hellström et al., 2000). Unterkriterien, die einer Herleitung bedürfen, werden im Folgenden erläutert:

**G2 Sichere Beseitigung des Ablaufs:** Bei der MAP Produktion findet durch die Zugabe von Magnesiumoxid (MgO) ein Fällungsprozess statt, bei dem das im Urin vorhandene Phosphor mit dem zugeführten MgO eine chemische Verbindung eingeht und MAP ausfällt. Bei diesem Prozess fallen neben MAP auch große Volumina an stark stickstoffhaltigem Ablauf an (540 bis 1080 mg N/l, Verweis 3.3.3.3), der weiterer Behandlung bedarf, bevor er in die Umgebung abgeführt wird. Eine sichere Beseitigung des Ablaufs wird am höchsten bewertet.

**F7 Betriebskosten Chemikalien (Betriebsmittel):** Zur Herstellung von MAP wird MgO als Fällungsmittel benötigt. Da diese Chemikalie unbedingt für den Betrieb notwendig ist, sind die Kosten vor Ort entscheidend. Niedrige Kosten werden in der Bewertungsskala am höchsten gewichtet.

**T3/T4 Vergleich zu anderen Behandlungsverfahren:** In dieser Nutzwertanalyse werden zwei mögliche Alternativen für die MAP-Fällung im Hinblick auf eine Nährstoffnutzung des Phosphors mit einbezogen. Bei der ersten Option (T3) handelt es sich um eine Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm eines konventionellen Klärwerkes. Bei der zweiten Option (T4) wird Urin direkt als Flüssigdünger ausgebracht und so der Phosphor genutzt. Ist eine alternative Rückgewinnung des Phosphors oder eine direkte Urinnutzung möglich, dann wird mit 0 Punkten bewertet.

**U1 Eutrophierungserscheinungen im Anwendungsgebiet:** Die übermäßige Nährstoffzufuhr (hier: Stickstoff und Phosphor) aus kommunalem Abwasser führt zu negativen Umweltauswirkungen. In erster Linie sind diese Auswirkungen anhand von Eutrophierungserscheinungen zu verzeichnen. Eine getrennte Erfassung des Urins kann diese Nährstoffzufuhr senken und so dazu beitragen, Eutrophierungserscheinungen zu vermindern. Sind starke Eutrophierungserscheinungen im Anwendungsgebiet zu verzeichnen, wird die höchste Bewertung vergeben.

**U2 Import von Phosphor:** Dieser Indikator bildet zum einen die Nachfrage eines Standortes nach Phosphordünger ab. Zum anderen gibt er Aufschlüsse über die natürlichen Vorkommen vor Ort. In diesem Fall rechtfertigen umfassende Importe von Phosphor also eine MAP-Fällung, was durch eine hohe Bewertung mit in die Berechnung einbezogen wird.

**S1/S2 Akzeptanz der Verbraucher bezüglich der Anwendung von Sanitärkonzepten mit Urintrennung bzw. der Düngung mittels MAP:** Erste Ergebnisse von Akzeptanzstudien, die

im Rahmen des SANIRESCH-Projektes durchgeführt wurden, haben die Relevanz dieser Aspekte im Bezug auf den nachhaltigen Betrieb des neuartigen Sanitärkonzeptes gezeigt. Je geringer die Akzeptanz dabei ausfällt, desto unwahrscheinlicher ein/e erfolgreicher Betrieb/Nutzung.

**Tabelle 48: Bewertungsmatrix der Nutzwertanalyse MAP-Fällung (Peng, 2012). Zur Erläuterung des Tabellenaufbaus (siehe Kapitel 3.8.2.1).**

	<b>Dimensionen und Kriterien</b> (Spalte A)	<b>Gewichtung</b> $\Sigma = 100\%$ (Spalte B)	<b>Bewertungsskala</b> (Spalte C)	<b>Nutzwert</b> (Spalte D)
<b>G</b>	<b>Gesundheit und Hygiene</b>	<b>10%</b>		
G1	Risiko durch Pathogene und Spurenschadstoffe	1	Hoch =1, Mittel =5, Niedrig =10, nicht berücksichtigt =0	
G2	Sichere Beseitigung des Ablaufs	3	Sicher = 10, Mittel = 5, Unsicher = 1, 0 = nicht berücksichtigt	
G3	Gesetzliche Bestimmung zur Abwasserbehandlung	3	Stark geregelt =10, Mittel geregelt =5, Wenig geregelt =1, Keine Bestimmungen =0	
G4	Gesetzliche Bestimmung zur MAP-Nutzung	3		
<b>F</b>	<b>Wirtschaftliche Kriterien</b>	<b>30%</b>		
F1	Investitionskosten Abwasseranlage	3	Hoch =1, Mittel =5, Niedrig =10, nicht berücksichtigt =0	Wird im Kontext der individuellen Analysen berechnet.
F2	Investitionskosten Leitungssystem	3		
F3	Investitionskosten Grundbesitz	1		
F4	Betriebskosten Energie	3		
F5	Betriebskosten Personal	3		
F6	Betriebskosten Wartung	2		
F7	Betriebskosten Chemikalien (Betriebsmittel)	6		
F8	Betriebskosten Transport	1		
F9	Gewinn durch Wiederverwendung der Ressourcen	4	Hoch =10, Mittel =5, Niedrig =1, nicht berücksichtigt =0	
F10	Direkte staatliche Finanzierung der Anlage	4		
<b>T</b>	<b>Technologie und Betrieb</b>	<b>20%</b>		
T1	Stabilität des Betriebs	4	Hoch =10, Mittel =5, Niedrig =1, nicht berücksichtigt =0	
T2	Ausbildungsbedarf	4		
T3	Vergleich zu anderen Behandlungsverfahren: Rückgewinnung von Phosphor durch Kläranlage	6	Möglich =0, nicht möglich =10	
T4	Vergleich zu anderen Behandlungsverfahren: Lagerung und Ausbringung von Urin	6		
<b>U</b>	<b>Umweltkriterien<sup>8</sup></b>	<b>30%</b>		
U1	Eutrophierungerscheinungen im Anwendungsgebiet	6	Hoch =10, Mittel =5, Niedrig =1, nicht berücksichtigt =0	
U2	Import von Phosphor	16		
U3	Wasserknappheit	2		
U4	Besiedlungsdichte	3		
U5	Urbanisierungsrate	3		
<b>S</b>	<b>Soziokulturelle Kriterien</b>	<b>10%</b>		
S1	Akzeptanz der Verbraucher bezüglich der Anwendung von Sanitärkonzepten mit Urinentrennung	4	Hoch =10, Mittel =5, Niedrig =1, nicht berücksichtigt =0	
S2	Akzeptanz der Verbraucher bezüglich der Düngung mittels MAP	4		
S3	Pioniergeist	2		

<sup>8</sup> Bei den Hotspotanalysen wurde jeweils auf eine Auswahl der Umweltkriterien zurückgegriffen (vgl. 3.8.2.2).

Die Bewertungsmatrizen zur Nutzwertanalyse der MBRs sind ebenfalls auf Basis der in Kapitel 3.8.2.1 erwähnten Hauptkriterien nach Hellström et al. (2000) entstanden. Die Unterkriterien unterscheiden sich jedoch im Vergleich zu der Nutzwertanalyse der MAP-Fällung bedingt durch grundlegende Verfahrensunterschiede.

Da ein Großteil der beiden Bewertungsmatrizen für die MBRs einschließlich der Gewichtungen analog aufgebaut ist, werden im folgenden Abschnitt nur wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Nutzwertanalysen für die Grau- und Braunwasserbehandlung herausgearbeitet (Grauwasser: GW; Braunwasser BW; vgl. Tabelle 49):

**U4 Anschluss an Kanalisation** (GW: 2%; BW: 8%): Die höhere Gewichtung für Braunwasser lässt sich dadurch erklären, dass Braunwasser im Gegensatz zu Grauwasser aufgrund zu hoher Belastungen mit pathogenen Keimen und organischen Verunreinigungen nicht versickert werden kann. Braunwasser muss geklärt werden.

**U7 Nährstoffbedarf** (GW: nicht berücksichtigt; BW: 4%): Braunwasser hat grundsätzlich einen höheren Nährstoffgehalt als Grauwasser. Eine Wiedernutzung nicht nur des Wassers, sondern auch der Nährstoffe bietet sich daher beim Braunwasser eher an als beim Grauwasser, weshalb letzteres hier nicht weiter betrachtet wird. Als maßgeblichen Faktor für die Gewichtung einer solchen Nährstoffrückgewinnung kann der Nährstoffbedarf der Umgebung gewertet werden.

**U8 Akkumulation des Rohwassers** (GW: 10%; BW: 0%): Die Gewichtung unterscheidet sich hier sehr deutlich aufgrund der Tatsache, dass bei GW je nach Gebäudetyp sehr unterschiedliche Volumina anfallen (Hotel vs. Bürogebäude). Bei BW ist diese eher als konstant zu bewerten (Löw, 2011; Wu, 2011).

**S4 Akzeptanz bzgl. der Nutzung der menschlichen Exkreme als Dünger** (GW: nicht berücksichtigt; BW: 4%): Anhand dieses Kriteriums wird bewertet, wie hoch die Akzeptanz für eine Nutzung der menschlichen Exkreme als Dünger in der Landwirtschaft ist. Analog zu dem Aspekt „Nährstoffbedarf“ beschränkt sich diese Betrachtung ebenfalls nur auf die Bewertungsmatrix des Braunwassers.

**Tabelle 49: Bewertungsmatrizen der Nutzwertanalyse für Grau- und Braunwasserbehandlung (GW, bzw. BW Behandlung) in MBRs (Löw, 2011 und Wu, 2011). Zur Erläuterung des Tabellenaufbaus vgl. Kapitel 3.8.2.1.**

Dimensionen und Kriterien		Gewichtung $\Sigma = 100\%$		Bewertungsskala
		GW	BW	
<b>G</b>	<b>Gesundheit und Hygiene</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	
G1	Qualität des Permeats	0	0	Nicht berücksichtigt
G2	Gesetzl. Bestimmungen für Abwasserbehandlungstechnologien, Qualitätsrichtlinien	6	6	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k. A. = 0
G3	Stabilität der Permeatqualität	0	0	Nicht berücksichtigt
<b>F</b>	<b>Finanzielle Kriterien</b>	<b>39</b>	<b>38</b>	
F1	Direkte staatliche Finanzierung der Anlage	4	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k. A. = 0
F2	Indirekte Anreize für eine Abwasserbehandlung	4	4	
F3	Investitionskosten (Anlage, Leitungssysteme)	4	4	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10
F4	Betriebskosten (Wartung/Unterhalt)	5	4	
F5	Strompreis Betriebskosten Energie	5	5	
F6	Frischwasserpreis	7	7	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1
F7	Abwasserpreis	7	7	
F8	Grundstückpreis Investitionskosten Grundbesitz	3	3	
<b>T</b>	<b>Technologie</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	
T1	Jährliche Wartung	0	0	Nicht berücksichtigt
T2	Stabilität des Betriebs	0	0	
T3	Ausfälle	0	0	
<b>U</b>	<b>Umweltkriterien<sup>9</sup></b>	<b>41</b>	<b>41</b>	
U1	Wasserknappheit	12	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1
U2	Frischwasserqualität	5	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10
U3	Anzahl der Personen im Gebäude	8	8	Groß (>100 Pers.) = 10, Mittel (10-100 Pers.) = 5, Klein (< 10 Pers.) = 1
U4	Anschluss an Kanalisation	2	8	Vorhanden = 0, n.V. = 10
U5	Besiedlungsdichte	2	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1
U6	Urbanisierungsrate	2	2	
U7	Nährstoffbedarf	0	4	
U8	Wasseranfall	10	0	Hoch (mit Übernachtung) = 10, Mittel (tagesbetrieb & Duschen) = 5, Niedrig (Tagesbetrieb) = 1
<b>S</b>	<b>Soziokulturelle Kriterien</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	
S1	Akzeptanz bzgl. der Wiederverwertung des gereinigten Abwassers	5	4	Hoch (alles) = 10, Mittel = 5 Niedrig (nur Toilettenspülung) = 1
S2	Ökologisches Bewusstsein	5	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0
S3	Pioniergeist	4	3	Ja = 10, Nein = 0
S4	Akzeptanz bzgl. der Nutzung menschlicher Exkremente als Dünger	0	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1

### 3.8.3.1.1 Hotspots

Die Ergebnisse der Hotspotanalysen werden auf Weltkarten visualisiert. Als globale Hotspots für die drei Anlagen können die in Graustufen dargestellten Regionen in Abbildung 113, Abbildung 114 und Abbildung 115 identifiziert werden. In diesen Regionen sind die mithilfe der

<sup>9</sup> Bei den Hotspotanalysen wurde jeweils auf eine Auswahl der Umweltkriterien zurückgegriffen (vgl. 3.8.2.2).

messbaren Parameter (vgl. Kapitel 3.8.2.2) identifizierten Voraussetzungen für die Implementierung der jeweiligen Verfahren am besten.

Bei der Hotspot-Analyse zur MAP-Fällung (Abbildung 113) werden, im Gegensatz zu den später aufgeführten Hotspot-Analysen zur GW- und BW- Behandlung (Abbildung 114 und Abbildung 115), Ergebnisse in Form von ganzen Ländern dargestellt. Aufgrund der maximalen räumlichen Auflösung der zur Verfügung stehenden Daten, kann eine regionale Ebene nicht abgebildet werden.



**Abbildung 113:** Globale Hotspots, an denen sich eine Nutzung der MAP-Fällung anbietet (nach Peng, 2012). Je dunkler die Schattierung, desto größer ist der Nutzwert.

In der Spitzengruppe mit dem höchsten Nutzwert sind Indien und Mexiko (beide 85 Punkte). Diese Länder weisen ausnahmslos große Bevölkerungszahlen mit entsprechend hohem Bedarf an Nahrungsmitteln auf. Es wird dort aus diesem Grund intensive Landwirtschaft betrieben, was umfassende Phosphorimporte bedingt, da in den jeweiligen Ländern keine nennenswerten Vorkommen vorhanden sind.

In der nachfolgenden Gruppe sind die Länder Vietnam (78 Punkte), Brasilien (78 Punkte), Bangladesch (77 Punkte) und Thailand (73 Punkte) vertreten. Hier können, mit kleinen Ausnahmen, vergleichbare Rahmenbedingungen wie bei der Spitzengruppe aufgezählt werden. Die geringere Gesamtbewertung ist dabei dadurch zu erklären, dass einige Unterkriterien als „mittel“ eingestuft werden. Die restlichen Kriterien sind wie in der Spitzengruppe mit „hoch“ bewertet.

Bei weiterer Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die Länder des afrikanischen Kontinents weitgehend niedrige Nutzwerte aufweisen und nicht als Länder mit einem hohen potentiellen Bedarf auffallen. Dies kann durch den hohen Anteil an Subsistenzwirtschaft mit geringem Düngeverbrauch und den geringen Anteil industrieller Landwirtschaft erklärt wer-

den. Mineralische Dünger sind hier oft nicht erschwinglich, wenn sie nicht subventioniert sind, und Kreislaufführung von Nährstoffen ist hier eine gute alternative (Gensch et al., 2012; Clemens et al., 2012).

Auf der anderen Seite fällt auf, dass gerade Schwellenländer wie Indien, Brasilien oder Thailand mit großen Bevölkerungszahlen und hohem Bedarf an Nahrungsmitteln besonders hohe Nutzwerte erbringen. In diesen Ländern bzw. Regionen erscheint somit eine Anwendung als sinnvoll.

Die Ergebnisse der Grau- und Braunwasserübertragbarkeit unterscheiden sich nur geringfügig und in beiden Fällen sind die Länder mit den höchsten Punktzahlen unter Wasserknappheit und Wasserqualitätsproblemen leidende Länder der MENA (Middle East and North Africa) Region wie Jordanien (100 Punkte GW; 92 Punkte BW), Ägypten (83 Punkte GW; 86 Punkte BW), Libyen (83 Punkte GW; 86 Punkte BW), Oman (88 Punkte GW; 82 Punkte BW) oder Israel (60 Punkte GW; 82 Punkte BW). Parallel stellten sich hohe Werte für eine Übertragbarkeit für Usbekistan (91 Punkte GW; 92 Punkte BW) und Teile Südost-Australiens (80 Punkte GW; 83 Punkte BW) ein (Abbildung 114 und Abbildung 115, schwarze Flächen). Außerdem, wenn auch mit geringerer Wertung (dunkelgrau bis hellgrau getönt), können Regionen an den Westküsten Nord- und Südamerikas (45 – 70 Punkte GW; 54 – 62 Punkte BW), Teile Zentralasiens (46 Punkte GW; 39 – 58 Punkte BW) und Indiens (37 Punkte GW; 51 Punkte BW) sowie Teile des südlichen Afrikas (40 Punkte GW; 54 – 58 Punkte BW) als Hotspots identifiziert werden.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass der Einfluss des beim Braunwasser mitbetrachteten Unterkriteriums Nährstoffbedarf im Bezug auf die Verteilung der Hotspots vernachlässigt werden kann. Dies war auch nahezu zu erwarten, da dieses Unterkriterium mit nur 4 Punkten in die Gesamtbewertung eingeht. Trotzdem verschiebt sich dadurch der Trend etwas. So finden u.a. Mosambik und Namibia (jeweils 58 Punkte) plötzlich Eingang in die Klasse von 55-70 Punkten aufgrund ihres jeweils als sehr hoch eingestuftem Nährstoffbedarfs.



**Abbildung 114:** Globale Hotspots, an denen sich eine Nutzung der Grauwasserbehandlung mittels MBR-Verfahren anbietet (Löw, 2011). Je dunkler die Schattierung, desto größer ist der Nutzwert.



**Abbildung 115:** Globale Hotspots, an denen sich eine Nutzung der Braunwasserbehandlung mittels MBR-Verfahren anbietet (Wu, 2011). Je dunkler die Schattierung, desto größer ist der Nutzwert.

Die Kombination der Ergebnisse der drei Hotspotanalysen zeigt, dass lediglich in neun der insgesamt 58 betrachteten Länder eine Anwendung aller drei Technologien wie innerhalb des SANIRESCH-Projekts auf Grundlage der hier durchgeführten Analyse sinnvoll erscheint (vgl. Abbildung 116). Die identifizierten Länder sehen sich alle mit physikalischer Wasserknappheit einerseits und einem durch intensive Landwirtschaft bedingten hohen Nährstoff-

bedarfs, der nicht durch eigene Phosphorressourcen gedeckt werden kann, andererseits konfrontiert. Es handelt sich hierbei um Australien (227 Punkte), Mexiko (201 Punkte), China (191 Punkte), Pakistan 184 Punkte), Türkei (172 Punkte), Indien (172 Punkte), Iran (164 Punkte), Peru (148 Punkte) und Spanien (126 Punkte) (siehe Abbildung 116).

Ein interessanter Fall ist China. Dieses Land erreichte für die MAP-Fällung allein nur 51 Punkte mögliche Punkte und lag im unteren Mittelfeld. Auch bei der Übertragbarkeit der MBR-Technologie fand es sich nur jeweils auf Ranking Platz 14 wieder. Bei der Gesamtbeurteilung jedoch rückt es an die dritte Stelle, da es insgesamt eine gleichmäßig gute Performance für alle drei Technologien zeigt.



**Abbildung 116:** Kombinierte Darstellung der Hotspots aller drei Technologien. In diesen Regionen könnte eine Implementierung des Gesamtkonzepts interessant sein.

Ist eine Anwendung von zwei Technologien an einem Standort sinnvoll, so sind das überwiegend Länder innerhalb der MENA Region. Zudem fällt auf, sofern ein Land für zwei Technologien als Hotspot identifiziert wurde, handelt es sich immer um die Kombination von Grau- und Braunwasser. Dieses Ergebnis lässt sich dadurch erklären, dass diese beiden Technologien identische Kriterien bis auf den analysierten Nährstoffbedarf und somit einen ähnlichen Zielkorridor haben.

Um nun aus dem ermittelten, potentiellen Bedarf an den betrachteten Technologien eine tatsächliche Nachfrage zu generieren, bedarf es weiterer Schritte. Insbesondere die Rahmenbedingungen für eine Einführung sind zu schaffen. Es wurde daher eine Reihe relevanter Einflusskriterien herausgearbeitet.

Folgende Aspekte können potenziell eine Entscheidung zugunsten von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung wie der MAP-Fällung beeinflussen:

- Durch hohen Bedarf an Phosphor, gleichzeitig geringe oder nicht vorhandene Ressourcen und die „Peak Phosphorus“ Thematik (vgl. Gilbert, 2009) kann eine Wiedernutzung des Phosphors von steigender, nach Meinung einiger Wissenschaftler von sogar strategischer Bedeutung sein (van Kauwenbergh in Gilbert, 2009).
- Von Verwaltungsseite kann es förderlich sein, steuerliche Anreize für Investoren und / oder Betreiber von Anlagen zur Nährstoffrückgewinnung zu schaffen.
- Die Betrachtung technischer Aspekte zeigt, dass eine Sicherstellung dauerhafter Energieversorgung und ein benutzerfreundliches Design auf der einen und ausreichend geschultes Betriebs- und Wartungspersonals auf der anderen Seite förderlich sein können.
- Aus soziokultureller Perspektive ergeben sich Möglichkeiten durch umfassende Sensibilisierungsprogramme mit einem stärkeren Fokus auf ressourcenschonendes Wirtschaften. Gute Multiplikatoreffekte lassen sich z.B. in Zusammenarbeit mit Schulen erreichen (Abraham et al., 2012).

Die Wasseraufbereitung und Wiedernutzung durch die beiden MBR-Verfahren kann durch folgende Rahmenbedingungen beeinflusst werden:

- Von Verwaltungsseite kann es förderlich sein, steuerliche Anreize für Investoren und / oder Betreiber von Anlagen zur Wasserwiedernutzung zu schaffen.
- Eine ökonomische Blickrichtung verdeutlicht, dass eine systematische Kostenvergleichsrechnung zwischen einer MBR-Behandlungsanlage und einem konventionellen System zur Abwasserreinigung unter Einbeziehung der Frisch- und Abwasserkosten besonders in unter Wasserknappheit leidenden und infrastrukturell nicht erschlossenen Gebieten eine Entscheidung zugunsten von Wasserwiedernutzung durch MBR Behandlung beeinflussen kann.
- Die Betrachtung technischer Aspekte zeigt, dass eine Sicherstellung dauerhafter Energieversorgung und ein benutzerfreundliches Design auf der einen und ausreichend geschultes Betriebs- und Wartungspersonals auf der anderen Seite förderlich sein kann.
- Aus soziokultureller Perspektive ergeben sich Möglichkeiten durch umfassende Sensibilisierungsprogramme unter anderem in Zusammenarbeit mit Schulen und religiösen Einrichtungen, positive Effekte zu generieren.

### 3.8.4 Fazit

Sowohl die Entwicklung der Bewertungsmatrizen (vgl. Kapitel 3.8.3.1) als auch die Identifikation der Hotspots (Kapitel 3.8.3.1.1) haben ein klares Bild der internationalen Übertragbarkeit erzeugt. So wurde mit der Entwicklung der Bewertungsmatrizen ein Werkzeug zur Entscheidungsfindung erstellt, das nach entsprechenden Anpassungen für verschiedene Formen von Nährstoffrückgewinnungs- bzw. neuartigen Abwasserbehandlungstechnologien genutzt werden kann.

Durch die anschließend vorgestellte Hotspotanalyse können nicht nur Regionen identifiziert werden, in denen ein Bedarf für solche Anwendungen bereits heute vorhanden ist. Vielmehr kann unter Berücksichtigung zukünftiger Trends, die Notwendigkeit zur Nutzung von Verfahren zur Nährstoffrückgewinnung und Wasserwiedernutzung weiter verdeutlicht und zukünftige Entwicklungen in eine derartige Richtung möglicherweise angestoßen und unterstützt werden. Zukünftige Trends mit Relevanz im Bereich Nährstoffrückgewinnung und Wasserwiedernutzung sind:

- Eine Zunahme des globalen Klimawandels und somit einer regionalen Verstärkung von Wasserknappheit.
- Eine zunehmende Bevölkerungszahl und somit zunehmender Wasserverbrauch auf der einen Seite und steigender Nährstoffbedarf auf der anderen Seite.
- Zunehmende Urbanisierung und somit auch Erhöhung der innerstädtischen Bebauungsdichte und der sich dadurch bedingenden Nachfrage nach möglichst raumeffizienten Technologien der Abwasserbehandlung.

Die Methode der Nutzwertanalyse ist gut geeignet, um globale Hotspots zu identifizieren. Dies sind zum einen bevölkerungsreiche Schwellenländer wie z.B. Indien, Brasilien oder Thailand. Zum anderen zählen dazu unter Wasserknappheit und Wasserqualitätsproblemen leidende Länder der MENA Region (z.B. Jordanien, Usbekistan, Ägypten, Libyen, Oman oder Israel) und Teile Südost-Australiens. Gleichzeitig muss aber erwähnt werden, dass es sich bei derartigen Betrachtungen um globale Abschätzungen mit grober räumlicher Auflösung handelt und zur konkreten Planung eines Projektes Einzelfalluntersuchungen unerlässlich sind. Des Weiteren sei darauf verwiesen, dass die durch räumliche Kriterien identifizierten Hotspots nicht zwangsweise mit ökonomischen, sowie soziokulturellen Aspekten übereinstimmen. Die hier identifizierten Hotspots sind somit als erste Anhaltspunkte zu verstehen.

## 4. Danksagung

Wir möchten uns an dieser Stelle zu erste für die Förderung des Forschungsprojekts SANIRESCH (SANitär-Recycling-ESCHborn) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung bedanken. Ohne diese Förderung hatten wir SANIRESCH nie durchführen können. Unser besonderer Dank gilt Herrn Dr. Rudek und Frau Berggötz-Karich vom Projektträger in Karlsruhe vom Karlsruher Institut für Technologie, die uns über den kompletten Projektverlauf jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Auch möchten wir uns sehr herzlich bei Herrn Dr. Löwe und Frau Höckele bedanken, die uns insbesondere zum Projektende bei der Durchführung der Abschlusstagung gemeinsam mit der DWA sehr unterstützten.

Unser Dank gilt hier auch dem DWA-Fachausschuss Neuartige Sanitärsysteme (NASS) der durch sein Interesse und durch Treffen des Fachausschusses vor Ort das Projekt ein gutes Stück begleitete. Es freut uns sehr, dass diese Begleitung in einer gemeinsamen Tagung, den NASS-Tagen, mündete. Unser Dank gilt hier der DWA, insbesondere Herrn Heidebrecht, Frau Sundermeyer-Kirstein und Frau Heimann, die diese Tagung so in ihrer Durchführung mit uns trugen und Prof. Jörg Londong und Jürgen Stäudel sowie den Mitgliedern des Fachausschusses und der AG 1.7 Öffentlichkeitsarbeit für die inhaltliche Ausgestaltung der Tagung.

Die Roediger Vacuum GmbH bedankt sich bei allen Projektpartnern und Projektbeteiligten sowie dem mitwirkenden Studenten Davut Orak für die gute Zusammenarbeit und das Gelingen des Projektes.

Die HUBER SE bedankt sich bei allen Projektpartnern und den mitwirkenden Studenten für die gute Zusammenarbeit. Weiterhin möchten wir uns bei unseren Projektpartner der Technischen Hochschule Mittelhessen und dort im Speziellen bei Johanna Heynemann für die Unterstützung bedanken.

Die Technische Hochschule Mittelhessen bedankt sich bei allen Projektpartnern und den mitwirkenden Studenten Matthias Hartmann und Franziska Nun für die gute Zusammenarbeit.

Das Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen bedankt sich bei allen Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit. Das Institut für Soziologie der RWTH Aachen bedankt sich bei allen Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit sowie bei den Mitarbeitern der Haustechnik der GIZ in Eschborn und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Reinigungsfirma für deren Bereitschaft, an den Gesprächen und Diskussionen teilzunehmen. Nicht zuletzt ist den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Hauses 1 der GIZ für ihre Mitwirkung an den drei Befragungsrunden sowie für zusätzliche Hinweise und Anregungen zu danken.

Das Institut für Pflanzenernährung und Ressourcenschutz bedankt sich bei allen Projektpartnern und Mitwirkenden. Besonderer Dank gilt Michael Griesen, Helmut Rehkopf, Maria Arias

Escobar und Judith Schmidt. Außerdem bedankt sich die Universität Bonn bei den Landwirten und Verbrauchern, die an der Befragung teilgenommen haben. Wir bedanken uns außerdem bei dem Labor der TUHH für die Analyse der pharmakologischen Wirkstoffe.

Als GIZ möchten wir uns sehr herzlich bei allen Kollegen im Unternehmen, die zum Erfolg dieses Projekts beigetragen haben bedanken. Hier sind besonders zu nennen Wolfgang Vitt und Johannes Fuchs von der Haustechnik, ohne deren Unterstützung und Bereitschaft uns jederzeit mit Rat und Tat zur Seite zu stehen, der Anlageneinbau, Betrieb und auch der Ausbau nie so reibungslos verlaufen wären. Auch danken wir Herrn Detlef Kröll sehr herzlich, dass er seinen Mitarbeiter innerhalb ihrer Arbeitszeit dafür freistellte. Darüberhinaus bedanken wir uns bei allen Reinigungskräften der Firma Jacobi, den wechselnden Vorarbeitern und Vorarbeiterinnen und bei Frau Temor für die Bereitschaft uns zu unterstützen, Reinigungsvorgänge mit uns zu diskutieren und neue Möglichkeiten zu erproben. Auch danken wir den Pförtnern von Haus 1, die uns oft halfen, die Logistik des Projekts so unbürokratisch als möglich zu gestalten und die Sicherheit der mit Anlagenraum tätigen Projektpartner durch Rückrufkontrollen absicherten. Unser Dank gilt auch dem Bereich 5 der GIZ, namentlich Herrn Baum und Herrn Schlapp sowie dem FIT-Team des Bereichs 4 und Herrn Schoppa. Ohne Ihre kompetente Hilfe und Unterstützung im Bereich Finanzen hätten wir sicherlich große Probleme mit der Abwicklung der finanziellen Seite bekommen. Auch bedanken möchten wir uns beim gesamten Team des Sektorvorhabens für die ständige Unterstützung und Motivation. Unser besonderer Dank gilt hier der ehemaligen Leiterin des SVs Elisabeth von Münch sowie den GIZ-SANIRESCH-Praktikanten Christoph Stein, Matthias Hartmann, Katharina Löw, Amel Saadoun, Fanny Kilian und Tobias Ochs. Zu guter Letzt und doch am allerwichtigsten möchten wir uns bei allen Kollegen in Haus 1 bedanken, die ihr Büro im Bereich der NoMix-Toilettenanlagen hatten oder diese während Terminen etc. im öffentlichen Bereich des Gebäudes nutzen. Ihre Bereitschaft sich auf dies einzulassen war Basis aller unserer weiteren Bemühungen.

Zum Thema der Wirtschaftlichkeit danken wir Andrés Lazo Paéz, Christina Braum und Lisa-Marie Bischer, die innerhalb ihrer Master- bzw. Bachelorarbeit zu diesem Thema mitgewirkt haben. Außerdem möchten wir uns bei der TUHH, der Universität Gießen und der TU Darmstadt, namentlich Alexandra Drewko, Prof. Ralf Otterpohl, PD Rolf-Alexander Düring sowie Sebastian Petzet und Prof. Peter Cornel, für die Betreuung der Studenten bedanken.

Wir danken Katharina Löw, Yue Wu, Jingjing Peng, Sriya Mohanti und Josep de Trincheria, die innerhalb ihrer Masterarbeiten zur internationalen Übertragbarkeit gearbeitet und Ideen mit entwickelt haben. Ebenso möchten wir uns bei den Betreuerinnen und Betreuern, namentlich Prof. Helmuth Hohnecker, Sebastian Petzet, Prof. Peter Cornel und Prof. Ralf Otterpohl für ihre Unterstützung bedanken. Weiterhin möchten wir uns bei unseren Projektpartnern der Firma HUBER SE und dort im Speziellen bei Celine Schlapp und Martin Feicht und bei der Technischen Hochschule Mittelhessen, dort besonders bei Johanna Heynemann für die Datenzulieferung und Diskussion in der Entwicklung dieser Arbeit bedanken.

Zu guter Letzt möchten wir uns bei allen bedanken, die Interesse an diesem Projekt gezeigt haben und es in irgendeiner Weise unterstützt haben. Sei es, dass Sie uns zu Vorträgen und Publikationen zum Projekt einluden oder diese vornahmen. Sei es, dass Sie mit einer Besucher- oder Studentengruppe nach Eschborn kamen und sich über die Fortschritte informierten und mit uns diskutierten. Dieses Interesse der internationalen Öffentlichkeit gab uns die Sicherheit und das Wissen, dass wir mit dieser Erprobung eines neuartigen Sanitärkonzepts auf dem richtigen Weg in die Zukunft sind. Es motivierte uns, weiterzumachen, noch besser zu werden und weitere Perspektiven und Ideen zu erproben. Danke für dieses entgegengebrachte Interesse!

## 5. Literaturverzeichnis

### 5.1 Literatur zu Kapitel 2

- Arnold, Ute; Gresens, Frank (2009): Closing nutrient cycles in decentralised water treatment systems in the Mekong Delta. SANSED-Project, Abschlussbericht, Universität Bonn, Bonn, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1154> (29.11.2012).
- Beresford, Nicola; Routledge Edwin; Harris, Catherine; Sumpter, John (2000): Issues arising when interpreting results from an in vitro assay for estrogenic activity. *Toxicology and Applied Pharmacology* 162(1), pp. 22-33.
- BLAC (2003): BLAC-AG zur Auswertung der Ergebnisse des Untersuchungsprogramms „Arzneimittel in der Umwelt“ - Auswertung der Untersuchungsergebnisse, Bericht an die 61. Umweltministerkonferenz (UMK) am 19./20. November 2003 in Hamburg, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Gesundheit, Institut für Hygiene und Umwelt, im Auftrag des Bund/Länderausschusses für Chemikaliensicherheit (BLAC), Hamburg, Deutschland.
- Bürg, Oliver; Kronburger, Katrin; Mandl, Heinz (2004): Implementation von E-Learning in Unternehmen – Akzeptanzsicherung als zentrale Herausforderung. Forschungsbericht 170, Institut für Pädagogische Psychologie, Ludwig-Maximilians-Universität, München, Deutschland. URL: [http://epub.ub.uni-muenchen.de/444/1/FB\\_170.pdf](http://epub.ub.uni-muenchen.de/444/1/FB_170.pdf) (12.12.2012).
- Butzen, Andrea; Werres, Friedrich; Balsaa, Peter (2005): Aufbau und Einsatz einer problemorientierten Analytik mit dem Ziel eines Monitorings ausgewählter Pharmaka in Böden und Urin. In: Nährstofftrennung und -verwertung in der Abwassertechnik am Beispiel der „Lambertsmühle“, Bonner Agrikulturchemische Reihe 21, Verein zur Förderung der Agrikulturchemie e.V., Bonn, Deutschland. URL: [http://www.ipe.uni-bonn.de/publikationen/bonner-agrikulturchemische-reihe/bar\\_21.pdf](http://www.ipe.uni-bonn.de/publikationen/bonner-agrikulturchemische-reihe/bar_21.pdf) (24.01.2013).
- Daughton, Christian; Temes, Thomas (1999): Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives* 107(S6), pp. 907-938.
- De Boever, Patrick; Demare, Wim; Vanderperren, Els; Cooreman, Kris Bossier, Peter; Verstraete, Willy (2001): Optimization of a yeast estrogen screen and its applicability to study the release of estrogenic isoflavones from a soygerm powder. *Environmental Health Perspectives* 109(7), pp. 691-697.
- Dohmann, Max; Baumgarten, Sven (2006): Entwicklung der Membrantechnik in der Abwasseraufbereitung. *energie wasser-praxis* 57(2), pp. 30-32.
- DüMV (2003): Düngemittelverordnung vom 26.11.2003 (Erstverkündung), BGBl I 2003, 2373.
- DWA (2008): Neuartige Sanitärsysteme (NASS). DWA-Themenband. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.

- DWA (2010): Im Klartext: Brauchen wir in Deutschland neuartige Sanitärsysteme? Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=751> (29.11.2012).
- EAWAG (2006): NOVAQUATIS. Work package NOVA 1, Acceptance. EAWAG, Dübendorf, Schweiz. URL: [http://www.novaquatis.eawag.ch/arbeitspakete/nova1/text\\_E\\_nova1](http://www.novaquatis.eawag.ch/arbeitspakete/nova1/text_E_nova1) (12.12.2012).
- Eisold, Jenny; Benzing, Corinne (2010): From concept to tap. Integrated water resource management in Northern Namibia, Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH, Frankfurt, Deutschland. URL: <http://www.isoe.de/fileadmin/redaktion/Downloads/Wasserressourcen/cuvewaters-brochure-2011-en.pdf> (29.11.2012).
- Engelhart, Markus; Knerr, Henning (2009): Verfahrenstechnik der Grau- und Schwarzwasserbehandlung – Module zur Schließung von Wasserkreisläufen. In: Schmitt, Theo, KOMPLETT – Ein innovatives System zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen, *SIWAWI-Schriftenreihe Band 28*, Kaiserslautern, Deutschland.
- Etter, Benjamin; Tilley, Elizabeth, Khadka, Raju; Udert, Kai (2011): Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. *Water Research* 45(2), pp. 852–862.
- EU (1999): Community Strategy for Endocrine Disruptors - a range of substances suspected of interfering with the hormone systems of humans and wildlife. Commission of the European Communities, COM (1999) 706, Brüssel, Belgien. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:1999:0706:FIN:EN:PDF> (24.01.2013).
- Gajurel, Deepak; Gulyas, Holger; Reich, Margit; Otterpohl, Ralf (2007): Behaviour of selected pharmaceuticals during long-time storage of yellow water, International Conference on Sustainable Sanitation: "Food and Water Security for Latin America" Ecosan – Fortaleza, Brasilien.
- Groh, Dirk; Pipke, Larissa; Galander, Franziska; Schneider, Sarah (2011): Arzneimittelrückstände in der Umwelt - Datenbankauszug aus der Umweltforschungsdatenbank U-FORDAT, Umweltbundesamt, Dessau, Deutschland.
- Grunwald, Armin (2005): Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten. *Technikfolgenabschätzung. Theorie und Praxis* 14(3), 54-60.
- Jönsson, Håkan; Stinzing, Anna; Vinnerås, Björn; Salomon, Eva (2004): Guidelines on the use of urine and faeces in crop production. EcoSanRes Report 2004-2, Stockholm, Schweden. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=187> (24.01.2013).
- King, Franklin (1911): Farmers of forty centuries or Permanent agriculture in China, Korea and Japan. King, Franklin (Hrg.), Cornell University Library. URL: <http://archive.org/stream/cu31924073872685#page/n11/mode/2up> (02.08.12).

- Larsen, Tove; Lienert, Judit (2007): Novaquatis Abschlussbericht. NoMix – Neue Wege in der Siedlungswasserwirtschaft. Eawag, Dübendorf, Schweiz.
- Lienert, Judit; Haller, Michael; Berner Alfred.; Stauffacher, Markus; Larsen, Tove (2003): How do farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled anthropogenic nutrients (urine)? *Water Science and Technology* 48(1), pp. 47-56.
- Lindner, Björn (2008): The black water loop: water efficiency and nutrient recovery combined. Dissertation, *Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 62*, Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Hamburg Harburg, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1303> (29.11.2012).
- Maurer, Max; Schwegler, Peter; Larsen, Tove (2003): Nutrient in urine: energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology* 48(1), 37-46.
- Melin, Thomas; Pinnekamp, Johannes; Dohmann, Max (2005): Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung – Perspektiven, Neuentwicklungen und Betriebserfahrungen im In- und Ausland, 6. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, 26.-27.10.2005, Aachen, Deutschland.
- Montag, David; Gethke, Katrin, Everding, Wiebke, Pinnekamp, Johannes (2009): Nährstoff- und Schadstoffgehalte in Sekundärphosphaten. Pinnekamp, Johannes (Hrg.), 42. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, *Gewässerschutz – Wasser – Abwasser* 217, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen, Deutschland.
- Muskolus, Andreas (2008): Anthropogenic plant nutrients as fertilizer, Dissertation, Universität Berlin, Berlin, Deutschland
- Oldenburg, Martin (2007): Final cost calculation report for the demonstration project “Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater“ (SCST), Otter-Wasser GmbH, Lübeck, Deutschland.
- Peter-Fröhlich, Anton; Bonhomme, Alexandre; Oldenburg, Martin (2006): Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater (SCST) - Results. SCST Final report May 2007, KompetenzZentrum Wasser Berlin, Berlin, Deutschland. URL: [http://www.susana.org/docs\\_ccbk/susana\\_download/2-434-froehlich-et-al-2006-separate-treatment-urine-faeces-en.pdf](http://www.susana.org/docs_ccbk/susana_download/2-434-froehlich-et-al-2006-separate-treatment-urine-faeces-en.pdf) (29.11.2012).
- Pinnekamp, Johannes (2011): Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“, *Gewässerschutz – Wasser – Abwasser* 228, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen, Deutschland.
- Rieck, Christian; von Münch, Elisabeth; Hoffmann, Heike (2012): Technology review of urine-diverting dry toilets (UDDTs) - Overview on design, management, maintenance and costs. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=874> (29.11.2012).

- Roma, Elisa; Holzwarth, Stefanie; Buckley, Chris (2011): Large-scale peri-urban and rural sanitation with UDDTs, eThekweni Municipality (Durban), South Africa - Case study of sustainable sanitation projects. Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbktpeitem&type=2&id=791> (29.11.2012).
- Ronteltap, Mariska; Maurer, Max; Gujer, Willi (2007a): Struvite precipitation thermodynamics in source-separated urine. *Water Research* 41(5), pp. 977-984.
- Ronteltap, Mariska; Maurer, Max; Gujer, Willi (2007b): The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. *Water Research* 41(9), pp. 1859- 1868.
- Shore, Laurence; Shemesh, Mordechai (2003): Naturally produced steroid hormones and their release into the environment. *Pure and Applied Chemistry* 75(11-12), pp.1859-1871.
- Simons, Jürgen; Clemens, Jochim (2004): The use of separated human urine as mineral fertilizer. In: Ecosan – Closing the Loop. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ecological Sanitation, Lübeck, Deutschland, 7-11 April 2003, 595-600.
- Stuer-Lauredsen, Frank; Kjoholt, Jesper; Høibye, Linda; Hing-Christensen, Søren; Ingerslev, Flemming; Hanse, Martin; Andersen Krogh, Kristine; Andersen, Henrik; Halling-Sørensen, Bent; Hanse, Nis; Køppen, Benny; Bjerregaard, Poul; Frost, Bente (2005): Survey of estrogenic activity in the Danish aquatic environment. Environmental Projekt Nr. 977 2005, Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment, Dänemark. URL: <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2005/87-7614-505-0/pdf/87-7614-506-9.pdf> (24.01.2013).
- Tidåcker, Pernilla; Mattsson, Berit; Jönsson, Håkan (2007): Environmental impact of wheat production using human urine and mineral fertilisers – a scenario study. *Journal of Cleaner Production* 15(1), 52-62.
- Tuschewitzki, Georg-Joachim (2003): Mikrobiologische Untersuchungsergebnisse und hygienische Bewertung. In: Das Projekt Lambertsühle: Zukunftsfähiges Abwassermanagement im ländlichen Raum?, Wupperverband, Wuppertal, Deutschland, 26-31. URL: <http://www.otterwasser.de/german/konzepte/tagungsband.pdf> (21.01.2013).
- UN-HABITAT (2010): State of the World's Cities 2010/2011 - Cities for All: Bridging the Urban Divide, State of the World's Cities No. 1249/09, Nairobi, Kenia.
- Vinnerås, Björn; Nordin, Annika; Niwagaba, Charles; Nyberg, Karin (2008): Inactivation of bacteria and viruses in human urine depending on temperature and dilution rate. *Water Research*, 42(15), pp. 4067-4074.
- von Münch, Elisabeth; Winker, Martina (2011): Technology review of urine diversion components - Overview on urine diversion components such as waterless urinals, urine diversion toilets, urine storage and reuse systems. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Eschborn, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbktpeitem&type=2&id=875> (29.11.2011).
- WHO (2006): The Use of Excreta and Greywater in Agriculture, Vol. 4, World Health Organisation, Genf, Schweiz.

Wittgren, Hans; Baky, Andras; Palm, Ola (2003): Environmental systems analysis of small-scale sanitation solutions. In: Ecosan – Closing the Loop. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ecological Sanitation, Lübeck, Deutschland, 7-11 April 2003, 367-372.

## 5.2 Literatur zu Kapitel 3.1

DIN EN 997 (2012): WC-Becken und WC-Anlagen mit angeformtem Geruchsverschluss, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

DWA (2008): Neuartige Sanitärsysteme (NASS). DWA-Themenband. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.

Udert, Kai; Larsen, Tove; Gujer, Willi (2003): Biologically induced precipitation in urine-collecting systems. *Water Science and Technology* 3(3), pp. 71-78.

## 5.3 Literatur zu Kapitel 3.2

DIN EN 13076 (2004): Sicherungseinrichtungen zum Schutz des Trinkwassers gegen Verschmutzung durch Rückfließen - Ungehinderter freier Auslauf, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

DIN 2403 (2008): Kennzeichnung von Rohrleitungen nach dem Durchflusstoff. Ausgabe: 2007-05, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

DIN EN 13077 (2008): Sicherungseinrichtungen zum Schutz des Trinkwassers gegen Verschmutzung durch Rückfließen - Freier Auslauf mit nicht kreisförmigem Überlauf (uneingeschränkt), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

## 5.4 Literatur zu Kapitel 3.3

Abbeglen, Christian (2008): Membrane bioreactor technology for decentralized wastewater treatment and reuse. Dissertation ETH Nr. 17998, Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Schweiz.

Antonini, Samantha; Paris, Stefania; Clemens, Joachim (2009): Nitrogen and phosphorus recovery from human urine. In: Arnold, Ute; Gresens, Frank (Hrg.), Closing the nutrient cycles in decentralised water treatment systems in the Mekong Delta. SANSED-Projekt, Abschlussbericht, Universität Bonn, Deutschland.

DIN 19650 (1999): Bewässerung – Hygienische Belange von Bewässerungswasser, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

DIN EN ISO 11885 (2009): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

DWA (2008): Neuartige Sanitärsysteme (NASS). DWA-Themenband. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.

- Etter, Benjamin; Tilley, Elizabeth; Khadka, Raju; Udert, Kai (2011): Low-cost production using source-separated urine in Nepal. *Water Research* 45 (2), pp. 852-862.
- Fbr (2007): H 201, Regelwerk „Grauwasser-Recycling“, fbr-Schriftenreihe. Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung (fbr), Darmstadt, Deutschland.
- HUBER SE (2010): Betriebsanleitung MAP-Fällungsreaktor NuRec, Ausgabe 05/10, Berching, Deutschland.
- Melin, Thomas, Rautenbach, Robert (2007): Membranverfahren, Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Deutschland.
- Pinnekamp, Johannes (2006): Membrantechnik für die Abwasserreinigung. Band 1, 2. Auflage, FiW Verlag, Aachen, Deutschland.
- Röhricht, Markus; Hartmann, Matthias; Heynemann, Johanna; Winker, Martina; Paris, Stefania (2012): Phosphate recovery from urine by MAP-precipitation. Book of Abstracts, Ecotechnologies for Wastewater Treatment 2012, IWA International Conference, Santiago de Compostela, Spanien.
- Th. Geyer GmbH & Co. KG (2012): Produktkatalog, Renningen, Deutschland. URL: [www.thgeyer.de](http://www.thgeyer.de) (03.12.2012).

## 5.5 Literatur zu Kapitel 3.4

- Beier, Silvio (2010): Elimination von Arzneimitteln aus Krankenhausabwasser. Pinnekamp, Johannes (Hrg.), *Gewässerschutz – Wasser – Abwasser 222*, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen, Deutschland.
- DIN 38412-Teil 30 (1989): Testverfahren mit Wasserorganismen (Gruppe L): Bestimmung der nicht akut giftigen Wirkung von Wasserinhaltsstoffen gegenüber Daphnien über Verdünnungsstufen, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN 38409-Teil 1 (1987): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrat-trockenrückstandes und des Glührückstandes (H 1), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 872 (2005): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung suspendierter Stoffe - Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN 38409-Teil 28 (1989): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H); Bestimmung der disulfidblau-aktiven Substanzen (H 20), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN 38406-Teil 5 (1983): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Kationen (Gruppe E); Bestimmung des Ammonium-Stickstoffs (E 5), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.

- DIN EN 10304-1 (2009): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat (ISO 10304-1:2007), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 12260 (2003): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Stickstoff - Bestimmung von gebundenem Stickstoff (TN<sub>b</sub>) nach Oxidation zu Stickstoffoxiden, Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 1899-1 (1998): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des Biochemischen Sauerstoffbedarfs nach n Tagen (BSB<sub>n</sub>) - Teil 1: Verdünnungs- und Impfverfahren nach Zugabe von Allylthioharnstoff (ISO 5815:1989, modifiziert), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 27888 (1993): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (ISO 7888:1985), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN ISO 10523 (2012): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Werts (ISO 10523:2008), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN ISO 9562 (2005): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung adsorbierbarer organisch gebundener Halogene (AOX) (ISO 9562:2004), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN ISO 15705 (2003): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung des chemischen Sauerstoffbedarfs (ST-CSB) - Küvettentest (ISO 15705:2002), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN ISO 11885 (2009): Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007), Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN ISO 6579 (2007): Mikrobiologie von Lebensmitteln und Futtermitteln - Horizontales Verfahren zum Nachweis von Salmonella spp. (ISO 6579:2002+Amd 1:2007); Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- DIN EN ISO 16266 (2008): Wasserbeschaffenheit - Nachweis und Zählung von Pseudomonas aeruginosa - Membranfiltrationsverfahren (ISO 16266:2006); Beuth Verlag, Berlin, Deutschland.
- EG (2006): RICHTLINIE 2006/7/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 15. Februar 2006 über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG, Amtsblatt der Europäischen Union, 4.3.2006, Brüssel, Belgien.
- ESIS (2000a): European Chemical Substances Information System (ESIS), IUCLID Dataset, Carbamazepine, Ecotoxicity, 18.2.2000, URL: [http://esis.jrc.ec.europa.eu/doc/IUCLID/data\\_sheets/298464.pdf](http://esis.jrc.ec.europa.eu/doc/IUCLID/data_sheets/298464.pdf) (07.08.2012).
- ESIS (2000b): European Chemical Substances Information System (ESIS), IUCLID Dataset, Ibuprofen, Ecotoxicity, 18.2.2000, URL: [http://esis.jrc.ec.europa.eu/doc/IUCLID/data\\_sheets/15687271.pdf](http://esis.jrc.ec.europa.eu/doc/IUCLID/data_sheets/15687271.pdf) (07.08.2012).
- ESIS (2012): European Chemical Substances Information System (ESIS), URL: <http://esis.jrc.ec.europa.eu/> (20.09.2012).

- Gros, Mertixell; Petrović, Mira; Barceló, Damià (2006): Multi-residue analytical methods using LC-tandem MS for the determination of pharmaceuticals in environmental and wastewater samples: a review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 386, pp. 941-952.
- Kümmerer, Klaus (2004): *Pharmaceuticals in the Environment – Sources, Fate, Effects and Risks*, 2. Ausgabe, Springer Verlag, Berlin, Deutschland.
- LANUV (2007): Eintrag von Arzneimitteln und deren Verhalten und Verbleib in der Umwelt – Literaturstudie, LANUV-Fachbericht 2, Anhang 12 – Arzneimittel – Ökotoxikologische Kenngrößen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Recklinghausen, Deutschland.
- LGC (2012): EU Safety Data Sheet according to regulation (EC) No 1907/2006 (REACH), Tramadol, LGC GmbH, Luckenwalde, Deutschland. URL: <http://www.logical-standards.com/uploads/pdfs/english/MSDS-AMP0007.00-01-GB.pdf> (14.8.2012).
- Montag, David; Gethke, Katrin, Everding, Wiebke, Pinnekamp, Johannes (2009): Nährstoff- und Schadstoffgehalte in Sekundärphosphaten. Pinnekamp, Johannes (Hrg.), 42. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, *Gewässerschutz – Wasser – Abwasser* 217, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen, Deutschland.
- NTP (2012): Testing Status of Agents at NTP, Sulfamethazine, National Toxicology Programm. URL: <http://ntp.niehs.nih.gov/index> (18.7.2012).
- Petrović, Mira; Hernando, Maria; Diaz-Cruz, M.; Barceló, Damià (2005): Liquid chromatography–tandem mass spectrometry for the analysis of pharmaceutical residues in environmental samples: a review. *Journal of Chromatography A* 1067, pp. 1-14.
- PharmQue (2009): Query Tool - Pharmaceuticals in the Environment, Insitut für Siedlungswasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Hamburg-Harburg, Deutschland. URL: <http://cgi.tu-harburg.de/~awwwweb/pharma/index.html> (3.8.2012).
- Ronteltap, Mariska; Maurer, Max; Gujer, Willi (2007b): The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. *Water Research* 41(9), pp. 1859- 1868.
- Schulze-Rettmer, Reiner; Yawari, Toraj (1988): Versuche mit der Fällung von Magnesium-Ammonium-Phosphat aus verschiedenen Abwässern. *Vom Wasser* 71, pp. 41-54.
- Schwabe, Ulrich; Pfaffrath, Dieter (2008): *Arzneiverordnungsreport 2008: Aktuelle Daten, Kosten, Trends und Kommentare*. Springer-Verlag, Heidelberg, Deutschland.
- SRG (2011): Empfehlungen Basistherapie Antimalaria, Stand 03/2011, Schweizerische Gesellschaft für Rheumatologie, Zürich, Schweiz. URL: <http://www.rheuma-net.ch/Richtlinien>, (25.07.12).
- UBA (2011): Zusammenstellung von Monitoringdaten zu Umweltkonzentrationen von Arzneimitteln. Texte 66/2011, Umweltbundesamt (UBA), Dessau, Deutschland. URL: <http://www.uba.de/uba-infi-medien/4188.html> (5.7.2012).

Udert, Kai; Larsen, Tove; Gujer, Willi (2003): Biologically induced precipitation in urine-collecting systems. *Water Science and Technology* 3(3), pp. 71-78.

Universität Dortmund (2006): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Untersuchungen zum Eintrag und zur Elimination gefährlicher Stoffe in Kläranlagen Teil 2, Förderung durch das Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Deutschland.

WHO (2006): The Use of Excreta and Greywater in Agriculture, Vol. 4, World Health Organization, Genf, Schweiz.

## 5.6 Literatur zu Kapitel 3.5

Aehle, Elke; Müller, Ulrike; Eklund, Patrick; Willför, Stefan; Sippl, Wolfgang; Dräger, Birgit (2011): Lignans as food constituents with estrogen and antiestrogen activity. *Phytochemistry* 72(18), pp. 2396-405.

Agrarmarkt Informations-Gesellschaft (AMI) mbH (2012): URL: [http://www.situationsbericht.de/detail.asp?bild=AMI\\_2011\\_C-656\\_Weltduengerv.jpg&kap=&ukap](http://www.situationsbericht.de/detail.asp?bild=AMI_2011_C-656_Weltduengerv.jpg&kap=&ukap), (15.10.2012).

Antonini, Samantha; Phong, Than Nguyen; Arnold, Ute; Eichert, Thomas; Clemens, Joachim (2012): Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam. *Science of the Total Environment* 414, pp. 592-599.

Arnold Ute (2010): Options for reuse of nutrients from waste water in the Mekong Delta, Vietnam, Dissertation, INRES, Universität Bonn, Deutschland, URL: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2010/2385/2385.htm> (30.11.2012).

Clemens, Joachim; Nisipeanu, Peter; Muskulus, Andreas; Rieß, Peter; Vinnerås, Björn; Winker, Martina (2008): Produkte aus neuartigen Sanitärsystemen in der Landwirtschaft. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 55(10), 1120-1125.

Colucci, Michael; Bork, Henry; Topp, Edward (2001): Persistence of estrogenic hormones in agricultural soils: I. 17 $\beta$ -Estradiol and Estrone. *Journal of Environmental Quality* 30(6), pp. 2070-2076.

Colucci, Michael; Topp, Edward (2001): Persistence of estrogenic hormones in agricultural soils: II. 17 $\alpha$ -Ethinylestradiol. *Journal of Environmental Quality* 30(6), pp. 2077-2080.

Czajka, Cynthia; Londry, Kathleen (2006): Anaerobic transformation of estrogens. *Science of the Total Environment* 367(2-3), pp. 932-941.

Deutscher Bauernverband (DBV) (2012): URL: <http://www.situationsbericht.de/index.asp?seite=6&kapitel=2> (15.10.2012).

Lehmann, Norbert (2011): Weltweit wird der Düngerbedarf steigen. dlz-Aktuell, DLZ-Agrarmagazin, 04.05.2011. URL: <http://dlz.agrarheute.com/duengemittel> (15.10.2012).

- Dimova, Daniela (2008): Einfluss von Pharmaka auf die Keimfähigkeit und die Entwicklung von Kresse und verschiedener Getreidearten. Diplomarbeit, Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Deutschland.
- DWA (2008): Neuartige Sanitärsysteme (NASS). DWA-Themenband. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.
- Hammer, Martina; Clemens, Joachim (2007): A tool to evaluate the fertilizer value and the environmental impact of substrates from wastewater treatment. *Water Science & Technology* 56(5), pp. 201-209.
- Höglund, Caroline (2001): Evaluation of microbial health risks associated with the reuse of source separated human urine. PhD thesis, Department of Biotechnology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- KTBL (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, Deutschland.
- Le, Thi Anh Hong (2012): The YES-Assay as a tool to analyse Endocrine Disruptors in different matrices in Vietnam, Dissertation, INRES, Universität Bonn, Deutschland. URL: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2012/3027/3027.htm> (23.01.2013).
- Lee, Linda; Strock, Troy; Sarmah, Ajit; Rao, Suresh (2003): Sorption and dissipation of testosterone, estrogens, and their primary transformation products in soils and sediment. *Environmental Science and Technology* 37(18), pp. 4098-4105.
- Lucas, Sophie; Jones, David (2006): Biodegradation of estrone and 17 $\beta$ -estradiol in grassland soils amended with animal wastes. *Soil Biology & Biochemistry* 38(9), pp. 2803-2815.
- Milder, Ivon; Arts, Ilja; Putte, Betty van de; Venema, Dini; Hollman, Peter (2007): Lignan contents of Dutch plant foods: a database including lariciresinol, pinoresinol, secoisolariciresinol and matairesinol. *British Journal of Nutrition* 93(3), pp. 393.
- Muskolus, Andreas (2008): Anthropogenic plant nutrients as fertiliser. Dissertation, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin, Deutschland.
- Nawaro (2012): URL: <http://nawaro.ag/de/unternehmen/projekte/bioenergiepark-guestrow/> (15.10.2012).
- Routledge, Edwin, Sumpter, John (1996): Estrogenic activity of surfactants and some of their degradation products assessed using a recombinant yeast screen. *Environmental Toxicology and Chemistry* 15(3), pp. 241-248.
- Schneider, Rudolf (2005): Pharmaka im Urin: Abbau und Versickerung vs. Pflanzenaufnahme, in: Nährstofftrennung und –verwertung in der Abwassertechnik am Beispiel der „Lambertsmühle“. *Bonner Agriculturnechnische Reihe* Band 21, Bonn, Deutschland.
- Simons, Joachim (2008): Eignung nährstoffreicher Substrate aus zentraler & dezentraler Abwasserbehandlung als Düngemittel, Dissertation, INRES, Universität Bonn, Deutschland, URL: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2008/1460/1460.htm> (30.11.2012).

Statistisches Bundesamt (2012): URL:

<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/28888/umfrage/hektarertrag-von-getreide-in-deutschland-seit-1960/> (15.10.2012).

Umweltbundesamt (UBA) (2011): Daten zur Umwelt, Indikator: Dünge- und Pflanzenschutzmittelabsatz in der Landwirtschaft. URL: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2878>, Letzte Aktualisierung: September 2011 (15.10.2012).

US Geological Survey (USGS) (2012): Phosphate rock - statistics and information. URL: [http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate\\_rock/](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/) (15.12.2012).

Wagner, M. (2005): Rohphosphat – Verfügbarkeit und Verbrauch. Pinnekamp, Johannes (Hrg.), 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Gewässerschutz – Wasser – Abwasser 198, Gesellschaft zur Förderung der Siedlungswasserwirtschaft an der RWTH Aachen e.V., Aachen, Deutschland.

Winker, Martina; Clemens, Joachim; Reich, Margit; Gulyas, Holger; Otterpohl, Ralf (2010a): Ryegrass uptake of carbamazepine and ibuprofen applied by urine fertilization. *Science of the Total Environment* 408(8), pp. 1902-1908.

Winker, Martina; Dimova, Daniela; Ritter, Karin; Otterpohl, Ralf; Clemens, Joachim (2010b): Effect of five pharmaceutical substances contained in urine on the germination of cress and cereal seedlings. IWA Conference Sustainable solutions for small water and wastewater treatment systems, Girona, Spanien.

Wohlsager, Susanne; Clemens, Joachim; Nguyet, Phan Thanh; Rechenburg, Andrea; Arnold, Ute (2010): Urine - a valuable fertilizer with low risk after storage in the Tropics. *Water Environment Research* 82(9), pp. 840-847.

## 5.7 Literatur zu Kapitel 3.6

Bortz, Jürgen; Döring, Nicola (2006): Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Deutschland.

Dierkes, Meinolf; von Thienen, Volker (1982): Akzeptanz und Akzeptabilität der Informationstechnologien. *Wissenschaftsmagazin der Technischen Universität Berlin*, Heft 1, Band 2, Berlin, Deutschland.

Griesen, Michael (2010): Akzeptanz von Biogasanlagen, Dissertation, Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik, Lehrstuhl Wirtschaftssoziologie, Universität Bonn, Deutschland.

Jacob, Rüdiger; Heinz, Andreas; Décieux, Jean; Eirnbter, Willy (2001): Umfrage: Einführung in die Methoden der Umfrageforschung, 2. Auflage, Oldenburg Verlag, München, Deutschland.

Landwirtschaftskammer NRW (2011): Landwirtschaft in NRW. Flyer, URL <http://www.landwirtschaftskammer.de/presse/aa-2012-39-03.htm> (12.12.2012).

- Larsen, Tove und Lienert, Judit (2007): Novaquatis Abschlussbericht. NoMix – Neue Wege in der Siedlungswasserwirtschaft. EAWAG, Dübendorf, Schweiz.
- Lienert, Judit (2007): Eine gute Idee, aber das will doch keiner! *Eawag News* 63d, EAWAG, Dübendorf, Schweiz. URL: [http://www.novaquatis.eawag.ch/publikationen/abschlussbericht\\_D](http://www.novaquatis.eawag.ch/publikationen/abschlussbericht_D) (26.07.2012).
- Lienert, Judit; Haller, Michael; Berner Alfred.; Stauffacher, Markus; Larsen, Tove (2003): How do farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled anthropogenic nutrients (urine)? *Water Science and Technology* 48(1), pp. 47-56.
- Lobao, Linda; Meyer, Katherine (2001): The great agricultural transition: crisis, change and social consequences of twentieth century US farming. *Annual Review of Sociology* 27(1), pp. 103-124.
- Muskolus, Andreas (2008): Anthropogenic plant nutrients as fertilizer, Dissertation, Universität Berlin, Berlin, Deutschland.
- Pöge, Andreas (2011): Persönliche Codes bei Längsschnittuntersuchungen III. *MDA – Methoden, Daten, Analysen*, 5(1), pp. 109-134.
- Schnell, Rainer; Hill, Paul; Esser, Elke (2005): Methoden der empirischen Sozialforschung. 7. Auflage. Oldenbourg Verlag, München, Deutschland.
- Schober GmbH (2012): Schober: Marketing-Service-Dienstleister für Daten- & Adress-Management sowie Markt- und Zielgruppen-Analysen, Schober Information Group Deutschland GmbH, Ditzingen, Deutschland. URL: <http://www.schober.de/unternehmen/referenzen.html> (07.12.2012).

## 5.8 Literatur zu Kapitel 3.7

- Agrarmarkt NRW (2012): Düngemittelpreise, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Bonn, Deutschland. URL: <http://www.agrarmarkt-nrw.de/duengermarkt.shtm> (10.10.2012).
- Braum, Christina (2011): Economical feasibility of using urine versus struvite as fertiliser - Using the example of GIZ in Eschborn. Bachelorarbeit, Institut für Bodenkunde und Bodenerhaltung, Justus Liebig Universität Gießen, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1468> (12.12.2012).
- Cordell, Dana (2010): The story of phosphorus, Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security. Doktorarbeit, Institute for Sustainable Future, University of Technology Sydney, Australien.
- DWA (2010): Brauchen wir in Deutschland neuartige Sanitärsysteme? Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=751> (12.12.2012).
- KTBL (2009): Faustzahlen für die Landwirtschaft, 14. Auflage, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, Deutschland.
- LAWA (2005): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien), Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Unterausschuss Wirtschaftlichkeitsfragen in der Wasserwirtschaft, Kulturbuchverlag, Berlin, Deutschland.

- Lazo Paéz, Andrés (2010): Economic feasibility study of the new sanitation system in Building 1 in the GIZ Headquarters. Master thesis, Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Deutschland.
- Maurer, Max; Schwegler, Peter; Larsen, Tove (2003): Nutrient in urine: energetic aspects of removal and recovery. *Water Science and Technology* 48(1), 37-46.
- Oldenburg, Martin (2007): Final cost calculation report for the demonstration project "Sanitation concepts for separate treatment of urine, faeces and greywater" (SCST), Otterwasser GmbH, Lübeck, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=593> (12.12.2012).
- Prager, Jens, (2002): Nachhaltige Umgestaltung der kommunalen Abwasserentsorgung - Eine ökonomische Analyse innovativer Entsorgungskonzepte, ISL-Verlag, Hagen, Deutschland.
- Tidåcker, Pernilla; Mattsson, Berit; Jönsson, Håkan (2007): Environmental impact of wheat production using human urine and mineral fertilisers – a scenario study. *Journal of Cleaner Production* 15(1), 52-62.
- Winker, Martina; Saadoun, Amel (2011): Urine and brownwater separation at GTZ main office building Eschborn, Germany - Case study of sustainable sanitation projects. Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=63> (12.12.2012).
- Wittgren, Hans; Baky, Andreas; Palm, Ola (2003): Environmental systems analysis of small-scale sanitation solutions. In: Ecosan – Closing the Loop. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Ecological Sanitation, Lübeck, Deutschland, 7-11 April 2003, 367-372.

## 5.9 Literatur zu Kapitel 3.8

- Abraham, Belinda; Fogde, Madeleine; von Münch, Elisabeth; Wendland, Claudia (2012): Sustainable sanitation for schools - Factsheet of Working Group 7a, Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). URL: <http://susana.org/langen/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1188> (12.12.2012).
- Emerson, John; Esty, Daniel; Levy, Marc; Kim, Christine; Mara, Valentina; de Sherbinin, Alex; Srebotnjak, Tanja (2010): 2010 Environmental Performance Index, Yale Center for Environmental Law and Policy, New Haven, USA. URL: [http://ciesin.columbia.edu/repository/epi/data/2010EPI\\_summary.pdf](http://ciesin.columbia.edu/repository/epi/data/2010EPI_summary.pdf) (12.12.2012).
- Etter, Bastian; Tilley, Elizabeth; Khadka, Raju; Udert, Kai (2011): Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. *Water Research* 45-2, S. 852-862.
- FAO (2010): Current world fertilizer trends and outlook to 2014, Rom, Italien. URL: <ftp://ftp.fao.org/ag/agp/docs/cwfto14.pdf> (12.12.2012).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2012): FAOSTAT. URL: <http://faostat.fao.org/site/575/DesktopDefault.aspx?PageID=575#ancor> (12.12.2012).
- Gensch, Robert; Dagerskog, Linus; van Veenhuizen, René; Winker, Martina; Drechsel, Pay (2012): Productive sanitation and the link to food security - Factsheet of Working Group 5.

- Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA). URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=101> (12.12.2012).
- Gilbert, Natasha (2009): The disappearing nutrient. *Nature* 461(8), pp. 716-718. URL: <http://www.nature.com/news/2009/091007/pdf/461716a.pdf> (12.12.2012).
- Hellström, Daniel; Jeppsson, Ulf; Kärrman, Erik (2000): A framework for systems analysis of sustainable urban water management. *Environmental Impact Assessment Review* 20(3), pp. 311-321.
- Löw, Katharina (2011): An innovative greywater treatment system for urban areas – International transferability of a German approach, installed in GIZ's headquarters in Eschborn, Masterarbeit. HfWU - Nürtingen-Geislingen Universität, Nürtingen, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1469> (12.12.2012).
- Müller, Peter (2000): Physiologic population density for each of the world's states. University of Missouri, St. Louis, USA.
- Peng, Jingjing, (2012): MAP crystallization from urine – assessment of the international adaptability, implemented within Project SANIRESCH in Eschborn. Master Thesis, TU Darmstadt, Darmstadt, Deutschland. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1682> (21.01.2013).
- Selman, Mindy; Greenhalgh, Suzie; Diaz, Robert; Sugg, Zachary, (2008): Eutrophication and hypoxia in coastal areas: a global assesment of the state of knowledge, *WRI Policy Note* No.1, World Research Institute, Washington D.C., USA. URL: [http://pdf.wri.org/eutrophication\\_and\\_hypoxia\\_in\\_coastal\\_areas.pdf](http://pdf.wri.org/eutrophication_and_hypoxia_in_coastal_areas.pdf) (12.12.2012).
- SuSanA (2012): Towards more sustainable sanitation solutions. Version 1.2., Sustainable Sanitation Alliance. URL: <http://www.susana.org/lang-en/sustainable-sanitation/156-introduction-of-sustainable-sanitation/267-vision-document> (12.12.2012).
- Trincheria, Josep (2010): Framework to assess the international adaptability of the urban sanitation system implemented within the project SANIRESCH. Master Thesis, Institut für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Deutschland. URL: <http://www.saniresch.de/images/stories/downloads/deTrincheria-thesis-latestversion.pdf> (12.12.2012).
- UN (2010): World urbanisation prospects 2009 - the revision, New York, USA. URL: <http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm> (12.12.2012).
- UNESCO (2009): United Nations world water development report 3: water in a changing world, World Water Assesment Programme, Paris, Frankreich.
- Clemens, Joachim; Vinnerås, Björn; Winker, Martina; Arnold, Ute; Mang, Heinz-Peter (2012): The potential contribution of NASS products on the fertilizer use and impact on greenhouse gas emissions in different countries. In: Winker, Martina; Stäudel, Jürgen; von Münch, Elisabeth; Londong, Jörg (Hrsg.): Neue Wasserinfrastrukturkonzepte in der Stadt-

planung, DWA NASS-Tage, 6.-7. November 2012, Eschborn, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.

Wu, Yue, (2011): Internationale Übertragbarkeit der in der GIZ Zentrale in Eschborn installierten Braunwasserbehandlungsanlage, Masterarbeit. HfWU - Nürtingen-Geislingen Universität, Nürtingen. URL: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1504> (12.12.2012).

Zangemeister, Christof, (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik, Eine Methode zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen, Dissertation, TU Berlin, 4. Aufl., München.

# 6. Anlage

## 6.1 Anlagen zu Kap. 3.1

Anlage 6.1.1: Liste zur Datenerfassung der monatlichen Kontrollen und der 1/2-jährlichen Wartung.

Blatt: .....		<b>Betriebstagebuch SANIRESCH</b> Kontrolle										 <small>Roediger Vacuum GmbH Königsplatz-Weg 101-106 85402 Lamau, Germany Telefon: +49-0191-305-0 Telefax: +49-0191-305-290</small>															
Bauvorhaben: Verbundprojekt SANIRESCH / Forschungsvorhaben GTZ Hauptgebäude												Projekt - Nr: 743216															
Wartung: <input type="checkbox"/>		Monatliche Kontrolle: <input type="checkbox"/>										Sachbearbeiter:															
		Datum: .....										Sachbearbeiter:															
Etage	Kontrolle													Kommentar	Aktuelle Ventil Nummer												
	inhalts (Schnitt) noch vorhanden	Bowlabzug Sonstiges	Bowlabzug prüfen	Bowlabzug auspolieren / gelöst	Ablagerung am Bowlabzug	Bowlabzug Feine	Ordnungsgem. Funktion (Gangigkeit)	Schieß. das Ventil?	Öhler das Ventil?	Schlier mit Kontrolle des Wähl- spektra am "Überlauf" Siehe	Flüssigkeitsseite am Saft	Tausch des Ventils	Spotrennender (Dochmenchwelle) verfälscht oder aufbauend			Spotrennender mit Öhring	Spotrennender getauscht	Abstandseibe getauscht	Tausch der 2 Öhringe	Tausch des Bowlabzuges	Tausch des Ventils	Verrostung des Ventils	Verstärkung vom Ventilboden	Verrostung vom Abtaucher (obere Dichtung)	Verrostung am Filterhals	Undichtigkei vom Filterhals	
6	Hr																										
6	Hi																										
6	Dr																										
6	Di																										
6	Hr																										
6	Hi																										
6	Dr																										
6	Di																										
7	Hr																										
7	Hi																										
7	Dr																										
7	Di																										
6	Hi																										
6	Dr																										
6	Di																										
6	Hr																										
6	Hi																										
6	Dr																										
6	Di																										
5	Hr																										
5	Hi																										
5	Dr																										
5	Di																										
4	Hr																										
4	Hi																										
4	Dr																										
4	Di																										
3	Hr																										
3	Hi																										
3	Dr																										
3	Di																										
2	Hr																										
2	Hi																										
2	Dr																										
2	Di																										
1	Hr																										
1	Hi																										
1	Dr																										
1	Di																										
0	H 1																										
0	H 2																										
0	H 3																										
0	H 4																										
0	H 5																										
0	H 6																										
BMZ	r																										
BMZ	l																										

### Anlage 6.1.2: Legende des Betriebstagebuch sowie Beschreibungen der durchzuführenden Tätigkeiten.

Legende:		
1 = Ja	A = Schwarz	C = leicht
0 = Nein	B = weiss	D = schwer

\* Bei Drücken des Toilettensitz nach unten öffnet ein an einem Bowdenzug angeschlossenes Ventil mechanisch und lässt das Spülwasser (den Urin) durch die Ablauföffnungen im vorderen Teil des Beckens durch das Urnablaufventil fließen. Bei nicht Betätigen des Ventils (Nicht auf der Toilette sitzen) wird das Spülwasser durch eine kleine Öffnung kurz unter dem vorderen Separierteil direkt in den hinteren Fäkalenteil weitergeleitet. Durch diesem Test wird der Mechanismus auf ordnungsgemäße Funktion getestet.

In BMZ sind nur Herrentoiletten mit Nomix- Toiletten bestückt

Nr. :	Auszuführende Tätigkeiten	Bemerkung	Ver. Nr.
1	Sichtkontrolle des äußerlichen Zustandes der Toiletten auf Bruchstellen und Sauberkeit, sowie ordnungsgemäße Wandbefestigung		
2	Überprüfung des WC-Raumes auf Geruchsbelästigung		
3	Überprüfung ob die Klappscharnier der WC-Sitze noch einwandfrei funktionieren und nicht ausgebrochen sind		
4	Sichtkontrolle der WC-Sitze auf Passgenauigkeit zum WC-Becken, damit der Bowdenzug ordnungsgemäß öffnet		
5	Sichtkontrolle der WC-Becken auf Dichtheit - Gummiverbindungsringe der Urinablauftrichter, Bowdenzug		
6	Überprüfung der Bowdenzüge auf ordnungsgemäße Funktion, hierzu das Unterteil der WC-Sitze auf den aus dem Beckenrand herausstehenden Splint der Bowdenzüge drücken bis das Ablaufventil öffnet		
7	Sichtkontrolle, ob der Über- bzw. Ablauf von vorderen Urinteil zum hinteren Siphon des WC-Beckens frei von Ablagerungen ist. Hierzu bei geschlossenem Urinventil kurz die Spülung betätigen und den Ablauf aus dem Urinrichter kontrollieren		
8	Sichtkontrolle ob die Spülwassermengen des Unterputzspülkastens für den Urinteil und den Fäkalteil unterschiedlich sind		
9	Die No-Mix Toiletten mit Spezialreiniger gegen Urin- und Kalksteinbildung im Urinablaufventilbereich behandeln. Hierzu Zitronensäure verwenden		

## 6.2 Anlagen zu Kap. 3.5

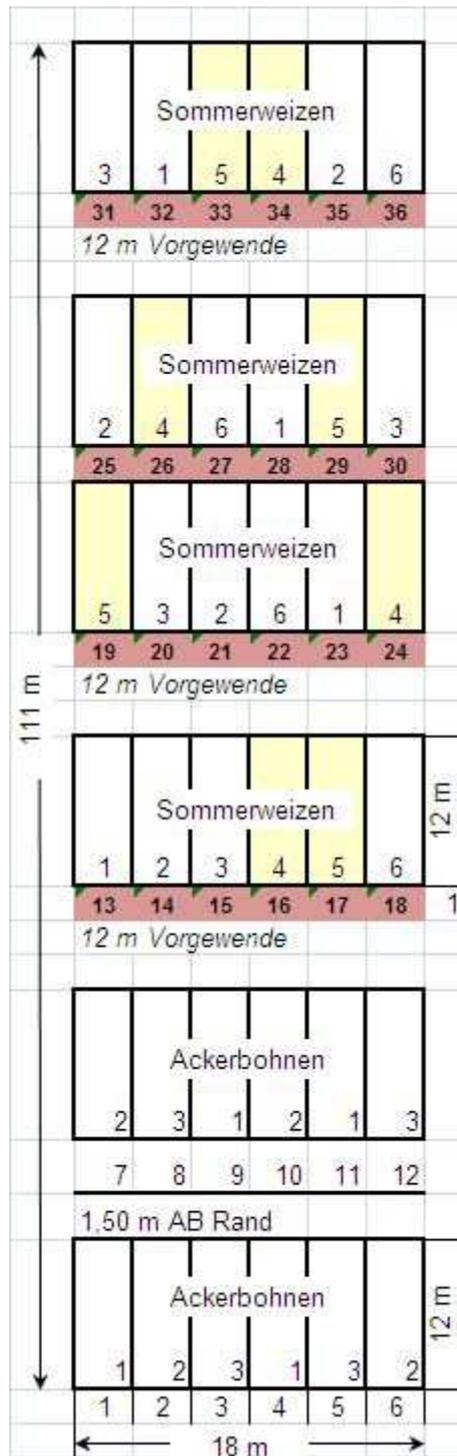
### Anlage 6.2.1: Übersicht über die relevanten Gesetze und Verordnungen im Hinblick auf Dünger aus neuen Sanitärsystemen.

Deutsche Gesetze und Verordnungen	Ausfertigungsdatum / aktuelle Fassung	Rechtsgebiet/ Thema	EU-Richtlinien	Ausfertigungsdatum/ aktuelle Fassung
Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)	17.03.1998/ 24.02.2012	Bodenschutzrecht		
Düngegesetz (DüngG)	09.01.2009/ 15.03.2012	Agrarrecht: Düngung	Informationsverfahren auf dem Gebiet der Normen und technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (98/34/EG)	22.06.1998/ 20.11.2006
Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	01.06.2012	Abfallrecht	Abfallrahmenrichtlinie (75/442/EWG)	25.07.1975/ 05.04.2006
Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	31.07.2009/ 24.02.2012	Wasserrecht:	Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG)	22.12.2000
Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)	12.07.1999/ 24.02.2012	Bodenschutz		
Klärschlammverordnung (AbfKlärV)	15.04.1992/ 24.02.2012	Abfall/ Ausbringung	Verwendung von KS in der LW (86/278/EWG)	12.06.1986/ 20.04.09
Abwasserverordnung (AbwV)	21.03.1997/ 24.02.2012		Siehe <sup>2)</sup>	
Bioabfallverordnung (Bio-AbfV)	21.09.1998/ 23.04.2012	Abfall: organische Abfälle		
Düngemittelverordnung (DüMV)	16.12.2008/ 23.04.2012	Agrarrecht: Beschaffenheit von Düngern	98/34/EG	22.06.1998/ 20.11.2006
Düngeverordnung (DüV)	10.01.2006/ 24.02.2012		Nitratrichtlinie 91/676/EWG	12.12.1991/ 21.11.2008
Düngebeiratsverordnung (DüBV)	28.08.2003/ 13.12.2007	Zulassung neuer Düngemittel		
Klassifizierung und Anwendung von Bewässerungswasser DIN 19650	1999			
DIN 11622 Teile 1, 2 und 4 Bemessung, Ausführung von Güllebehältern	08.11.2005			
Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV)	10.12.2001/ 24.02.12	Transport	Abfallverzeichnis, Europ. Abfallartenkatalog EAK 2000/532/EG	03.05.2000/ 23.07.2001
(Bundes)Verordnung über das Inverkehrbringen und Befördern von Wirtschaftsdünger (Bundesrat, Drucksache 305/10)	19.5.2010	Agrar-/ Verkehrsrecht: Transport		
Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAUwS). Neuer Entwurf in Bearbeitung	05.2012	z.B. Lagerung v. JGS-Anlagen		

## Anlage 6.2.2: Übersicht über Schwermetall-Grenzwerte in verschiedenen Verordnungen.

	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	Anmerkung
<b>Grenzwerte im Boden vor der Ausbringung von Klärschlamm [mg/kg TM]</b>								
<b>AbfklärV</b>	100	1,5/1*	100	60	50	1	200/150*	* Ausnahme: leichte Böden u Tongehalt < 5% oder pH 5-6
<b>EU-KV 86/278/EWG</b>	50 - 300	1 - 3	k.A.	50 - 140	30 - 75	1 - 1,5	150 - 300	• Boden-pH 6-7 vor der Ausbringung • Wenn der pH-Wert des Bodens ständig >7 ist, dürfen die Grenzen um 50% überschritten werden • Bei einem Boden-pH < 6 sind die Grenzwerte anzupassen, die steigende Mobilität und die höhere Aufnahme der Pflanze von SM muss berücksichtigt werden, jedoch keine Angabe von Grenzwerten (Art. 8 Satz 2)
<b>Grenzwerte im Klärschlamm bei der Ausbringung auf den Boden</b>								
<b>AbfklärV</b> [mg/kg TM]	900	10/5*	900	800	200	8	2500/2000*	• max. 5 t TM/ha/3 Jahre (10 t/ha/3 Jahre Klärschlammkompost wenn Gehalte nur die Hälfte betragen) • * leichte Böden u Tongehalt < 5%, pH 5-6
<b>EU-KV 86/278/EWG</b> [mg/kg TM]	750 - 1200	20 - 40	k.A.	1000 - 1750	300 - 400	16 - 25		• Keine maximale Ausbringungsmenge • Keine Berücksichtigung der Bodeneigenschaften
<b>ChemRRV</b> [mg/kg TM]	500	5	500	600	80	5	2000	• Klärschlamm seit 2006 Verboten! (Co: 60; Mo: 20)
<b>ChemRRV</b> [kg/ha/Jahr]	15	0,15	k.A.	12	3	0,1	30	• Grenzwerte die innerhalb von 10 Jahren aufgebracht werden dürfen
<b>Grenzwerte bei anderen Substraten [mg/kg TM]</b>								
<b>BioAbfV</b>	150/100	1,5/1	100/70	100/70	50/35	10,7	400/300	• Bioabfälle 20 t TM/ha/3 Jahre bzw. 30 t TM/ha/3 Jahre
<b>DüMV</b>	150	1,5/50*	300 (Cr <sub>org</sub> )/ 2 (Cr <sub>f</sub> )	***	80	1	***	* bei DM ab 5% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (FM) • ** Cr <sub>org</sub> : nur Kennzeichnungspflicht ab 300 mg/kg TM; kein Grenzwert angegeben • *** werden als Spurennährstoffe aufgeführt
<b>ChemRRV (Schweiz)</b>	120	1	k.A.	100/150*	30	1	400/600	• Org. Dünger, Recyclingdünger, Hofdünger • * ab einem Anteil von mehr als 50 % Extrakten von Schweinen
<b>ChemRRV</b>			2000					• Mineraldünger und Dünger aus tierischen Nebenprodukten (N: 4000 mg/kg)
<b>Vietnam</b>	250	2,5	200	200	100	2	750	• Organische Düngemittel aus Haushalten
<b>Grenzwerte für den Einbau von Boden [mg/kg]</b>								
<b>Z 0</b>	100	0,6	50	40	40	0,3	120	• Uneingeschränkter Einbau
<b>Z 1.1</b>	200	1	100	100	100	1	300	• Eingeschränkter offener Einbau
<b>Z 1.2</b>	300	3	200	200	200	3	500	• Nur bei hydrogeologisch guten Bedingungen und unter Beachtung des Verschlechterungsverbot
<b>Z 2</b>	1.000	10	600	600	600	10	1.500	• Eingeschr. Einbau mit def. techn. Sanierungsmaßnahmen

Anlage 6.2.3: Anlage des Feldversuchs 2010 in Kleinaltdorf.



## 6.3 Anlagen zu Kap. 3.6

Abbildung 6.3.1: Fragebogen zur Nutzerbefragung im Haus 1 der GIZ. Abgebildet sind nur die Standardfragen, die in allen drei Befragungen gestellt wurden.

<p style="text-align: right;">Fragebogen-Nr. □□□</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p><b>Im Folgenden möchten wir gern wissen, welche Informationsangebote Sie bezüglich der NoMix-Anlagen genutzt haben und wie gut Sie sich informiert fühlen.</b></p> </div> <p>01. Welche der angebotenen Informationsmöglichkeiten haben Sie genutzt? (Mehrfachnennung möglich)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Informationsblätter</li> <li><input type="checkbox"/> Präsentation bei verschiedenen Anlässen</li> <li><input type="checkbox"/> Informationsstafeln im Haus (z.B. Erdgeschoss)</li> <li><input type="checkbox"/> Informationsstafeln in den NoMix-Toiletten-Anlagen</li> <li><input type="checkbox"/> sonstige Informationen, und zwar:</li> <li><input type="checkbox"/> Ich habe keine der angebotenen Informationen genutzt.</li> </ul> <p>02. Wie fühlen Sie sich über die folgenden Aspekte informiert? Sie können Ihre Antwort von „sehr gut informiert“ bis „gar nicht informiert“ abstufen:</p> <p>02.1 Über die ökologischen Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> sehr gut</li> <li><input type="checkbox"/> gut</li> <li><input type="checkbox"/> teils/teils</li> <li><input type="checkbox"/> weniger gut</li> <li><input type="checkbox"/> gar nicht</li> </ul> <p>02.2 Über die ökonomischen Vorteile</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> sehr gut</li> <li><input type="checkbox"/> gut</li> <li><input type="checkbox"/> teils/teils</li> <li><input type="checkbox"/> weniger gut</li> <li><input type="checkbox"/> gar nicht</li> </ul> <p>02.3 Über die Nutzung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> sehr gut</li> <li><input type="checkbox"/> gut</li> <li><input type="checkbox"/> teils/teils</li> <li><input type="checkbox"/> weniger gut</li> <li><input type="checkbox"/> gar nicht</li> </ul>	<p>03. Auf Schautafeln wurde über die Funktionsweise der Toiletten informiert. Wie finden Sie diese Art der Information?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> sehr gut</li> <li><input type="checkbox"/> gut</li> <li><input type="checkbox"/> geht so</li> <li><input type="checkbox"/> weniger gut</li> <li><input type="checkbox"/> nicht gut</li> <li><input type="checkbox"/> Ich habe mir die Informationen nicht genauer angesehen.</li> </ul> <p>04. Sind die gegebenen Informationen Ihrer Meinung nach</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> genau richtig</li> <li><input type="checkbox"/> zu detailliert</li> <li><input type="checkbox"/> zu allgemein</li> <li><input type="checkbox"/> weiß nicht</li> </ul> <p>05. Halten Sie Informationen über die NoMix-Toiletten für Erstnutzer insgesamt für</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> notwendig</li> <li><input type="checkbox"/> überflüssig</li> <li><input type="checkbox"/> weiß nicht</li> </ul> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p><b>Wir möchten Sie im Folgenden gerne etwas genauer über Ihre Nutzung von NoMix-Toiletten befragen.</b></p> </div> <p>06. Sind die NoMix-Toiletten oder die konventionellen Toiletten für Sie schneller/leichter erreichbar?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> eindeutig die NoMix-Toiletten</li> <li><input type="checkbox"/> eher die NoMix-Toiletten</li> <li><input type="checkbox"/> beide ungefähr gleich</li> <li><input type="checkbox"/> eher die konventionellen Toiletten</li> <li><input type="checkbox"/> eindeutig die konventionellen Toiletten</li> </ul> <p>07. Welche Toiletten nutzen Sie lieber?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> eindeutig die NoMix-Toiletten</li> <li><input type="checkbox"/> eher die NoMix-Toiletten</li> <li><input type="checkbox"/> beide ungefähr gleich</li> <li><input type="checkbox"/> eher die konventionellen Toiletten</li> <li><input type="checkbox"/> eindeutig die konventionellen Toiletten</li> </ul>
---	--

13. Wann würden Sie von einer solchen o.g. Maßnahme Gebrauch machen?

bei jeder Nutzung

wenn die Toilette scheinbar nicht sauber ist

wenn der Sitz nicht sauber ist

nie

weiß nicht

14. Würden Sie sich hinsetzen, wenn eine der folgenden Maßnahmen zur Verfügung stünde?

Desinfektion

Papierauflagen

Abdeckung mit Klopapier

ohne besondere Maßnahme

Ich setze mich in öffentlichen Toiletten nie hin.

**Wir möchten gerne genauer wissen, welche Probleme Ihnen bei der Nutzung von NoMix-Toiletten bisher aufgefallen sind.**

15. Hatten Sie bei der Nutzung der NoMix-Toiletten schon einmal Probleme?

ja

nein

16. Falls Sie technische Probleme hatten, welcher Art waren diese vorwiegend?

Spülung funktionierte nicht richtig

Toilette war verstopft

sonstige:

trifft nicht zu

17. Falls Sie hygienische Probleme hatten, welcher Art waren diese vorwiegend? (Mehrfachnennung möglich)

WC-Sitz nicht sauber

WC-Schüssel schmutzig

Toilettenkabine sah verunreinigt aus

Geruchsbelästigung war zu stark

Sonstige

trifft nicht zu

08. Wie oft nutzen Sie die NoMix-Toilette?

immer

regelmäßig

gelegentlich

nur in Notfällen

nie

09. Ist Ihnen bekannt, dass man sich auf die Brille der Toilette setzen muss, damit die getrennte Erfassung von Urin in den NoMix-Toiletten funktioniert?

ja

nein

10. Würden Sie statt des Sitzens einen anderen Mechanismus zur Auslösung des Trennvorgangs vorziehen?

ja

nein

egal

11. Ist Ihnen bekannt, dass benutztes Papier nur in die hintere Öffnung der Toilettenschüssel entsorgt werden darf?

ja

nein

11.1. Haben Sie schon einmal Probleme festgestellt, das Papier richtig in die hintere Öffnung zu entsorgen?

ja

nein

12. Welche Maßnahmen würden Sie bevorzugen, damit Sie die NoMix-Toiletten nutzen?

automatische Desinfektion der WC-Sitze

Spender mit Desinfektionsmittel zur Reinigung der Sitze durch den Nutzer

Papierauflagen

Sonstige, und zwar:

Ich halte keine Maßnahme für notwendig

18. Haben Sie auf den konventionellen Toiletten im Haus 1 gleiche oder ähnliche Probleme festgestellt?

- ja  
 nein  
 weiß nicht

19. Treten bei der Spülung in der NoMix-Toilette Probleme auf?

- nie  
 sehr selten  
 manchmal  
 häufig  
 immer

20. Wie oft betätigen Sie die Spülung der NoMix-Toilette pro Toilettengang normalerweise?

- einmal  
 zweimal  
 mehr als zweimal

20.1 Welche Spültaste nutzen Sie dabei normalerweise?

- die normale Spültaste  
 die Spartaste  
 weiß nicht

21. Halten Sie die derzeit eingestellte Spülkraft in den NoMix-Toiletten für ausreichend?

- ja  
 nein  
 weiß nicht

22. Geht von den NoMix-Toiletten eine Geruchsbelästigung aus?

- sehr viel stärker als bei konventionellen Toiletten  
 etwas stärker als bei konventionellen Toiletten  
 ungefähr gleich stark  
 etwas geringer als bei konventionellen Toiletten  
 sehr viel geringer als bei konventionellen Toiletten  
 Kann ich nicht beurteilen.

23. Bereitet Ihnen das Hinsetzen auf den WC-Sitz der NoMix-Toiletten irgendwelche Probleme?

- ja  
 nein  
 Ich setze mich nie hin

24. Worin liegt Ihrer Meinung nach das Hauptproblem bei der Nutzung der NoMix-Toiletten-Anlagen? (Mehrfachnennung möglich)

- Hygiene  
 Spülung (Spülkraft)  
 Nutzung (zu „kompliziert“)  
 Design der Toilettenschüssel  
 es gibt keine Probleme  
 weiß nicht

24.1 Worauf sind Ihrer Meinung nach die vorhandenen Probleme zurückzuführen? (Mehrfachnennung möglich)

- mangelnde Wartung der Toilettenanlagen  
 unzureichende Reinigung  
 unsachgemäße Nutzung  
 sonstiges:

**Im Folgenden möchten wir Sie bitten, die NoMix-Toiletten mit konventionellen Toiletten zu vergleichen. Sie haben die Möglichkeit Ihre Angaben von „sehr viel besser“ bis zu „sehr viel schlechter“ abzustufen.**

25. Wie empfinden Sie den Gebrauch der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten?

- sehr viel besser  
 besser  
 ungefähr gleich  
 schlechter  
 sehr viel schlechter

26. Wie empfinden Sie die Sauberkeit der NoMix-Toiletten im Vergleich zu konventionellen Toiletten?

- sehr viel besser  
 besser  
 ungefähr gleich  
 schlechter  
 sehr viel schlechter

**Wir möchten Sie jetzt noch um einige allgemeine Einschätzungen bezüglich der NoMix-Toiletten bitten.**

27. Worin besteht Ihrer Meinung nach der **Haupt**vorteil der NoMix-Toiletten?

- Recycling von Urin (Wiederverwertung von Nährstoffen)
- Wassereinsparung
- Sonstiges:
- keine Vorteile
- weiß nicht

28. Halten Sie persönlich NoMix-Toiletten generell eher für

- eine insgesamt sinnvolle Entwicklung
- ein Vorbild für Entwicklungsländer
- einen Beitrag zum Umweltschutz
- eine technische Spielerei
- Sonstiges:
- weiß nicht

**Neben der Nutzung von NoMix-Toiletten in öffentlichen (Büro-) Gebäuden gibt es auch die Möglichkeit, diese Art der Toiletten in privaten Wohnungen zu installieren. Wir würden gerne erfahren, ob dies auch für Sie denkbar wäre.**

29. Könnten Sie sich vorstellen, NoMix-Toiletten in Ihrem Privathaushalt zu nutzen?

- ja, auf jeden Fall
- ja, vielleicht
- eher nicht
- auf keinen Fall
- weiß nicht

30. Aus welchem Grund würden Sie NoMix-Toiletten auch privat nutzen wollen?

- persönlicher Beitrag zum Umweltschutz
- Recycling von Nährstoffen
- Wassersparnis
- sonstige Gründe:
- trifft nicht zu

31. Welcher Grund wäre für Sie ausschlaggebend, NoMix-Toiletten nicht im Privathaushalt zu nutzen? (Mehrfachnennung möglich)

- hoher Anschaffungspreis
- höhere Unterhaltskosten
- mögliche Geruchsbelästigungen
- hygienische Bedenken
- sonstige Gründe:
- trifft nicht zu

**Die NoMix-Toiletten ermöglichen die getrennte Sammlung von Urin und Feststoffen sowie deren Weiterverwertung. Wir möchten Ihnen nun einige Fragen hierzu stellen.**

32. Wissen Sie, was mit dem gesammelten Urin geschieht?

- ja
- nein

33. Wie beurteilen Sie die Idee der getrennten Sammlung von Urin und Feststoffen zur Nutzung als Düngemittel?

- sehr gut
- gut
- schlecht
- sehr schlecht
- weiß nicht

34. Würden Sie Obst oder Gemüse kaufen, das entsprechend der Richtlinien der WHO mit diesen gewonnen Nährstoffen gedüngt worden ist?

- ja, auf jeden Fall
- vielleicht
- eher nicht
- nein, auf keinen Fall
- weiß nicht

35. Würden Sie nicht-essbare Produkte (wie z.B. Blumen, oder Baumwollprodukte) kaufen, die mit den aus der getrennten Sammlung gewonnenen Nährstoffen gedüngt worden sind?

- ja, auf jeden Fall
- vielleicht
- eher nicht
- nein, auf keinen Fall
- weiß nicht

36. Können Sie sich vorstellen, im privaten Bereich (Garten, Balkon) mit den aus der getrennten Sammlung gewonnenen Nährstoffen zu düngen?

- ja  
 ja, aber nur aus dem eigenen Haushalt  
 vielleicht  
 auf keinen Fall  
 weiß nicht

37. Sollte die Nutzung des über NoMix-Toiletten gewonnenen Urins auch im Biolandbau zugelassen werden?

- ja, uneingeschränkt  
 ja, aber nur unter strengen Auflagen/Kontrollen  
 ja, aber nur für Tierfutter  
 nein  
 weiß nicht

38. Glauben Sie der Einsatz von Urin in der Landwirtschaft könnte negativen Einfluss auf die Qualität des Trinkwassers haben?

- ja  
 nein  
 weiß nicht

**Jetzt möchten wir Ihnen noch einige Fragen zu Ihrer Person stellen, die uns bei der Auswertung der Befragung helfen.**

39. Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

- männlich  
 weiblich

40. Welche Nationalität haben Sie?

41. Wie alt sind Sie? Jahre

42. Welche fachliche Ausbildung haben Sie?

- Berufsausbildung  
 Fachhochschul- oder Universitätsausbildung

42a. Falls Sie eine Hochschulausbildung haben, nennen Sie bitte den höchsten Abschluss:

- Promotion  
 Diplom  
 Magister  
 Master  
 Bachelor  
 kein abgeschlossenes Hochschulstudium

43. Welchem Fachbereich ist Ihre Ausbildung zuzuordnen?

- naturwissenschaftlich  
 wirtschaftswissenschaftlich  
 ingenieurwissenschaftlich  
 sozialwissenschaftlich  
 kulturwissenschaftlich  
 sonstige:

44. entfällt (von früheren Befragungen)

45. entfällt (von früheren Befragungen)

46. Sie sind

- Angestellte/r mit administrativen Aufgaben (z.B. VSB, Office Management, IT, Verwaltung)  
 Angestellte/r in Projekten (z.B. Fachplaner, Auftragsverantwortlicher, Ländermanagement)  
 Praktikant/in

47. Sie arbeiten

- Vollzeit  
 Teilzeit

48. In welchem Stockwerk befindet sich Ihr Büro?

Im Stock

49. Haben Sie bereits an früheren Befragungen zur Nutzung der NoMix-Toiletten teilgenommen?

- ja  
 nein

Wenn ja, wann zuletzt?

**ZUSATZFRAGEN für Frauen:**

50. entfällt (von früheren Befragungen)

51. Können Sie in den NoMix-Toiletten Monatsbinden und Tampons problemlos entsorgen?

- ja  
 nein

50.1. Falls nein, worin bestanden die Probleme?

Antwort:

52. Wohin werfen Sie nach dem Urinieren das benutzte Papier?

- in den hinteren Teil der Toilettenschüssel  
 in den vorderen Teil der Toilettenschüssel

weiß nicht genau

53. Wären Sie bereit, das benutzte Papier auch in einen dafür bereitgestellten Mülleimer zu entsorgen?

- ja  
 nein

**ZUSATZFRAGEN für Männer:**

50. entfällt (von früheren Befragungen)

54. Nutzen Sie in den NoMix-Toiletten-Anlagen

- nur die wasserlosen Urinale  
 nur die NoMix-Toiletten  
 beides

55. Nutzen Sie zum Urinieren überwiegend

- die wasserlosen Urinale  
 die Toiletten  
 weiß nicht genau

56. Geht von den wasserlosen Urinalen in den NoMix-Toiletten-Anlagen eine Geruchsbelästigung aus?

- sehr viel stärker als bei konventionellen Urinalen  
 etwas stärker als bei konventionellen Urinalen  
 ungefähr gleich stark  
 etwas geringer als bei konventionellen Urinalen  
 sehr viel geringer als bei konventionellen Urinalen  
 Kann ich nicht beurteilen

57. Wie empfinden Sie den Gebrauch der wasserlosen Urinale im Vergleich zu konventionellen Urinalen?

- sehr viel besser  
 besser  
 ungefähr gleich  
 schlechter  
 sehr viel schlechter

58. Wie empfinden Sie die Sauberkeit der wasserlosen Urinale im Vergleich zu konventionellen Urinalen?

- sehr viel besser  
 besser  
 ungefähr gleich  
 schlechter  
 sehr viel schlechter

58.1 Halten Sie die aktuelle Reinigung / Wartung der wasserlosen Urinale durch das Reinigungspersonal für ausreichend?

- ja  
 nein  
 kann / will ich nicht beurteilen

**Abbildung 6.3.2: Fragebogen der Befragung von Landwirten und Konsumenten in gekürzter Form. Dargestellt sind nur Schlüsselfragen, die im Text Berücksichtigung fanden und diskutiert werden.**

<p style="text-align: center;">-1- ALLGEMEINE ANGABEN</p> <p>ALTER: <input type="checkbox"/> ≤20   <input type="checkbox"/> 20-30   <input type="checkbox"/> 30-40   <input type="checkbox"/> 40-50   <input type="checkbox"/> 50-60   <input type="checkbox"/> ≥60</p> <p>GESCHLECHT: <input type="checkbox"/> MÄNNLICH   <input type="checkbox"/> WEIBLICH</p> <p>SCHULABSCHLUSS: <input type="checkbox"/> HAUPTSCHULABSCHLUSS   <input type="checkbox"/> REALSCHULABSCHLUSS  <input type="checkbox"/> ABITUR   <input type="checkbox"/> (FACH-)HOCHSCHULABSCHLUSS</p> <p>BERUF: <input type="checkbox"/> LEHRE / AUSBILDUNG   <input type="checkbox"/> MEISTER</p>	<p style="text-align: center;">-31- WÜRDEN SIE EINEN DÜNGER, DER AUS URIN HERGESTELLT WURDE ZUR DECKUNG IHRES NÄHRSTOFFBEDARFS NUTZEN?</p> <p><input type="checkbox"/> GRUNDSÄTZLICH JA   <input type="checkbox"/> GRUNDSÄTZLICH NEIN</p> <p><input type="checkbox"/> MÖGLICHERWEISE, FALLS MÖGLICHERWEISE TEILEN SIE UNS BITTE MIT ZU WELCHEN KONDITIONEN _____</p>																																								
<p style="text-align: center;">-2- WELCHEN BETRIEBSZWEIGE BEWIRTSCHAFTEN SIE? MEHRFACHNENNUNGEN SIND MÖGLICH!</p> <p><input type="checkbox"/> ACKERBAU   <input type="checkbox"/> GRÜNLAND   <input type="checkbox"/> MILCHVEIHALTUNG</p> <p><input type="checkbox"/> RINDERMAST   <input type="checkbox"/> SCHWEINEPRODUKTION   <input type="checkbox"/> GEFÜGELHALTUNG/-PRODUKTION</p> <p><input type="checkbox"/> LEGEHENNENHALTUNG   <input type="checkbox"/> BIOGASANLAGE   <input type="checkbox"/> WINDKRAFTANLAGE</p> <p><input type="checkbox"/> PHOTOVOLTAIK   <input type="checkbox"/> DIREKTVERMARKTUNG   <input type="checkbox"/> URLAUB AUF DEM BAUERNHOF</p> <p><input type="checkbox"/> PENSIONSPFERDE   <input type="checkbox"/> SONSTIGES: _____</p>	<p style="text-align: center;">-32- WORMAN DENKEN SIE BEIM EINSATZ VON DÜNGEMITTELEN AUS URIN IN DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN ERZEUGUNG?</p> <p>A: KLIMASCHUTZ   <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</p> <p>B: GERUCHSBELÄSTIGUNG   <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</p> <p>C: ENERGIEUNABHÄNGIGKEIT VON ANDEREN LÄNDERN   <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</p> <p>D: SINKENDE IMMOBILIENPREISE   <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</p> <p>E: NACHHALTIGKEIT   <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</p> <p>F: RESSOURCENSCHUTZ   <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</p> <p>G: UMWELTSCHUTZ   <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</p> <p>H: SONSTIGES, NÄMLICH: _____</p>																																								
<p style="text-align: center;">-5- WIE GROSß IST IHR BETRIEB (ANGABE IN HA):</p> <p>_____</p>	<p style="text-align: center;">-34- GESETZT DEN FALL, SIE KÖNNTEN SICH DEN EINSATZ VON ORGANISCHEM DÜNGER AUS URIN VORSTELLEN, ZU WELCHEN KONDITIONEN WÜRDEN SIE DIESEN DÜNGER VERWENDEN?</p> <p><input type="checkbox"/> GLEICHER PREIS WIE SYNTHETISCH HERGESTELLTER MINERALDÜNGER</p> <p><input type="checkbox"/> GERINGERER PREIS ALS SYNTHETISCH HERGESTELLTER MINERALDÜNGER</p> <p><input type="checkbox"/> TEURER ALS SYNTHETISCH HERGESTELLTER MINERALDÜNGER</p>																																								
<p style="text-align: center;">-14- WIE BEWERTEN SIE UNSERE DERTZETIGES ABWASSERSORGANISATIONSSYSTEM? BITTE KREUZEN SIE AN, WAS IHNEN IN DEM ZUSAMMENHANG IN DEN SINN KOMMT. MEHRFACHNENNUNGEN SIND MÖGLICH</p> <p><input type="checkbox"/> FORTSCHRITTLICH   <input type="checkbox"/> VERALTET</p> <p><input type="checkbox"/> KEINE ANGABEN / VORSTELLUNG</p> <p><input type="checkbox"/> ICH KENNE NOCH ANDERE ANSÄTZE UND SYSTEME, NÄMLICH _____</p>	<p style="text-align: center;">-37- BEI WELCHEN DER FOLGENDEN MARKTFRÜCHTE UND KULTUREN WÜRDEN SIE DEN EINSATZ VON DÜNGER AUS URIN GENERELL AKZEPTIEREN UND IN WELCHER FORM?</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">FLÜSSIG</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">PULVER</td> </tr> <tr> <td>GETREIDE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> <td>GETREIDE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> <tr> <td>GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> <td>GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> </table>	FLÜSSIG	PULVER	GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN																																		
FLÜSSIG	PULVER																																								
GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN																																								
GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN																																								
<p style="text-align: center;">-24- WAS MEINEN SIE, IST DER EINSATZ VON URIN ALS DÜNGER GESUNDHEITLICH UNBEDENKLICH?</p> <p><input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN   <input type="checkbox"/> KEINE ANGABEN / VORSTELLUNG</p>	<p style="text-align: center;">-38- WELCHE DER FOLGENDEN MIT DÜNGER AUS URIN PRODUZIERTEN PRODUKTE/ LEBENSMITTEL WÜRDEN SIE KONSUMIEREN BZW. KAUFEN, WENN DIESE DURCH EIN PRÜFSIEGEL ALS UNBEDENKLICH AUSGEWIESEN WÄREN?</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">FLÜSSIG</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">PULVER</td> </tr> <tr> <td>GETREIDE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> <td>GETREIDE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> <tr> <td>GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> <td>GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA   <input type="checkbox"/> NEIN</td> </tr> </table>	FLÜSSIG	PULVER	GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN																																		
FLÜSSIG	PULVER																																								
GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GETREIDE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN																																								
GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN	GEWÜSE <input type="checkbox"/> JA <input type="checkbox"/> NEIN																																								
<p style="text-align: center;">-30- KREUZEN SIE BITTE AN, WELCHE EIGENSCHAFT IHRER MEINUNG NACH IM HINBLICK AUF DEN EINSATZ VON DÜNGER AUS URIN ÜBERWIEHT</p> <p>DEN EINSATZ VON DÜNGER AUS URIN ZUR LANDWIRTSCHAFTLICHEN ERZEUGUNG HALTE ICH FÜR:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20%;">SCHÄDLICH</td> <td><input type="checkbox"/> 1</td> <td><input type="checkbox"/> 2</td> <td><input type="checkbox"/> 3</td> <td><input type="checkbox"/> 4</td> <td><input type="checkbox"/> 5</td> <td><input type="checkbox"/> 6</td> <td><input type="checkbox"/> NÜTZLICH</td> </tr> <tr> <td>GEFÄHRLICH</td> <td><input type="checkbox"/> 1</td> <td><input type="checkbox"/> 2</td> <td><input type="checkbox"/> 3</td> <td><input type="checkbox"/> 4</td> <td><input type="checkbox"/> 5</td> <td><input type="checkbox"/> 6</td> <td>SICHER</td> </tr> <tr> <td>KONTROLLIERBAR</td> <td><input type="checkbox"/> 1</td> <td><input type="checkbox"/> 2</td> <td><input type="checkbox"/> 3</td> <td><input type="checkbox"/> 4</td> <td><input type="checkbox"/> 5</td> <td><input type="checkbox"/> 6</td> <td>UNKONTROLLIERBAR</td> </tr> <tr> <td>NATÜRLICH</td> <td><input type="checkbox"/> 1</td> <td><input type="checkbox"/> 2</td> <td><input type="checkbox"/> 3</td> <td><input type="checkbox"/> 4</td> <td><input type="checkbox"/> 5</td> <td><input type="checkbox"/> 6</td> <td>UNNATÜRLICH</td> </tr> <tr> <td>INDISKUTABEL</td> <td><input type="checkbox"/> 1</td> <td><input type="checkbox"/> 2</td> <td><input type="checkbox"/> 3</td> <td><input type="checkbox"/> 4</td> <td><input type="checkbox"/> 5</td> <td><input type="checkbox"/> 6</td> <td>INTERESSANTE IDEE</td> </tr> </table>	SCHÄDLICH	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> NÜTZLICH	GEFÄHRLICH	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	SICHER	KONTROLLIERBAR	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	UNKONTROLLIERBAR	NATÜRLICH	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	UNNATÜRLICH	INDISKUTABEL	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	INTERESSANTE IDEE	
SCHÄDLICH	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> NÜTZLICH																																		
GEFÄHRLICH	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	SICHER																																		
KONTROLLIERBAR	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	UNKONTROLLIERBAR																																		
NATÜRLICH	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	UNNATÜRLICH																																		
INDISKUTABEL	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	INTERESSANTE IDEE																																		