

Kaskadische Verwertung der Abwasser- und organischen Reststoffströme in Gebäuden

Abwasser-Kreislauf

E. Schriefl, E. Heiduk, W. Gabauer, L. Poschmaier-Kamarád, T. Heger,
S. Chauhan, G. Soja, C. Pfeifer, K. Udert, A. Keul, G. Stolle, J. Bogner, L.
Loacker

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

00/2025

Projektabschluss – publizierbarer Ergebnisbericht (in deutscher Sprache)

ACHTUNG!

Der Ergebnisbericht ist als in sich geschlossener Bericht zu verfassen, welcher **sinngemäß an eine breite Öffentlichkeit gerichtet ist**. Der Ergebnisbericht wird auf der Website www.fti-kreislaufwirtschaft.at publiziert.

Der Ergebnisbericht muss alle wesentlichen Informationen über Ziele, Inhalte, Ergebnisse, Schlussfolgerungen des Projektes und den Beitrag zur Programmlinie darstellen.

Der Umfang hat mindestens 25 Seiten (inklusive Deckblatt, Inhalts-, Abbildungs- und Tabellenverzeichnis) zu betragen.

Der Ergebnisbericht ist gemäß Vorlage ([KLW Vorlage für publizierbaren Ergebnisbericht](#)) zu erstellen, **alle Kapitel sind vollständig auszufüllen**. Unter diesem Link finden Sie auch eine Anleitung für die Gestaltung barrierefreier Endberichte in Microsoft Word.

Checkliste für Barrierefreiheit

Der öffentliche Dienst hat die gesetzliche Verpflichtung, sein Angebot im Internet barrierefrei zu gestalten. Dazu gehören nicht nur die Internetseiten selbst, sondern auch alle Dokumente, die zum Download angeboten werden. Word/PDF-Dokumente müssen in Bedienbarkeit, Gestaltung, Inhalt und technischer Umsetzung barrierefrei sein nach WCAG 2.1. Als Mindestlevel gilt Konformitätslevel AA. Zur Umsetzung der Barrierefreiheit nach WCAG 2.1 für PDF-Dokumente ist der ISO-Standard PDF/UA-1:2014 (DIN ISO 14289-1:2014-02) zu berücksichtigen.

Barrierefreie Dokumente enthalten:

- korrekte Strukturinformationen: logische Überschriftenstruktur, Verwendung von Formatvorlagen, Absätze, Listen, Tabelle, Hyperlinks, Notes (Fußnoten, Endnoten)
- automatisch erstelltes und verlinktes Inhaltsverzeichnis,
- Bilder mit Alternativtexten versehen, die erklären, was auf den Abbildungen zu sehen ist bzw. Diagramme im Fließtext gut beschreiben
- Bei Auflistungen und -zählungen die dafür vorgesehene Listen-Funktion in Word verwenden, Bei den Aufzählungszeichen nur Unicode-Symbole verwenden.
- Bei Tabellen müssen Überschriftenzeilen definiert sein und sie sollen möglichst keine verbundenen Zellen haben.
- Farben dürfen nicht als alleinige Informationsträger verwendet werden
- logische Lesereihenfolge
- Metadaten (Titel, Autor, Dokumentensprache)
- Lesezeichen beim pdf-Export

Checkliste für Urheberrecht

Die Autor:innen sind gefordert, in ihren Projektberichten das geltende Urheberrecht einzuhalten. Beim Einbinden fremder urheberrechtlich geschützter Werke (Texte, Bildmaterialien wie Grafiken, Karten, Fotos) in eigene Werke, kommen verstreute Abschnitte und Paragraphen des geltenden Urheberrechtsgesetzes zur Anwendung.

Um Projektnehmer:innen beim Einhalten des Urheberrechts zu unterstützen, sind die wichtigsten Punkte im **ANNEX I des Leitfadens zur Berichtslegung und projektbezogenen Öffentlichkeitsarbeit** zusammengefasst.

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: Volker Schaffler

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Kaskadische Verwertung der Abwasser- und organischen Reststoffströme in Gebäuden

Abwasser-Kreislauf

DI Dr. Ernst Schriefl, DI Ernst Heiduk MEng.
Schöberl & Pöll GmbH

DI (FH) Mag. Wolfgang Gabauer, Luděk Poschmaier-Kamarád, Ph.D., Thomas Heger, B.Sc., Mag.
Sanjay Chauhan, MSc., Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU University

Priv.-Doz. DI Dr. Gerhard Soja, M.Sc., Univ.Prof. DI Dr. Christoph Pfeifer,
Institut für Verfahrens- und Energietechnik (IVET), BOKU University

Prof. Dr. Kai Udert
Eawag, Abteilung Verfahrenstechnik, ETH Zürich

Assoc.Prof.i.R. Dr. Alexander G. Keul

Gero Stolle
Laufen Bathrooms AG

Johanna Bogner, MEng., Lucas Locker, MSc.
AAT Abwasser- und Abfalltechnik GmbH

Ein Projektbericht im Rahmen der



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Wien, Jänner 2025

Vorwort

Das 21. Jahrhundert stellt die Menschheit vor enorme Herausforderungen. Klimakrise, Umweltverschmutzung, die Zerstörung von Ökosystemen und der damit einhergehende Biodiversitätsverlust sowie die zunehmende Verknappung endlicher Ressourcen zeigen die Grenzen linearen Wirtschaftens auf und machen ein Umdenken notwendig. Nachhaltigen Wirtschaftskonzepten, wie jenen der Kreislaufwirtschaft oder der Bioökonomie, wird zur Lösung der genannten Herausforderungen eine entscheidende Rolle zugesprochen.

In einer kreislauforientierten Wirtschaft etwa werden Rohstoffe sowie die daraus produzierten Güter möglichst ressourcenschonend hergestellt, die Lebensdauer der Erzeugnisse prolongiert sowie deren Nutzung intensiviert, um so Energie- und Ressourcenverbrauch, Abfallaufkommen und Schadstoffausstoß auf ein Minimum zu reduzieren. Erst wenn Produkte nicht mehr anderweitige Verwendung finden, werden diese dem Abfallstrom zugeführt um daraus durch Recycling Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Jene Abfälle, die sich – z.B. aufgrund ihres Schadstoffgehalts – nicht zur stofflichen Verwertung eignen, können unter anderem energetisch genutzt werden.

In Ergänzung dazu steht die Bioökonomie – ein Konzept, das in möglichst allen Bereichen und Anwendungen fossile Ressourcen durch nachwachsende Rohstoffe ersetzen soll. Aber auch biogene Ressourcen sind nicht unbegrenzt verfügbar. Daher ist es sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen notwendig, Biomasse möglichst vollständig zu verwerten, beziehungsweise Konzepte zu entwickeln, die eine ressourceneffiziente Nutzung berücksichtigen und höhere Wertschöpfung erzielen. Zugleich soll auch hier eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft unterstützt werden, welche – neben der kaskadischen Nutzung – auf die Rückführung von biogenem Material in den Produktionskreislauf, die Verwertung von Reststoffen und eine vollständige Schließung des Kohlenstoffkreislaufs abzielt.

Für eine Transformation unseres linearen Wirtschaftssystems hin zur Kreislaufwirtschaft sind neue technologische Ansätze, innovative Geschäftsmodelle, systemisches interdisziplinäres Denken, enge Vernetzung der Akteure und verbessertes Informationsmanagement notwendig.

Um diese Umgestaltung zu unterstützen, fördert das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) gezielt angewandte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Schwerpunkt Kreislaufwirtschaft, mit dem Ziel Innovationen anzustoßen und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit des österreichischen Wirtschaftsstandorts zu stärken.

Der vorliegende Bericht dokumentiert in umfassender Weise die Ergebnisse eines F&E-Projektes, gefördert im Rahmen der FTI Initiative Kreislaufwirtschaft der Sektion Innovation und Technologie im BMK. Unsere Motivation ist es, kontinuierlich Ergebnisse geförderter Projekte zentral, themenübergreifend und öffentlich zugänglich zu machen. Damit wollen wir einen Anstoß zur Lösung unserer großen gesellschaftlichen Herausforderungen geben und folgen dem Ziel des BMK, unter der Initiative „open4innovation“ (www.open4innovation.at) die Basis für Vernetzung und für die Gestaltung von Neuem zu schaffen.

René ALBERT

Koordinator des FTI-Schwerpunktes Kreislaufwirtschaft

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	9
2	Abstract	11
3	Ausgangslage	13
	3.1. Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung.....	13
	3.2. Stand der Technik / Stand des Wissens	14
4	Projekthalt	17
	4.1. Vorgangsweise und Methodik	17
	4.2. Umsetzung der Methodik und aufgetretene Probleme	19
5	Ergebnisse	20
	5.1. Aufbau und Betrieb des Biogasreaktors im Labormaßstab	20
	5.1.1. Aufbau der Laboranlage	20
	5.1.2. Sammlung des Inputmaterials für Analysen und den Versuchsbetrieb der Laboranlage.....	22
	5.1.3. Ergebnisse der Laborversuche.....	24
	5.2. Aufkonzentrierungsversuche	32
	5.3. Behandlung des „festen“ (eingedickten) Gärrests.....	36
	5.4. Behandlung des flüssigen Gärrests.....	41
	5.5. Energiebilanz der Biogaserzeugung.....	52
	5.6. Sozialwissenschaftliche Untersuchungen	56
	5.6.1. Befragung der Belegschaft am Produktionsstandort Gmunden (Fa. Laufen)	56
	5.6.2. Online-Befragung (Kammerhof-Museum Gmunden).....	58
	5.6.3. Online-Befragung (Kreativ-Campus Atelier Gardens, Berlin Tempelhof).....	60
	5.7. Anwendungsszenarien und Umsetzungsempfehlungen	61
	5.7.1. Fallstudien zur Systemintegration	61
	5.7.2. Stofflich-energetische Nutzung von Speiseabfällen	68
	5.7.3. Empfehlungen zur Umsetzung in Neu- und Bestandsbauten	70
	5.8. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen der FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft	72
6	Schlussfolgerungen	73
7	Ausblick und Empfehlungen	76
8	Verzeichnisse	77
9	Anhang	83
	9.1. Data Management Plan (DMP)	83
	9.2. Weitere Anhänge	90
	9.2.1. Fragebogen für die Befragung der Belegschaft im Werk Gmunden der Fa. Laufen..	90
	9.2.2. Online-Umfrage Kammerhof-Museum Gmunden, Sonderausstellung „Klo & So“ ...	91
	9.2.3. Online-Umfrage Kreativ-Campus Atelier Gardens, Berlin Tempelhof.....	93

1 Kurzfassung

Ausgangssituation, Problematik und Motivation zur Durchführung des Projekts

Unser derzeitiges Abwassersystem ist sehr gut entwickelt, aber noch kein nachhaltiges Kreislaufsystem. Nährstoffe, die über menschliche Ausscheidungen in das Abwasser eingebracht werden, können nur mehr teilweise in die Nahrungsmittelproduktion rückgeführt werden, da es in den Klärwerken schon zu viele Verunreinigungen gibt. Aus dem Klärschlamm können nur mehr die Phosphate rückgewonnen werden. Auch der biogene Energiegehalt der Stoffe im Abwasser kann durch die aerobe Behandlung im Klärwerk nur teilweise gut genutzt werden. Die (oft nassen) biogenen Speisereste der Haushalte werden überwiegend über den Restmüll entsorgt und ebenfalls verbrannt, womit die enthaltenen Nährstoffe verloren gehen. Rund die Hälfte des Energieinhalts der organischen Abwasserbestandteile geht auf ihrem Weg zur Kläranlage verloren. Der schon in den Kanalrohren stattfindende Abbau emittiert Methan. Die Verbrennung nasser Abfälle benötigt zusätzliche Energie.

Projekthinhalte und methodische Vorgehensweise

Mit Hilfe von Laborversuchen wurde ein innovatives gebäudeintegriertes Stoff- und Energiekreislaufsystem (im Labormaßstab) erprobt, mit folgenden Schwerpunkten:

- Vergärung von Braunwasser (Mischung aus Wasser, Fäkalien und Toilettenpapier) in Batch-Versuchen sowie im kontinuierlichen Langzeitbetrieb mit einem dreistufigen Laborreaktor. Neben der kontinuierlichen Erfassung des Biomethanertrags (ohne und mit Zugabe von Speiseresten) wurden auch Versuche zur Abbaubarkeit von Medikamenten durchgeführt.
- Optimierung der Fest-/Flüssigtrennung, Durchführen von Aufkonzentrationsversuchen.
- Behandlung des eingedickten Gärrests mit Pyrolyse und HTC (hydrothermale Karbonisierung) zur Herstellung von Karbonisaten, welche sich als landwirtschaftlicher Dünger eignen.
- Testen der Eignung des flüssigen Gärrests für eine Verwendung im VUNA-Verfahren (zur Nährstoffrückgewinnung) mit verschiedenen Mischungen aus flüssigem Gärrest und Gelbwasser.

Das Ausgangssubstrat (Braunwasser) wurde aus einer Trenntoilettenanlage (Produkt Laufen SAVE!) gewonnen, welche im Zuge des Projekts am Produktionsstandort Gmunden der Firma Laufen installiert wurde. Regelmäßige Substrat-Transporte fanden vom Standort der Trenntoilettenanlage zum Standort der Biogas-Laboranlage am IFA Tulln statt. Hier wurden im Zuge des kontinuierlichen Anlagenbetriebs mehrere Gärrestproben gewonnen, welche teilweise am IFA Tulln (im Fall der eingedickten Gärreste) sowie an der Eawag (Dübendorf, Schweiz) im Fall der flüssigen Gärreste weiterbehandelt und - analysiert wurden.

Weitere Projekthinhalte bestanden in einer Evaluierung der Nutzer:innenakzeptanz der SAVE! Trenntoiletten mit Hilfe von drei Erhebungen (zwei davon online-basiert), einer Energiebilanzierung und der Entwicklung von Anwendungsszenarien.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Der Biomethanertrag im kontinuierlichen Ausgärversuch von Braunwasser betrug 254 Liter/kg Organische Trockensubstanz (OTS) im Vergleich zum Biomethanertrag im Batch-Test von 287 bis 403

Liter/kg OTS. Die Differenz lässt sich teilweise durch technische Schwierigkeiten im Anlagenbetrieb erklären.

Eine effiziente Abtrennung des Spülwassers (aus der Trenntoilette) von den Feststoffen (Mischung Fäkalien und Toilettenpapier) stellt den wichtigsten Faktor zur Erhöhung der Biogasausbeute und zur Senkung des Energieinputs dar. Die Versuche im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass eine Aufkonzentrierung des Braunwassers mittels Flockung und Absetzung sehr aufwendig ist und den Trockensubstanzgehalt von rund 0,5 % auf maximal 3,0 % erhöhen kann. Auch kann im abgetrennten Überstand ein relativ hoher Nährstoffgehalt verloren gehen. Deshalb wird empfohlen, den Wassereintrag beispielsweise durch Einsatz von Vakuum-Toiletten zu minimieren und weiterführende Forschungen zur Fest-Flüssigtrennung zu betreiben.

Bei der Weiterbehandlung des eingedickten Gärrests ergab sich, dass die milderen Prozessbedingungen einer hydrothermalen Karbonisierung (HTC) im Vergleich zur Pyrolyse geringere Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff zur Folge hatten. Insbesondere bei einer pyrolytischen Karbonisierung des Gärrests kann eine Anreicherung von Spurenelementen dazu führen, dass Grenzwerte für eine (an und für sich wünschenswerte) landwirtschaftliche Anwendung des Pyrolyseprodukts überschritten werden. Daher ist darauf zu achten, dass nicht durch vorhergehende Prozessschritte die Konzentrationen von Spurenelementen erhöht worden sind.

Eine gemeinsame Behandlung von Urin und flüssigen Gärresten für die Produktion von Flüssigdünger hat sich als nicht besonders aussichtsreich erwiesen. Zwar kann etwas mehr Stickstoff und Kalium zurückgewonnen werden, aber es treten auch Phosphorverluste auf und der Energiebedarf steigt wegen des höheren Wasseranteils wesentlich. Diese Erkenntnis ist besonders dann wichtig, wenn mit dem Düngerverkauf der Betrieb der Anlage mitfinanziert wird. Falls der primäre Fokus aber auf der Wasserrückgewinnung liegt, kann eine gemeinsame Behandlung von Urin und Gärresten dennoch interessant sein.

Bei einer Gegenüberstellung der energetischen Inputs für den Betrieb der Biogasanlage mit dem Biomethanertrag ergibt sich eine positive Energiebilanz, die sich mit steigender Gebäudegröße erhöht. Der gesamte, von der Gebäudegröße bzw. Bewohner:innenanzahl abhängige Nettoenergieertrag (d.h. nach Abzug des Energieinputs) mit rund 0,2 kWh pro Person und Tag (bzw. ca. 0,1 kWh Netto-Stromausbeute pro Person und Tag) kann einen Beitrag zur Grundlastdeckung für das Gebäude leisten.

Die im Projekt durchgeführten sozialwissenschaftlichen Evaluationen des innovativen SAVE!-Trenn-WCs zeigen eine freundliche, interessierte Nutzer:innen- und Publikumsbeurteilung des Produkts, sodass dessen weiterer Einsatz in der Öffentlichkeit erfolgreich sein dürfte.

Ausblick

Weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten vor allem auf eine Optimierung verschiedener Prozesse wie Fest-/Flüssigtrennung (mit möglichst einfacher Technologie), Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus den Gärresten oder die Entwicklung von praxistauglichen Düngerprodukten fokussieren.

Hinsichtlich einer Erhöhung des Potenzials für die wirtschaftliche Umsetzung und Markteinführung von Systemen, wie sie im Projekt untersucht wurden, ist vor allem von Bedeutung, dass sie in Richtung Anwendbarkeit und Kostenreduktion verbessert werden. Auch die verschiedenen rechtlichen Hemmnisse sind durch geeignete Schritte (wie Genehmigungsverfahren von Düngerprodukten) zu adressieren.

2 Abstract

Initial situation and motivation for carrying out the project

Our current wastewater system is very well developed, but is not yet a sustainable recycling system. Nutrients that are introduced into the wastewater via human excrement can only be partially recycled into food production, as there is already too much contamination in the sewage treatment plants. Only the phosphates can be recovered from the sewage sludge. The biogenic energy content of the substances in the wastewater can also only be partially utilized by the aerobic treatment in the sewage treatment plant. The (often wet) biogenic food waste from households is mainly disposed of with the residual waste and also incinerated, which means that the nutrients it contains are lost. Around half of the energy content of the organic wastewater components is lost on its way to the sewage treatment plant. The decomposition that already takes place in the sewer pipes emits methane. The incineration of wet waste requires additional energy.

Project content and methodological approach

An innovative building-integrated system for wastewater treatment was tested on a laboratory scale, with the following focal points:

- Fermentation of brown water (mixture of water, faeces and toilet paper) in batch tests as well as in continuous long-term operation with a three-stage laboratory reactor.
- Optimization of solid/liquid separation, carrying out specific tests.
- Treatment of the thickened digestate with pyrolysis and HTC (hydrothermal carbonization) to produce carbonates suitable for use as agricultural fertilizer.
- Testing the suitability of the liquid digestate for use in the VUNA process (for nutrient recovery) with various mixtures of liquid digestate and yellow water.

The source substrate (brown water) was obtained from a separation toilet system (model Laufen SAVE!), which was installed at Laufen's Gmunden production site as part of the project. Substrate was regularly transported from the location of the separating toilet facility to the biogas laboratory plant at the IFA Tulln. In the course of continuous plant operation, several fermentation residue samples were obtained here, some of which were further treated and analyzed at IFA Tulln (in the case of the thickened fermentation residues) and at Eawag (Dübendorf, Switzerland) in the case of the liquid fermentation residues.

Other project content included an evaluation of user acceptance of the SAVE! separating toilets with the help of three surveys (two of which were online-based), an energy balance of the biogas plant and the development of application scenarios.

Results and conclusions

The biomethane yield in the continuous fermentation test of brown water was 254 liters/kg organic dry matter (ODM) compared to the biomethane yield in the batch test of 287 to 403 liters/kg ODM. The difference can be partly explained by technical difficulties in plant operation.

Efficient separation of the flushing water (from the separating toilet) from the solids (mixture of faeces and toilet paper) is the most important factor for increasing the biogas yield and reducing the energy input. The project trials have shown that concentrating the brown water by means of flocculation and sedimentation is very costly and can increase the dry matter content from around 0.5% to a maximum of 3.0%. A relatively high nutrient content can also be lost in the separated supernatant. It is therefore recommended to minimize the water input, for example by using vacuum toilets, and to carry out further research into solid-liquid separation.

Further treatment of the thickened digestate showed that the milder process conditions of hydrothermal carbonization (HTC) resulted in lower losses of carbon and nitrogen compared to pyrolysis. Particularly in the case of pyrolytic carbonization of the fermentation residue, an accumulation of trace elements can lead to exceeding limit values for an agricultural application of the pyrolysis product (which is desirable in itself). Care must therefore be taken to ensure that the concentrations of trace elements have not been increased by previous process steps.

A joint treatment of urine and liquid digestate for the production of liquid fertilizer has not proven to be particularly promising. Although slightly more nitrogen and potassium can be recovered, phosphorus losses also occur and the energy requirement increases significantly due to the higher water content. This finding is particularly important if the sale of fertilizer is used to co-finance the operation of the plant. However, if the primary focus is on water recovery, joint treatment of urine and fermentation residues can still be interesting.

A comparison of the energy inputs for the operation of the biogas plant with the biomethane yield results in a positive energy balance, which increases with increasing building size. The total net energy yield (i.e. after subtracting the energy input) of around 0.2 kWh per person per day (or approx. 0.1 kWh net electricity yield per person per day), which depends on the size of the building and the number of residents, can make a contribution to covering the base load for the building.

The social science evaluations of the innovative SAVE! separating toilet, carried out as part of the project, show a friendly, interested user and public assessment of the product, meaning that its continued use by the public is likely to be successful.

Outlook

Further research and development work should focus primarily on optimizing various processes such as solid/liquid separation (with simple technologies), processes for recovering nutrients from fermentation residues or the development of practical fertilizer products.

With regard to increasing the potential for the economic implementation and market launch of systems such as those investigated in the project, it is particularly important that they are improved in terms of applicability and cost reduction. The various legal obstacles must also be addressed through suitable steps (such as approval procedures for fertilizer products).

3 Ausgangslage

3.1. Ausgangssituation, Motivation und Zielsetzung

Die Behandlung von Abwässern geht im Weltmaßstab mit gravierenden ökologischen Problemen einher. In den hochindustrialisierten Ländern, wie Österreich, konnten die Probleme durch vergleichsweise sehr gut entwickelte Abwasser- und Klärsysteme minimiert werden. Trotzdem ist für viele Stoffe und Ressourcen noch kein Kreislauf möglich und einige Problemstoffe können nicht vollständig entfernt werden. Dies betrifft folgende Teilaspekte:

- Die hohe Belastung mit Problemstoffen macht die Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen aus Abwasser und Klärschlamm in Klärwerken schwierig und derzeit nur für Phosphate aus der Klärschlammasche möglich.
- Problemstoffe wie Medikamenten-, Drogen- und Hormonrückstände können nicht vollständig aus dem geklärten Wasser entfernt werden.
- Meist nasse Speisereste der Haushalte werden derzeit mit dem Restmüll verbrannt, wodurch Nährstoffe verloren gehen und aufgrund des Wasseranteils zusätzliche Verbrennungsenergie aufzuwenden ist.
- Derzeit geht rund die Hälfte des Energieinhalts der organischen Abwasserbestandteile (für eine eventuelle Biogasgewinnung) auf ihrem Weg zur Kläranlage verloren. Der schon in den Kanalrohren stattfindende Abbau emittiert Methan. Eine dezentrale Nutzung wäre klimafreundlicher und energieeffizienter.
- Die Produktion von Kunstdünger ist sehr energie- und CO₂-intensiv. Rückgewonnene Pflanzennährstoffe würden diesen Aufwand reduzieren.

Zielsetzungen

Mit Hilfe von Versuchen im Labormaßstab sollte ein innovatives gebäudeintegriertes Stoff- und Energiekreislaufsystem erprobt werden. Dabei wurde zunächst der Toiletten-Abwasserstrom unter Anwendung neuartiger Trenntoiletten (Produkt Laufen SAVE!) in einen Braunwasser- und einen Gelbwasserstrom getrennt. Aus dem Braunwasserstrom, der aus einer Mischung aus Wasser, Fäkalien und Toilettenpapier besteht, sollen Energie und Nährstoffe rückgewonnen werden. Dazu wurde eine Reihe von Versuchen mit folgenden Schwerpunkten durchgeführt:

- Vergärung von Braunwasser in Batch-Versuchen sowie im kontinuierlichen Langzeitbetrieb mit einem dreistufigen Laborreaktor. Neben der kontinuierlichen Erfassung des Biomethanertrags (ohne und mit Zugabe von Speiseresten) sollen auch Versuche zur Abbaubarkeit von Medikamenten im Gärprozess durchgeführt werden.
- Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Methoden der Fest-/Flüssigtrennung bzw. der Aufkonzentrierung.
- Behandlung des eingedickten Gärrests mit den Verfahren Pyrolyse und HTC (hydrothermale Karbonisierung). Vergleich der beiden Verfahren hinsichtlich Zusammensetzung der Karbonisate und Eignung als landwirtschaftlicher Dünger.

- Testen der Eignung des flüssigen Gärrests für eine Verwendung im VUNA-Verfahren (zur Nährstoffrückgewinnung) mit verschiedenen Mischungen aus flüssigem Gärrest und Gelbwasser.

Weitere Zielsetzungen bestanden in

- einer Evaluierung der Nutzer:innenakzeptanz der neuartigen SAVE-Trenntoiletten und von Produkten (in Form von Dünger), die am Ende der Prozessschritte entstehen sollen,
- einer Energiebilanzierung in Form einer Gegenüberstellung der energetischen Inputs der Biogasanlage mit dem resultierenden Biomethanertrag und dem daraus produzierten Strom durch eine Brennstoffzelle,
- der Entwicklung und Bewertung von Anwendungsszenarien.

3.2. Stand der Technik / Stand des Wissens

Separationstoiletten

Im Rahmen des großen internationalen Wettbewerbs „Reinventing the Toilet“ der Bill & Melinda-Gates-Foundation wurde eine neuartige Trenntoilette entwickelt. Wenn Urin und Fäkalien nicht vermischt werden, ist deren weitere Aufbereitung deutlich leichter. Diese WC-Schale (<https://www.de.laufen.com/kollektionen/produktlosungen/save>), die vom Schweizer Projektpartner Eawag (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung & Gewässerschutz) und dem Wiener Design-Büro EOOS entwickelt wurde, wird seit 2019 von der Fa. Laufen unter dem Produktnamen SAVE! produziert.

Optisch ist kaum ein relevanter Unterschied zu normalen WC-Schalen erkennbar und es ist (im Vergleich zu früheren Formen von „No-Mix“ Toiletten) keine Änderung im Verhalten der Nutzer:innen notwendig (abgesehen von einer generellen Nutzung der Trenntoilette im Sitzen). Die Urinseparierung wird durch eine ausgeklügelte Geometrie im Inneren des Keramikbeckens, ganz ohne mechanische oder elektronische Hilfsmittel erreicht. Mittels einer in den Keramikkörper integrierten „Urinfalle“ wird der Urin unter Ausnutzung der Oberflächenspannung, dem so genannten Teekannen-Effekt, in Richtung eines eigenen Auslasses geleitet und somit separiert. Feststoffe, Toilettenpapier und das Spülwasser werden wie gewohnt über den bekannten Abfluss entsorgt.

Dieses Produkt, das ursprünglich für eine bessere Sanitärsituation in den Entwicklungsländern entwickelt wurde, hat das Potenzial, die Sanitär-Installationstechnik und Abwassertechnik hinsichtlich höherer Nachhaltigkeit in allen Ländern zu verändern. Ein Beispielgebäude dafür ist das NEST Gebäude der Eawag und Empa in Dübendorf (CH) bei dem ein nachhaltiges Kreislaufsystem erprobt wird (Urinseparierung mit SAVE! Trenntoiletten und nachfolgende Nährstoffrückgewinnung mit dem Vuna Verfahren).

Biogasgewinnung aus Braunwasser und Speiseresten

Die Gewinnung von Biogas aus (teilweise) fäkalhaltigem Abwasser und Speiseresten wird mit Low-tech-Konzepten in vielen Entwicklungsprojekten (in warmen Ländern) praktiziert. Eine hygienisch

einwandfreie Umsetzung im städtischen Gebiet ist etwas anspruchsvoller und es gab schon einige Projekte, die das, bislang noch nicht zufriedenstellend, erprobt haben.

Folgende zu bearbeitende Problemstellungen / Herausforderungen ergeben sich dabei:

- Wahl des grundsätzlichen Reaktordesigns: Mögliche Optionen in dieser Hinsicht sind eine eventuelle mehrstufige Fermentierung, die Wahl eines Baffled-Tank Reaktors, u.a.
- Wahl des passenden Temperaturniveaus: In Österreich werden Biogasanlagen in der Regel mesophil (37 °C +/- 2 °C) geführt, da sie bei dieser Betriebsweise meist stabiler laufen. Nur wenige Anlagen werden thermophil (55°C +/- 2 °C) gefahren. Der Nachteil des thermophilen Prozesses ist eine geringere Stickstofftoleranz, dessen Vorteil ist ein mitunter schnellerer Prozess und eine verbesserte Abtötung von pathogenen Keimen.
- Skalierbarkeit des Anlagendesigns: Landwirtschaftliche Biogasanlagen werden vergleichsweise großvolumig ausgeführt (das Volumen der Reaktoren liegt im Bereich einiger hundert bis tausend Kubikmeter). Eine Herausforderung liegt im Herunterskalieren der Anlagen auf ein Volumen der Reaktoren (Fermenter) auf die Größe von einigen Kubikmetern, wie das für gebäudeintegrierte Anlagen benötigt würde.

Rückgewinnung von Stickstoff aus Urin

Für die Rückgewinnung von Stickstoff aus Urin gibt es verschiedene Verfahren. Am weitesten entwickelt ist das patentierte Vuna Verfahren, das an der Schweizer Eawag entwickelt wurde und von der VunaNexus AG in verschiedenen Projekten implementiert wurde und wird.

Das Vuna Verfahren setzt eine Abtrennung des Urins (bzw. Gelbwassers) voraus und besteht aus den Prozessschritten Stabilisierung, Filterung und Aufkonzentrierung durch Verdampfung. Der frische Urin wird im ersten (biologischen) Verfahrensschritt nitrifiziert und damit stabilisiert. Dadurch ist er geruchlos und es entstehen keine schädlichen Nitrite. In der biologischen Behandlung werden auch bis zu 90 % der organischen Stoffe abgebaut. Da ein Großteil der Problemstoffe in den menschlichen Ausscheidungen (Medikamenten-, Hormon- und Drogenrückstände) im Urin enthalten ist, werden diese im zweiten Verfahrensschritt durch Adsorption an granulierter Aktivkohle effizient aus dem Urin herausgefiltert und gelangen so nicht mehr über die Kläranlagen in die Gewässer. Im letzten Prozessschritt wird das Wasser verdampft und so ein flüssiges Düngerkonzentrat (Produktname Aurin) gewonnen.

Karbonisierung von Braunwasser

Braunwasser enthält signifikante Konzentrationen von Phosphor und Kalium, welche durch Rezyklierung wieder in den Stoffkreislauf eingebracht werden könnten. Stickstoff spielt eine geringere Rolle, da dieser primär im Gelbwasser enthalten ist. Durch Braunwasser werden pro Person und Jahr rund 0,2 – 0,3 kg Phosphor und 0,3 – 0,6 kg Kalium abgegeben. Bei der Kompostierung von Fäkalien oder der Nutzung von Braunwasser in einer Biogas-Anlage bleiben zwar die wesentlichen Nährstoffe erhalten bzw. werden gasförmige Energieträger produziert, doch wird die erforderliche Hygienisierung der Materialien für eine weitere Verwendung nur unvollständig erreicht. Als weitere Verfahrensschritte sind daher Karbonisierungsprozesse wie die hydrothermale Karbonisierung (HTC; „wässrige Verkohlung“) und Pyrolyse erforderlich.

Beiden Karbonisierungsverfahren ist gemeinsam, dass sie mit höheren Temperaturen arbeiten, als sie bei Kompostierung oder Vergärung erzielt werden können. Die im Rahmen der HTC üblicherweise erreichten 180-250 °C bei erhöhten Drücken (10-40 bar) reichen dabei aus, pathogene Mikroorganismen zu deaktivieren und dadurch eine Hygienisierung des Brauwassers und seiner Folgeprodukte zu erzielen. Frühere Arbeiten zur hydrothermalen Karbonisierung von Brauwasser und Klärschlamm wiesen bereits darauf hin, dass im Rahmen der HTC-Verfahrensbedingungen höhere Temperaturen zu einer höheren Umwandlungsrate zu dem Produkt Hydrokohle führt.

In bisherigen Forschungsarbeiten wurde die prinzipielle Eignung von Brauwasser für Karbonisierungsverfahren und die Herstellung nutzbarer Produkte für Landwirtschaft und Umwelttechnik nachgewiesen. Eine weitere Aufwertung der Produkte ist durch geeignete Verfahrenskombinationen und Zusatzbehandlungen möglich, um optimale Nährstoffzyklisierung zu erzielen.

In welcher Weise die anaerobe Vergärung zur Biogas-Herstellung mit Karbonisierungsschritten kombiniert werden kann, um sowohl energetisch als auch stofflich maximale Effizienz der Produktnutzung zu erzielen, ist eine bisher unbeantwortete Forschungsfrage und wurde daher im Rahmen dieses Projektes untersucht.

Akzeptanz der Nutzer:innen

Neuartige Hygienekonzepte zur nachhaltigen Abwasserentsorgung wurden im deutschsprachigen Raum seit etwa dem Jahr 2000 punktuell auf ihre Nutzerakzeptanz evaluiert (bisherige Untersuchungen fokussierten auf andere Bauweisen von No-Mix Toiletten). Neben Off Grid-Lösungen (und Projekten für Entwicklungsländer) wurden auch einige Demonstrationsbauten und Siedlungen untersucht. Angelpunkt für die erfolgreiche Implementation technologischer Lösungen ist ihre Nutzerakzeptanz. Technologieumstellung ohne hinreichende Erkundung, Erklärung und Begleitung kann zum Scheitern eines Sanitärrecyclingprojekts führen.

4 Projektinhalt

4.1. Vorgangsweise und Methodik

Das Ausgangssubstrat (Braunwasser) für die nachfolgenden Laborversuche und den Betrieb der Biogas-Laboranlage wurde aus einer Trenntoilettenanlage (Produkt Laufen SAVE!) gewonnen, welche im Zuge des Projekts am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen installiert wurde. Regelmäßige Substrat-Transporte fanden vom Standort der Trenntoilettenanlage zum Standort der Biogas-Laboranlage am IFA Tulln statt. Hier wurden im Zuge des kontinuierlichen Anlagenbetriebs auch mehrere Gärrestproben gewonnen, welche teilweise am IFA Tulln selbst (im Fall der eingedickten Gärreste) sowie an der Eawag (Dübendorf, Schweiz) im Fall der flüssigen Gärreste weiterbehandelt und -analysiert wurden.

Aufbau und Betrieb der Biogas-Laboranlage

Die Biogas-Laboranlage wurde an der BOKU am IFA Tulln aufgebaut und in Betrieb genommen. Da zu Beginn des Betriebs der Laboranlage deren endgültiges Design noch nicht feststand, wurde diesbezüglich experimentiert und das Design der Anlage und auch die Betriebsweise im Zuge des Projekts weiterentwickelt und optimiert.

Die Anlage wurde regelmäßig beprobt und analysiert. Neben der standardisierten Prozessbegleitung von Biogasanlagen (pH-Messung, qualitative und quantitative Gasmessung, Messung der freien organischen Säuren) wurde auch die mikrobiologische Zusammensetzung sowie Konzentrationen von Medikamentenrückständen untersucht. Zusätzlich wurde Gärrest für die verschiedenen Schritte zur weiteren Verarbeitung (siehe unten) gewonnen und zur Verfügung gestellt. Hinsichtlich der Betriebsweise der Laboranlage wurden verschiedene Szenarien untersucht: An- und Abfahrbetrieb, Co-Fermentation mit Speiseabfällen sowie unterschiedliche Betriebsführung (bspw. Stoßbelastung) und deren Wirkung auf die Mikrobiologie sowie auf das Abbauverhalten.

Aufkonzentrierungsversuche

Im Projekt wurde auch ein Schwerpunkt auf die experimentelle Untersuchung verschiedener Trenn- bzw. Aufkonzentrierungstechnologien gelegt. Neben einfachen Absetzversuchen (mit und ohne Zugabe des Flockungsmittels Eisen(III)-chlorid) wurden am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen auch zwei etwas komplexere Versuche zur Aufkonzentrierung des nach der Trenntoilette gesammelten Braunwassers mit zwei Filtertechnologien durchgeführt:

- Schrägfilter SF 500 der Fa. Leiblein
- Rotationsfilter RoSL der Firma Assonic

Für diese Versuche wurde das in IBC-Tanks gesammelte Braunwasser zunächst mit Eisen(III)-chlorid geflockt, um den Feinpartikelanteil zu reduzieren und anschließend wurde das gesamte Volumen mit der jeweiligen Filtertechnologie (Schrägfilter und Rotationsfilter) behandelt. Bei jedem Versuch wurden zwei IBC-Tanks Braunwasser separat behandelt und die Ergebnisse ausgewertet.

Karbonisierung

Der Gärrest wurde nach einer mechanischen Aufkonzentrierung mittels hydrothormaler Karbonisierung in eine Flüssig- und nährstoffangereicherte Festphase separiert. Die „Festphase“ (in Form des eingedickten Gärrests) wurde zusätzlich pyrolytisch karbonisiert, um die Hygienisierungserfordernisse für eine Produktanwendung als Düngemittel zu ermöglichen. Sowohl das hydrothermale als auch das pyrolytische Karbonisierungsprodukt wurde bezüglich Hygienisierungserfolg, Nährstoffgehalte und Nährstoffverfügbarkeiten (Schwerpunkt Phosphor) analysiert.

Behandlung von flüssigem Gärrest

Es wurde untersucht, ob Gelbwasser und der flüssige Anteil der Gärreste gemeinsam mit dem Vuna-Verfahren behandelt werden können, um die Nährstoffe beider Flüssigkeiten in einem konzentrierten Dünger zurückzugewinnen. Vor der biologischen Behandlung wurde die chemische Zusammensetzung von Gärrest, Überstand, Gelbwasser und Reaktorzulauf analysiert.

Der Einfluss des Mischverhältnisses (Gelbwasser-/Gärrestmischung) auf die Nährstoffzusammensetzung wurde mit gelagertem Gelbwasser aus dem Büro Gebäude der Eawag und Gärrest von der Versuchsanlage der BOKU am IFA Tulln untersucht. Drei Experimente (A, B und C) wurden durchgeführt, wobei in jedem Experiment sieben Mischungen hergestellt wurden mit jeweils 0 %, 25 %, 33 %, 50 %, 67 %, 75 % und 100 % Gelbwasseranteil. Von jeder Mischung wurden 200 mL in 250 mL luftdicht verschlossene Flaschen abgefüllt. In den Mischversuchen wurden die Konzentrationen von gelöstem Kalium, Ammonium und Phosphat analysiert.

Der Energiebedarf für die Behandlung der Gelbwasser/Gärrest-Lösung im Vergleich zur Behandlung von Gelbwasser im Vuna-Reaktor wurde mit Hilfe von Werten aus der Literatur abgeschätzt.

Energiebilanzierung und Anwendungsszenarien

Die Erfahrungen und Daten aus dem biochemischen Prozess wurden dokumentiert und bewertet. Über den erzielbaren Biogas- bzw. Biomethanertrag und daraus abgeleiteten Prognosen der Produktion von Strom und Wärme wurde eine Energiebilanzierung für Wohngebäude unterschiedlicher Größe erstellt, welche auch als eine Basis für die Erstellung von Anwendungsszenarien diene.

Nutzerakzeptanz

Im Projekt wurden drei Erhebungen durchgeführt. Die erste Befragung zur Behandlung des sozial/emotional nicht unheiklen Themas persönlicher WC-Nutzung einer Trenntoilette wurde als fokussierte anonyme Fragebogenerhebung (direkt nach dem WC-Besuch) am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen durchgeführt.

Die beiden weiteren Erhebungen wurden als Online-Befragungen durchgeführt, die erste davon im Kammerhof-Museum Gmunden im Zuge der Sonderausstellung „Klo & so“ mit der Zielgruppe Museumsbesucher:innen (im Vergleich zur ersten Befragung etwas allgemeiner und breiter angelegt). Die zweite Online-Befragung war am Kreativ-Campus Atelier Gardens in Berlin Tempelhof (hier sind SAVE! Trenntoiletten installiert) mit der Zielgruppe: WC-Nutzer:innen. Der Online-Fragebogen enthielt Elemente aus den beiden vorangegangenen Befragungen.

4.2. Umsetzung der Methodik und aufgetretene Probleme

Im Allgemeinen konnte die oben beschriebene Methodik gut umgesetzt werden. Hinsichtlich einiger Punkte kam es zu Problemen im Zuge der Durchführung oder zu Änderungen im Vergleich zur im Projektantrag beschriebenen Vorgangsweise.

So wurde im Projektverlauf entschieden, keine vollständige Laboranlage am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen (wie ursprünglich gemäß Projektantrag geplant) zu installieren. Die Laboranlage am IFA Tulln wurde allerdings so konzipiert, dass sie quasi eine Anlage am Standort Gmunden simuliert. Regelmäßige Transporte des Ausgangssubstrats vom Standort Gmunden nach Tulln sicherten den kontinuierlichen Anlagenbetrieb.

Bei Inbetriebnahme und Betrieb der Biogas-Laboranlage kam es zeitweise zu technischen Problemen, wodurch ein kontinuierlicher Anlagenbetrieb phasenweise unterbrochen werden musste, um die Probleme zu beheben und Verbesserungen vorzunehmen. Daneben gab aber genügend störungsfreie Betriebszeiten, um ausreichend Daten zu sammeln und auswerten zu können.

Ursprünglich waren Fokusgruppen zur Erhebung der Akzeptanz der neu eingebauten Trenntoiletten von Seiten der Belegschaft am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen geplant. Stattdessen wurde eine fokussierte anonyme Fragebogenerhebung direkt nach dem WC-Besuch gewählt und im Juli/August 2022 durchgeführt, weil die persönliche Diskussion des Tabuthemas bei freier Einwilligung zur Teilnahme weniger geschützt und repräsentativ erschien.

Bei der ersten Online-Erhebung (im Kammerhof-Museum Gmunden) kam es aufgrund technischer Schwierigkeiten zeitweise zu Unterbrechungen, dennoch konnte eine relativ hohe Anzahl an ausgewerteten Fragebögen (56) erreicht werden. Bei der zweiten Online-Erhebung kam es zwar zu einer hohen Kontaktzahl, aber auch zu einer hohen Zahl an Abbrüchen, was keine relevante Statistik ermöglichte. Dies lässt Schlussfolgerung zulässt, dass – je nach Setting – via QR-Code erreichbare Online-Fragebögen problematisch sein können (und durch eine andere Befragungsmethode ersetzt werden sollen, siehe auch Kap. 5.6.3).

5 Ergebnisse

5.1. Aufbau und Betrieb des Biogasreaktors im Labormaßstab

5.1.1. Aufbau der Laboranlage

Grundlage für die Planung der Laboranlage war ein sogenannter „Anaerobic Baffle Reactor“ (ABR), wie er zum Teil in Entwicklungsländern für die anaerobe Behandlung von Grauwasser oder Schwarzwasser verwendet wird. Niedrige hydraulische Verweilzeiten sollen durch die Rückhaltung der Biomasse im Reaktor ermöglicht werden, um somit auch Biogas aus Abwässern mit geringer Trockensubstanz zu produzieren. Fermenter 1, Fermenter 2 und Fermenter 3 sollen die verschiedenen Kammern (durch „baffles“ getrennt) des ABR simulieren.

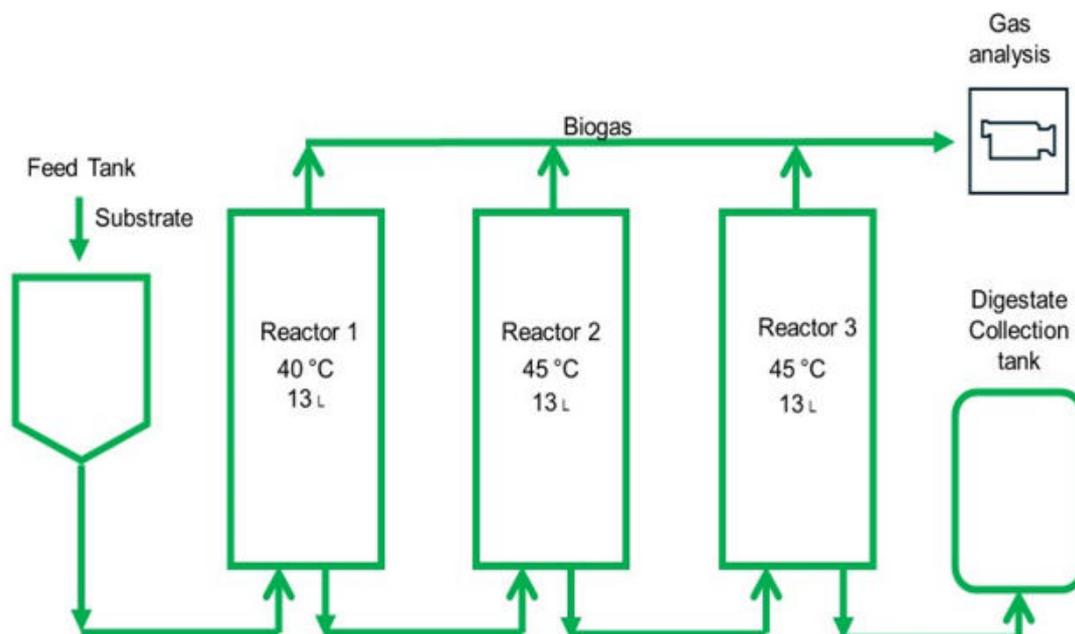


Abbildung 1: Schema der Biogas-Laboranlage (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Rührwerke waren bei jedem Fermenter installiert, diese wurden aber nur in bestimmten Intervallen aktiviert. Über in den Fermentern installierte Überlaufrohre sollte nur der Überstand in den jeweiligen nächsten Fermenter laufen, um somit ein Auswaschen der Biomasse zu verhindern. In einem Vorlagebehälter, der auf einer Waage positioniert war, wurde mittels Schlauchquetschpumpe das Substrat (aufkonzentriertes Braunwasser) automatisch in Fermenter 1 dosiert. Fermenter 1, Fermenter 2 und Fermenter 3 wurden in Serie geschaltet betrieben.

Das Arbeitsvolumen der Glas-Fermenter betrug jeweils rund 13 Liter. Ursprünglich wurden zwei Fermenter bei einer Temperatur von 40 °C (F1) und bei 45 °C (F2) mittels elektrischer Heizmängel

betrieben. Um die Abbauleistung und mögliche Hygienisierungseffekte auch bei höheren Temperaturen zu testen, wurde das Set-Up um einen weiteren Fermenter (F3) erweitert, der zunächst bei einer vergleichsweise hohen Temperatur von 55 °C (später ebenfalls bei 45 °C wie Fermenter 2) betrieben wurde.



Abbildung 2: Die Biogas-Laboranlage im Betrieb. Rechts der Vorlage- bzw. Absetzbehälter, links die drei Fermenter, Materialfluss von rechts nach links (Bildnachweis: Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Das Volumen des produzierten Biogases wurde mittels eines Trommelgaszählers (Firma Ritter) erfasst und anschließend in 3,5 Liter Gassäcken gesammelt. Sobald das maximale Füllvolumen eines Gassacks erreicht war, wurde das Biogas abgesaugt und die Biogasqualität (CH_4 , CO_2 , H_2S , H_2 und O_2) mittels AwifLEXCool+ gemessen (Firma Awite). Über eine eigene Visualisierung/Steuerung konnten Substratmenge, Fütterungsintervalle, Rührintervalle und Fermentertemperaturen eingestellt werden. Der produzierte Gärrest wurde nach Fermenter 3 (F3) in einem eigenen Kunststoffbehälter gesammelt.

Zusätzlich wurden regelmäßig Proben von jedem Fermenter gezogen, um folgende Parameter zu analysieren:

- pH-Wert
- Freie flüchtige Fettsäuren mittels HPLC (VFAs)
- Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (OTS)
- Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)
- Ammoniumstickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$)
- Gesamtstickstoff (TKN).

5.1.2. Sammlung des Inputmaterials für Analysen und den Versuchsbetrieb der Laboranlage

Zwei Trenntoiletten (Urin-Trap-Trenntoilette, Produktbezeichnung Laufen Save!) wurden am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen installiert und Mitte Juni 2022 in Betrieb genommen. Dazu waren entsprechende Umbauarbeiten der bestehenden Toilettenanlage erforderlich. Außerdem wurden zwei Sammel tanks aufgestellt und angeschlossen sowie Zählerleinrichtungen (für Tür- und Spülkontakte) installiert.



Abbildung 3: Eine der beiden installierten Trenntoiletten am Standort Gmunden der Fa. Laufen. An der Innenseite der Tür ist ein Informationsblatt mit einer Prinzipskizze der Toilette und einer „Benutzungsanleitung“ angebracht (Bildnachweis: Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Pro Spülvorgang mittels Trenntoilette werden rund 4 bis 4,5 Liter Wasser benötigt und die Fäkalien so mit einem großen Volumen Wasser „verdünnt“. Somit wird das Biogaspotential von Fäkalien, bezogen auf das Volumen/Frischmasse, deutlich reduziert. Das Toilettenwasser muss im Fermenter aufgeheizt werden und die hydraulische Verweilzeit wird durch das große Volumen deutlich reduziert. Eine nachgeschaltete Abtrennung der Wasserfraktion bzw. die Aufkonzentrierung der Organik um die Energiedichte wieder zu erhöhen und die Gesamteffizienz zu verbessern ist daher sinnvoll.

In den Sammel tanks wurde das Braunwasser gesammelt, regelmäßig abgeholt und nach Tulln transportiert. Vorher wurde das Material in einen weiteren konischen Behälter gepumpt, Eisen(III)-chlorid dosiert und mittels IBC-Rührwerk gemixt. Eisen(III)-chlorid dient als Fällungs- und Flockungsmittel und ermöglicht die Vergrößerung der Feinpartikel und somit ein beschleunigtes Absinken der Organik/Partikel. Nach einer gewissen Absetzzeit wurde die aufkonzentrierte Organik am Behälterboden abgezogen und in Fässer für den Weitertransport abgefüllt. Die wichtigsten Parameter wie Trockensubstanzgehalt (TS), organische Trockensubstanz (OTS), chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) und Stickstoffgehalt wurden im Anschluss im Labor am IFA-Tulln/BOKU analysiert, um weitere

Analysen zu starten (z.B. Biomethanpotential mittels Batch-Test) oder die Fütterung der Laborreaktoren zu planen.



Abbildung 4: Sammlung der Braunwasserfraktion am Standort Gmunden der Fa. Laufen. Links hinten zwei IBC-Sammeltanks, rechts vorne ein Absetzbehälter (Bildnachweis: Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Weiters wurde ein „Aquatron Separator“ für einfache Trennversuche angeschafft und getestet, um das Spülwasser von den Fäkalien und Toilettenpapier abzutrennen. Die Schwierigkeit bestand jedoch darin, dass direkt nach den installierten Trenntoiletten mittels Hebepumpe das Braunwasser in die Sammel tanks gepumpt wurde. Durch die Hebepumpe wurden die Fäkalien/festen Bestandteile gemixt und homogenisiert. Dadurch wurde eine anschließende Fest-/Flüssigtrennung mittels „Aquatron Separator“, Flockungsversuchen oder einfache Absetzversuchen deutlich erschwert.

5.1.3. Ergebnisse der Laborversuche

Im Zuge des Projekts wurden Substrate aus verschiedenen Quellen (Braunwasser, Speisereste, Toilettenpapier) hinsichtlich wesentlicher charakteristischer Parameter (wie Gehalt an organischer Trockensubstanz (OTS) oder Gesamtstickstoffanteil (TKN)) und hinsichtlich ihres Biomethanertrags (in Batch-Tests) analysiert.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über diese Analyseergebnisse.

Tabelle 1: Übersicht über die Substratanalysen und Biomethanerträge von Braunwasserproben, Speiseresten und Toilettenpapier (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

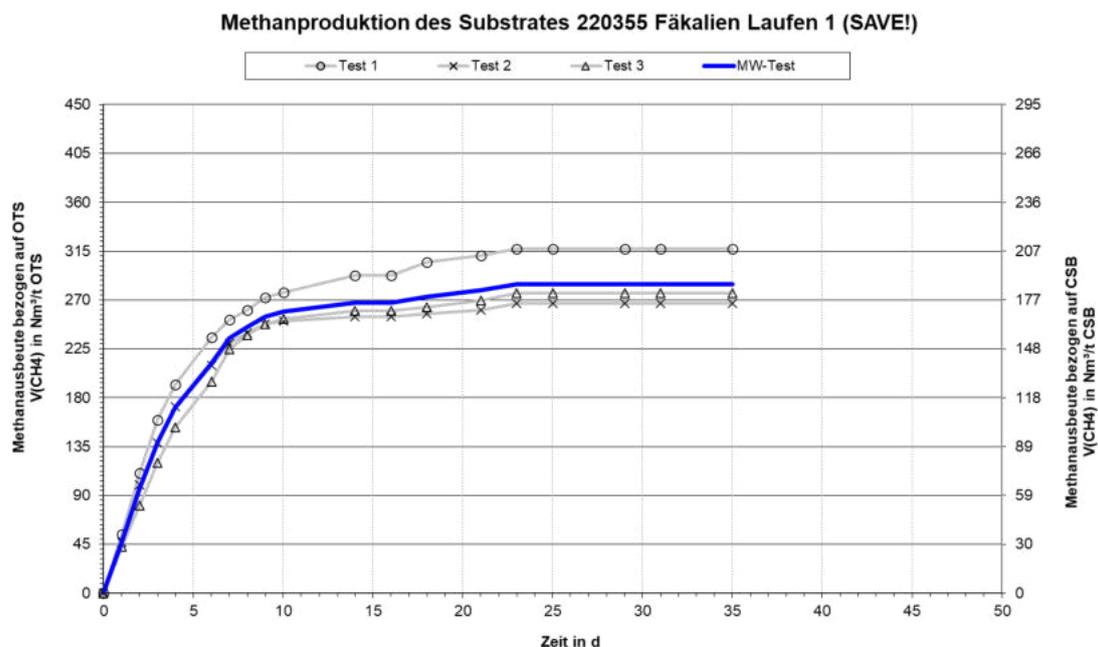
	Substratanalyse				Biomethanertrag (Batch-Tests)		
	Trocken- substanz TS [%]	organische Trocken- substanz OTS [%]	chemischer Sauerstoff- bedarf CSB [g/kg]	Gesamt- stickstoff TKN [g/kg]	Biomethan- ertrag [m ³ /t FM]	Biomethan- ertrag [m ³ /t OTS]	Biomethan- ertrag [m ³ /t CSB]
Braunwasser							
<i>Baustellen-WC</i>	1,88	1,11	17,33	4,19	3,60	320	208
<i>Nest 1 (Eawag)</i>	0,59	0,47	8,25	0,49	2,60	561	317
<i>Nest 2 (Eawag)</i>	0,36	0,28	6,32	0,26	2,00	716	317
<i>Laufen 1 (SAVE!)</i>	1,36	1,23	18,88	0,47	3,52	287	187
<i>Laufen 2 (SAVE!)</i>	3,43	3,09	40,71	1,35	12,44	403	306
<i>Laufen 3 (SAVE!)</i>	1,44	1,24	10,71	0,61	3,92	316	335
Speisereste							
<i>Speisereste 1 (flüssig)</i>	22,17	19,18	304	6,69	101,40	529	334
<i>Speisereste 2 (dick)</i>	16,46	14,89	304	3,7	63,40	426	209
Toilettenpapier							
<i>Toilettenpapier 1 (Laufen)</i>	93,5	90,58	-	-	258,60	286	-
<i>Toilettenpapier 2 (privat)</i>	94,39	93,27	-	-	292,10	313	-
<i>Toilettenpapier 3 (Kokett)</i>	92,74	92,07	-	-	322,70	351	-

Braunwasserproben¹ wurden aus drei verschiedenen Quellen entnommen: einer Mobiltoilette (Baustellen-WC), aus dem Nest-Gebäude des Projektpartners Eawag (hier sind ebenfalls Trenntoiletten installiert), sowie vom Standort Gmunden der Firma Laufen (siehe oben, Kap. 5.1.2). Proben von Speiseresten wurden in zwei Varianten (flüssig, dick), Proben von Toilettenpapier in drei Varianten bzw. von drei verschiedenen Herstellern analysiert.

Das erste wesentliche Kriterium zur Beurteilung einer Probe ist der Wassergehalt bzw. der Gehalt an organischer Trockensubstanz (OTS). Ein hoher Wassergehalt reduziert die Energiedichte und vergrößert das Volumen, das in den Biogas-Reaktoren verarbeitet werden soll.

Die Proben unterscheiden sich deutlich im OTS-Gehalt aber auch im Gehalt an Gesamtstickstoff (TKN). Der Gesamtstickstoff ist ein Indikator für den Proteingehalt und somit für den Anteil an Fäkalien im Braunwasser (Mischung aus Wasser, Fäkalien und Toilettenpapier) bzw. im aufkonzentrierten Festanteil nach der Abtrennung des Überstands. Durch die Spülung bzw. Wasserzugabe und anschließende Homogenisierung der Fäkalien-/Toilettenpapier-Mischung geht der Fäkalienanteil in Lösung und ein Teil geht über den Überstand nach der Fest-/Flüssigtrennung verloren. Aufkonzentriert wird das Toilettenpapier (bestehend aus Zellulose) und nur ein Teil der Fäkalien. Der Biomethanertrag der Fäkalien-Proben („Laufen 1“, „Laufen 2“, „Laufen 3“) bezogen auf die OTS schwankt deutlich – je höher der Anteil der Fäkalien in der OTS, desto höher auch der Biomethanertrag.

Der Biomethanertrag der Braunwasser-, Speiserest- und Toilettenpapier-Proben, bezogen auf Frischmasse (FM) und auf organische Trockensubstanz (OTS), unterscheidet sich deutlich aufgrund des Wassergehaltes und der Zusammensetzung der Organik. Der Biomethanertrag der Braunwasser-Proben bewegt sich aufgrund des hohen Wassergehaltes zwischen 2,0 und 12,44 m³/t FM. Speisereste zeigen einen vergleichsweise hohen Biomethanertrag von rund 63 bis 101 m³/t FM und sind somit ein geeignetes Co-Substrat, um den Biogasertrag aus Braunwasser deutlich zu steigern.



¹ Unter Braunwasser wird in diesem Bericht die Mischung aus Wasser, Fäkalien und Toilettenpapier verstanden.

Abbildung 5: Biomethanertrag (bezogen auf organische Trockensubstanz und chemischen Sauerstoffbedarf) von Braunwasser, Probe „Laufen 1 (SAVE!)“ (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

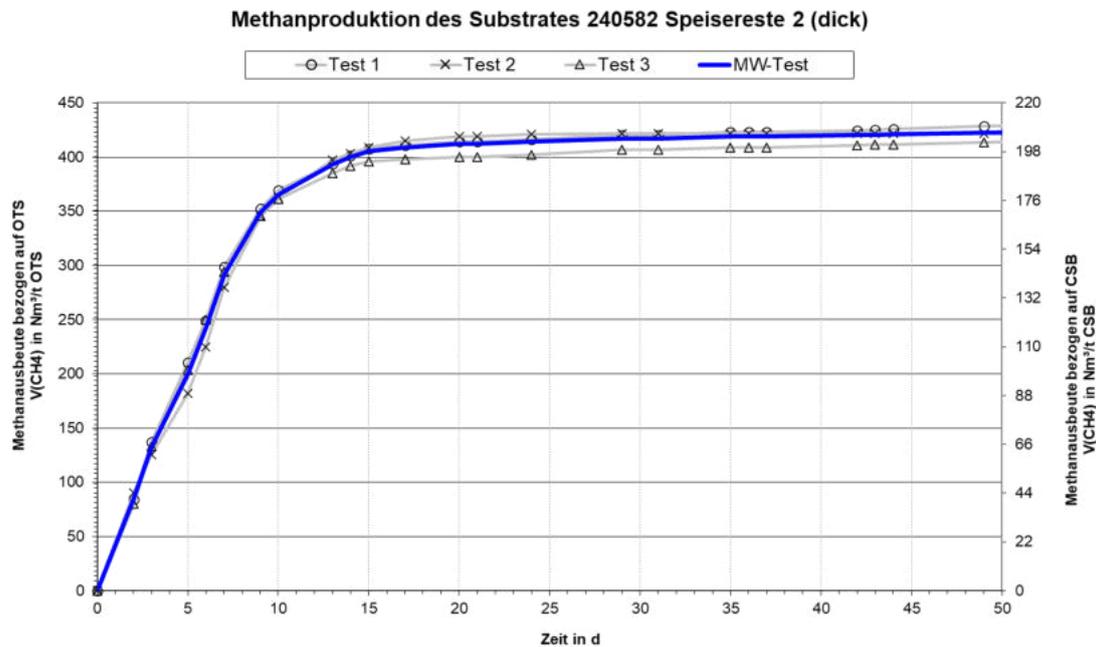


Abbildung 6: Biomethanertrag (bezogen auf organische Trockensubstanz und chemischen Sauerstoffbedarf) von Speiseresten, Probe „Speisereste 2 (dick)“ (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Die beiden obigen Abbildungen zeigen die kumuliert aufgetragene Biomethanproduktion von Braunwasser (Abbildung 5) und von eingedickten Speiseresten (Abbildung 6) über den Zeitverlauf, bezogen auf organische Trockensubstanz (OTS) und chemischen Sauerstoffbedarf (CSB). Bezogen auf die Frischmasse (FM) haben Speisereste aufgrund des niedrigeren Wassergehaltes einen deutlich höheren Biomethanertrag. Bezogen auf die OTS beträgt das Biomethanpotential von Braunwasser (Probe „Laufen 1 (SAVE!)“) 287 m³/t OTS, das von (dicken) Speiseresten 426 m³/t OTS. Auffällig ist vor allem die schnelle Verfügbarkeit der Substrate – nach rund 10 Tagen Verweilzeit sind bereits rund 80 bis 90 % des maximalen Biomethanertrages der Speisereste, aber auch des Braunwassers erreicht.

Kontinuierlicher Betrieb der Labor-Fermenter

Die folgende Abbildung zeigt im Vergleich zu den Batch-Tests nun die Ergebnisse aus dem Betrieb der kontinuierlich betriebenen Fermenter (F1, F2, F3) – die Biogasproduktion (Liter/Tag), die organische Raumlast (g OTS/Liter Fermentervolumen*Tag), die Substratzugabe bzw. -fütterung (in kg/Tag) und die hydraulische Verweilzeit (in Tagen) über den Versuchszeitraum.

Im Mittel wurden täglich rund 1,18 kg Substrat pro Tag über die Schlauchquetschpumpe dem Fermenter F1 zugeführt, was einer hydraulischen Verweilzeit pro Fermenter von rund 10,8 Tagen entspricht und einer organischen Raumlast von rund 0,75 g OTS/Liter Fermentervolumen und Tag. Der Biomethanertrag im kontinuierlichen Ausgärversuch von Braunwasser betrug 254 Liter/kg OTS im Vergleich zum Biomethanertrag im Batch-Test von 287 bis 403 Liter/kg OTS. Somit wurde im kontinuierlichen Versuch ein rund 20% geringerer Methanertrag erreicht. Die Differenz lässt sich durch

technische Schwierigkeiten im Anlagenbetrieb erklären. Aufgrund von Umbauarbeiten mussten die Fermenter geöffnet werden und auch Verbindungsschläuche zwischen den Fermentern sind geplatzt und Substrat ging somit verloren.

Mit dem Start der Zugabe der Speiseabfälle am 21. Mai 2024 ist die organische Raumlast und in Folge auch die Biogasproduktion deutlich angestiegen, obwohl die zugeführte Menge an Speiseresten (FM) lediglich rund 50 g bis 75 g pro Woche betrug (bei rund 7 bis 10 kg Braunwasser pro Woche).

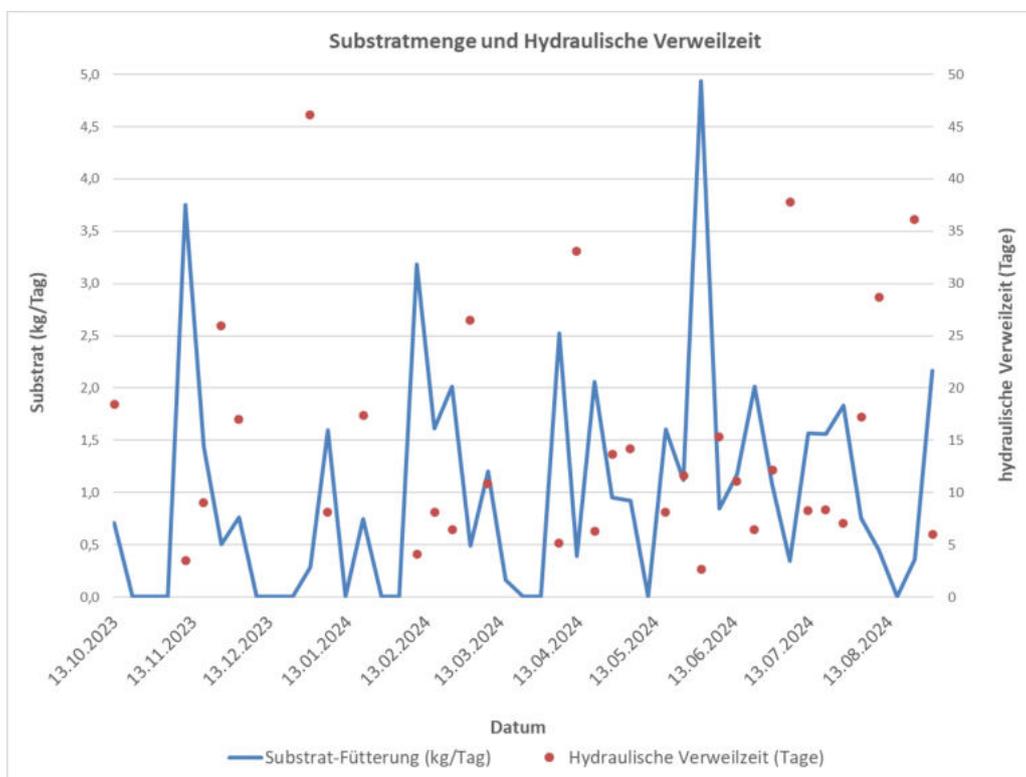
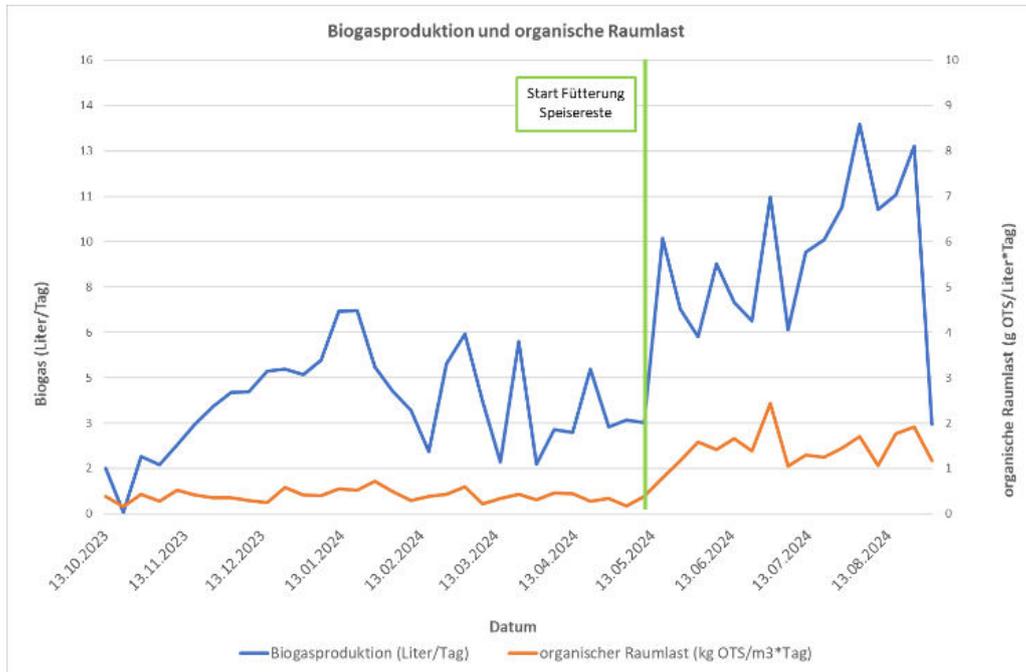


Abbildung 7: Biogasproduktion, organische Raumlast, zugeführte Substratmenge und hydraulische Verweilzeit der kontinuierlich betriebenen Fermenter über den Zeitraum Oktober 2023 bis August 2024 (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Die Batch-Tests haben gezeigt, dass innerhalb der ersten 10 Tage bereits rund 80 bis 90 % des Biomethanpotentials erreicht wird. Somit ist die organische Raumlast im ersten Fermenter mit Abstand am höchsten.

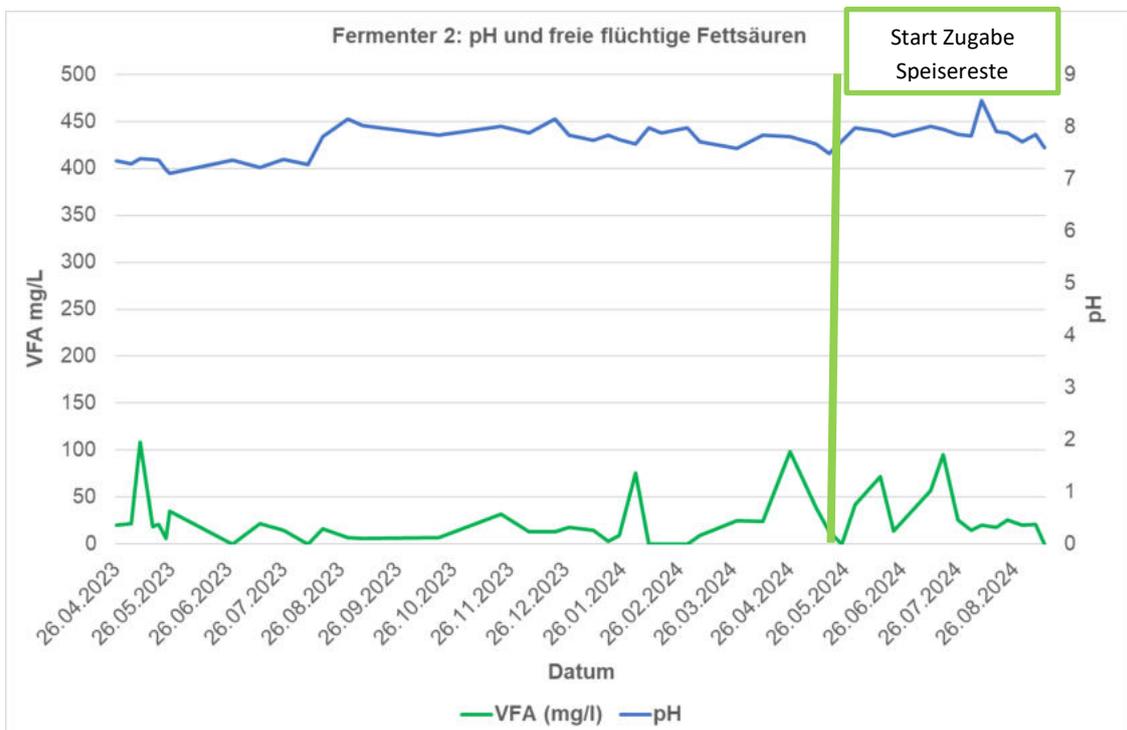
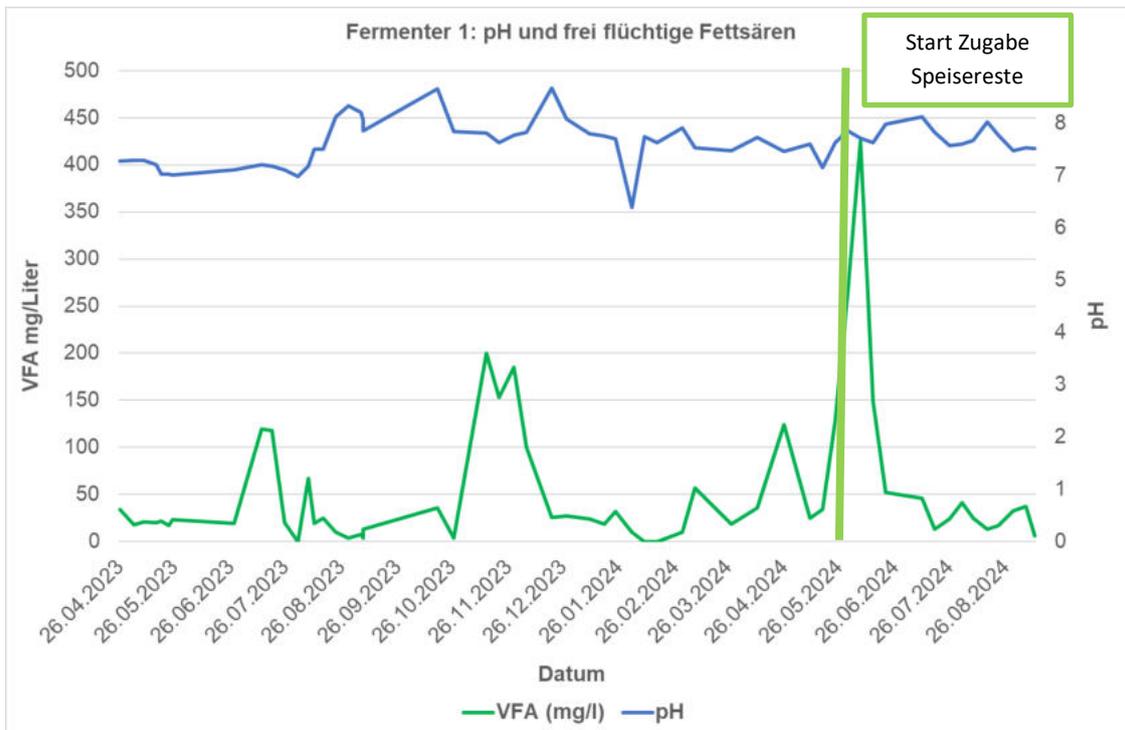


Abbildung 8: pH-Wert und Summe der freien flüchtigen Fettsäuren in Fermenter 1 (oben) und Fermenter 2 (unten) über den Zeitraum April 2023 bis August 2024 (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Die obige Abbildung zeigt den pH-Wert Verlauf und die Entwicklung der freien flüchtigen Fettsäuren (Gesamtfettsäuren) in Fermenter 1 (oberer Teil) und Fermenter 2 (unterer Teil). Die Konzentration der Gesamtfettsäuren ist in Fermenter 1 höher und auch der pH-Wert schwankt in Fermenter 1 mehr im Vergleich zu Fermenter 2. Trotzdem ist die Konzentration der freien flüchtigen Fettsäuren in Fermenter 1 mit 25 mg/l bis maximal 425 mg/l vergleichsweise niedrig. Die Maximalkonzentration mit 425 mg/l wird mit dem Start der Fütterung von Speiseresten erreicht.

Der pH-Wert in Fermenter 1 sank teilweise unter pH 7,0. Natronlauge wurde dann zudosiert, um ein weiteres Absinken des pH-Wertes zu verhindern. Die schwankenden und zum Teil niedrigen pH-Werte sind vermutlich auf die schlechte Pufferkapazität in den Fermentern zurückzuführen. Der Stickstoffgehalt im Braunwasser/Substrat ist niedrig (0,47 g/kg bis 1,35 g/kg) und folglich auch der Ammoniumcarbonatpuffer im Fermenter. Durch zusätzliche Fütterung von Speiseresten, die auch einen höheren Stickstoffgehalt aufweisen, kann mittelfristig auch der pH-Puffer im Fermenter deutlich verbessert werden. Mit der geringen Zugabe der Speisereste konnte der Ammonium-Stickstoff (NH₄-N) Gehalt in den Fermentern von rund 0,25 g/l auf rund 0,35 g/l erhöht werden.

Abbaubarkeit von Medikamenten

Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse zu den Abbauprobungen von Medikamenten im Biogasfermenter. Gärrest aus Fermenter 3 wurde gesammelt und als Inokulum für Ausgärversuche/Abbauprobungen des Antibiotikums Sulfamethoxazol und des Schmerzmittels Diclofenac im Batch-Test verwendet.

Im 3-fach Ansatz wurden jeweils 100 µg Sulfamethoxazol und 100 µg Diclofenac in rund 500 g Inokulum/Gärrest F3 eingewogen und bei 37° im Brutraum für 42 Tage anaerob gelagert:

- Gärrest F3 + 100 µg Mix aus Sulfamethoxazol und 100 µg Diclofenac
- Gärrest F3 + 100 µg Mix aus Sulfamethoxazol und 100 µg Diclofenac + jeweils rund 8,00 g Speisereste als Substrat
- Gärrest F3 („Blank“).

Die zusätzliche Zugabe von Speiseresten als Substrat sollte den Stoffwechsel der Mikrobiologie ankurbeln und somit auch zu einer besseren Abbauleistung der Wirkstoffe führen. Am Tag 0, Tag 15 und Tag 35 wurden Proben aus den Versuchsansätzen gezogen. Es wurde bei sämtlichen Proben eine Solid-Phase Extraction (SPE) durchgeführt und der Flüssiganteil mittels HPLC gemessen.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch im „Blank“ (Gärrest aus F3) Sulfamethoxazol und Diclofenac nachgewiesen werden konnte. Bei Sulfamethoxazol zeigt sich bereits nach 15 Versuchstagen eine deutliche Reduktion ohne Zugabe von Speiseabfällen auf lediglich rund 3,50 µg und beim Ansatz mit Speiseresten als Substrat eine Reduktion auf rund 23 bis 35 µg.

Bei Diclofenac zeigt sich erst nach 35 Tagen eine Reduktion auf rund 70 µg ohne Speisereste als Substrat und auf rund 38 µg mit Speiseresten als Substrat (siehe auch die folgende Abbildung).

Lediglich bei Diclofenac am Tag 35 zeigt die Zugabe von Speiseresten einen verbesserten Abbau. Bei allen weiteren Probenahmen und auch bei Sulfamethoxazol ist die Wirkung ohne Zugabe von Speiseresten besser.

Auch im Gärrest von F3, der mit Braunwasser gefüttert wurde („Blank“), konnten geringe Konzentrationen von Sulfamethoxazol und Diclofenac festgestellt werden. Die Konzentrationen steigen zum Teil über den Zeitverlauf, was vermutlich auf eine methodische Messunsicherheit zurückzuführen ist.

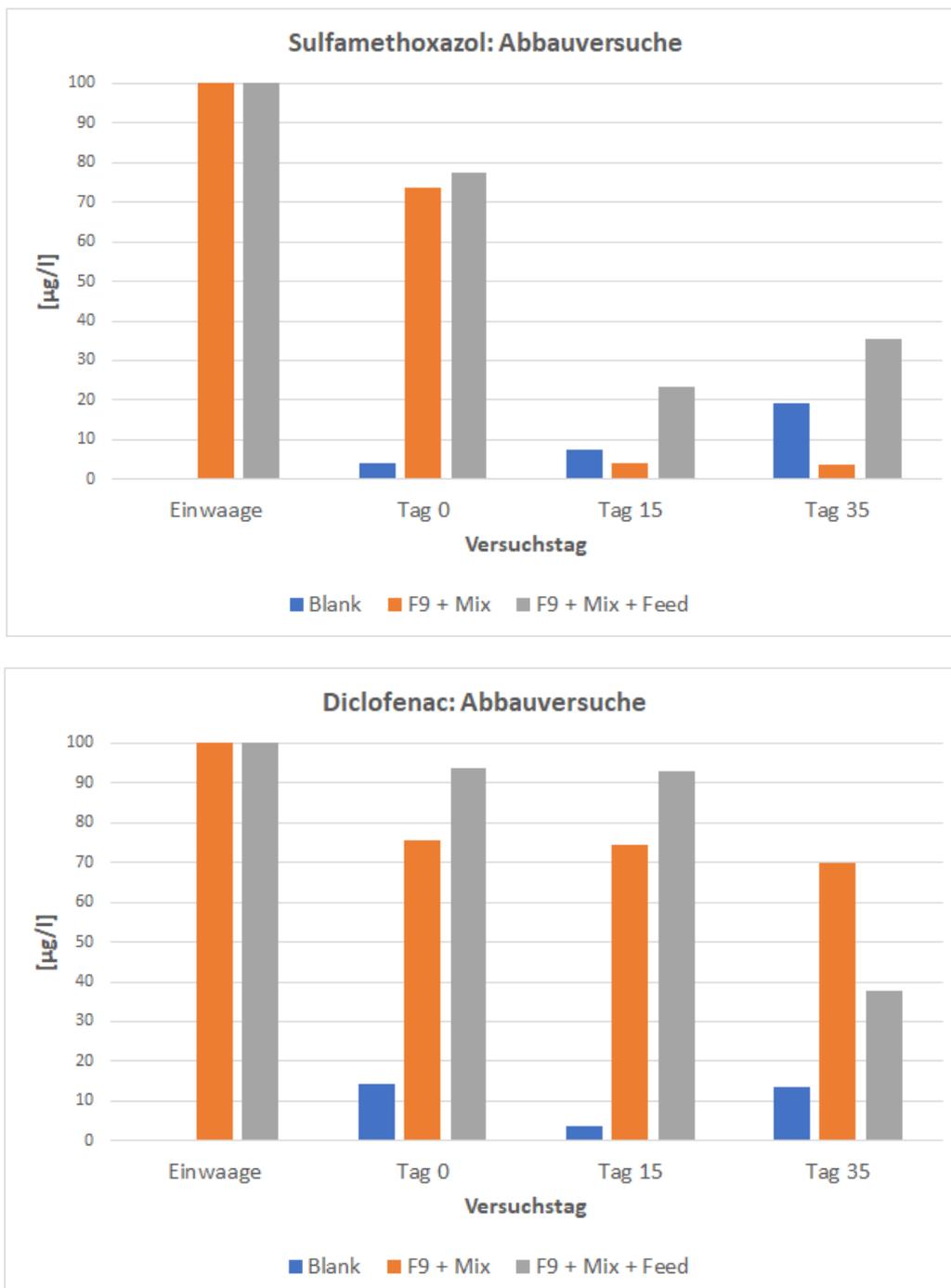


Abbildung 9: Ergebnisse der Abbauversuche von Sulfamethoxazol (Antibiotikum, oben) und Diclofenac (Schmerzmittel, unten) im Batch-Versuch (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Mikrobiom-Analysen

Für die Analyse des Mikrobioms der Fermenter wurden frische Proben aus allen drei Fermentern gezogen und die DNA extrahiert (mit Hilfe eines „FastDNA SPIN Kits for Soil“). Die Sequenzierung (16S rRNA Gensequenzierung) und Datenanalyse wurde von der Firma Microsynth AG (Balgach, Schweiz) durchgeführt.

Die drei Fermenter wurden in Serie betrieben – Fermenter 1 bei 40 °C, Fermenter 2 bei 45 °C und Fermenter 3 bei 55 °C (zu Beginn, später bei 45 °C). Der türkise Bereich stellt den Anteil der Archaeen dar, der rote bzw. rosa Bereich den Anteil der Bakterien im Fermenter. Auffällig ist der hohe Anteil der Archaeen in Fermenter 1 im Vergleich zu Fermenter 2 und Fermenter 3. Im Stoffwechselvorgang vom Substrat zum Biogas sind die Archaeen für die finale Produktion des Biomethans/Biogases verantwortlich. Die höchste organische Raumlast und auch die höchste Biogasproduktion fanden in Fermenter 1 statt. Vermutlich ist das der Grund, warum in dieser ersten Stufe auch der höchste Anteil an Archaeen gemessen wurde. Die weiteren Fermenter dienten weniger der Biogasproduktion, sondern vielmehr einer finalen Stabilisierung und Hygienisierung des Braunwassers.

Für eine weitere Interpretation müssen diese Ergebnisse mit Mikrobiom Ergebnissen von Faulschlamm und Gärrest von landwirtschaftlichen- und Abfall-Biogasanlagen verglichen werden.

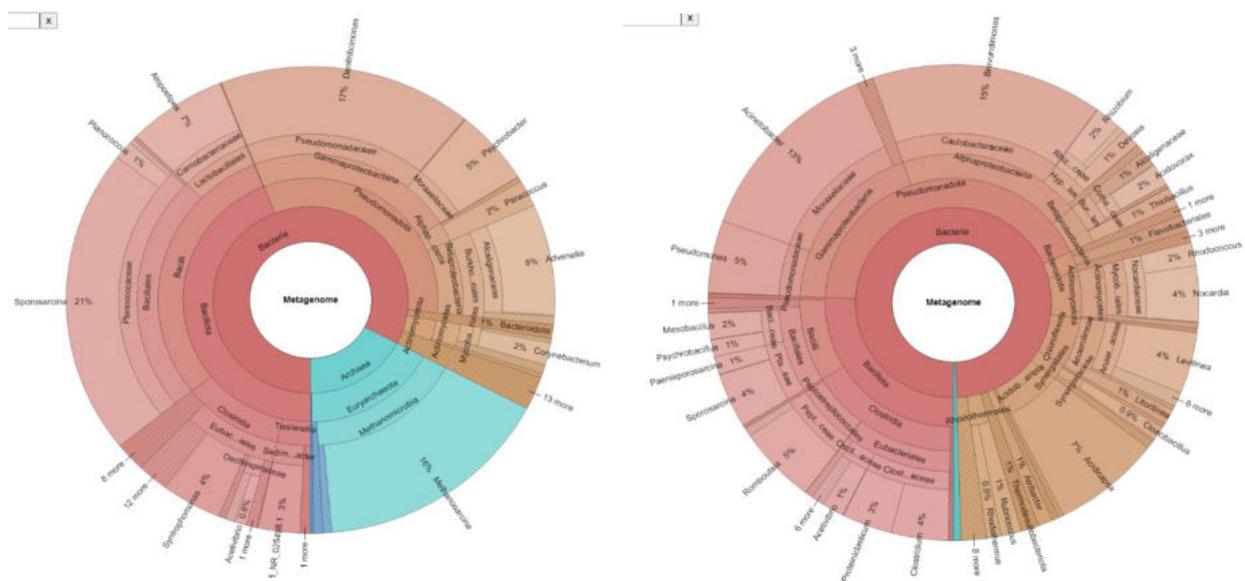


Abbildung 10: Ergebnisse der Mikrobiom-Untersuchung der Proben aus den Fermenter 1 (links) und Fermenter 2 (rechts) in Form von „Krona Charts“. In türkise der Anteil der Archaeen, welche für die Methanproduktion zuständig sind, in rot/rosa der Anteil der verschiedenen Bakterienarten (Quelle: Microsynth AG, Balgach, Schweiz)

5.2. Aufkonzentrierungsversuche

Durch den Spülvorgang am WC werden Fäkalien und Toilettenpapier mit einer großen Menge Wasser verdünnt und das Volumen deutlich vergrößert. Der Wasseranteil im menschlichen Kot liegt rund zwischen 65 % und 85 %. Der Wasseranteil des Braunwassers aus der Trenntoilette in Gmunden liegt jedoch bei rund 96,5 % bis 98,6 %. Ziel einer anschließenden Aufkonzentrierung sollte die Abtrennung des Wassers, somit eine deutliche Volumenreduktion bei gleichzeitiger Erhöhung der Trockensubstanz sein. Auch sollte erreicht werden, dass die Organik in der Festfraktion aufkonzentriert wird und möglichst wenig Organik/Energie über den Flüssiganteil verloren geht.

Durch diese Aufkonzentrierung kann der Volumenstrom durch die Biogasanlage/Fermenter deutlich reduziert werden und der Biogasertrag und die Effizienz der Anlage insgesamt verbessert werden. Um eine verbesserte Vergärung bei möglichst geringem Energieinput zu erreichen (welcher von einem hohen Gehalt an organischer Trockensubstanz abhängt), wurde auch ein Schwerpunkt auf die experimentelle Untersuchung verschiedener Trenn- bzw. Aufkonzentrierungstechnologien gelegt.

Am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen wurden Versuche zur Aufkonzentrierung des nach der Trenntoilette gesammelten Braunwassers mit zwei Filtertechnologien durchgeführt:

- Schrägfilter SF 500 der Fa. Leiblein
- Rotationsfilter RoSL der Firma Assonic

Das in IBC-Tanks gesammelte Braunwasser wurde mit Eisen(III)-chlorid geflockt, um den Feinpartikelanteil zu reduzieren und anschließend wurde das gesamte Volumen mittels Schrägfilter und Rotationsfilter behandelt mit dem Ziel, eine bestmögliche Fest-/Flüssigtrennung zu erreichen. Bei jedem Versuch wurden zwei IBC-Tanks Braunwasser behandelt.

Die folgenden beiden Tabellen und Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Tests mit dem Schrägfilter und dem Rotationsfilter. Es ist jeweils der Vergleich von Menge, Trockensubstanz (TS) und organischer Trockensubstanz (OTS) der Ausgangsprobe (Braunwasser) mit dem nach der Filtration (bzw. Aufkonzentrierung) produzierten Flüssiganteil und Festanteil.

Mittels des Schrägfilters der Fa. Leiblein konnte bei Behälter 1 die TS von 0,28 % auf 3,44 % im Festanteil erhöht und die Menge des Festanteils auf lediglich 6,0 kg (Frischmasse) reduziert werden. Jedoch konnten lediglich 0,21 kg TS in den Festanteil überführt werden – rund 1,0 kg TS sind im Flüssiganteil verblieben. Bei Behälter 2 konnte eine TS von 5,03 % im Festanteil erreicht werden. Rund 1,16 kg TS konnten im Festanteil konzentriert werden – jedoch gingen auch rund 1,41 kg TS über den Überstand verloren (siehe Tabelle 2 und Abbildung 11).

Mittels Rotationsfilter der Fa. Assonic konnte bei Behälter 1 eine hohe TS von 16,1 % im Festanteil erreicht werden, jedoch bei einer sehr geringen Gesamtmenge von lediglich rund 1,00 kg (Frischmasse). Somit konnten bei Behälter 1 lediglich 0,16 kg TS im Festanteil aufkonzentriert werden, 0,98 kg TS sind im Flüssiganteil verblieben. Beim Versuch mit Behälter 2 konnte eine TS von 7,0 % erreicht werden – 0,31 kg konnten im Festanteil aufkonzentriert werden, 1,05 kg gingen über den Überstand verloren (siehe Tabelle 3 und Abbildung 12).

Tabelle 2: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Schrägfilters der Fa. Leiblein (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Schrägfilter, SF 500, Fa. Leiblein				
Behälter 1		Ausgangsprobe	Flüssiganteil (nach Filterung)	Festanteil (nach Filterung)
	<i>FM (kg)</i>	538,0	526,0	6,0
	<i>TS (%)</i>	0,28	0,19	3,44
	<i>OTS (%)</i>	0,21	0,13	3,14
	<i>TS (kg)</i>	1,51	1,00	0,21
	<i>OTS (kg)</i>	1,13	0,68	0,19
Behälter 2		Ausgangsprobe	Flüssiganteil (nach Filterung)	Festanteil (nach Filterung)
	<i>FM (kg)</i>	644,0	613,0	23,0
	<i>TS (%)</i>	0,39	0,23	5,03
	<i>OTS (%)</i>	0,32	0,16	4,44
	<i>TS (kg)</i>	2,51	1,41	1,16
	<i>OTS (kg)</i>	2,06	0,98	1,02

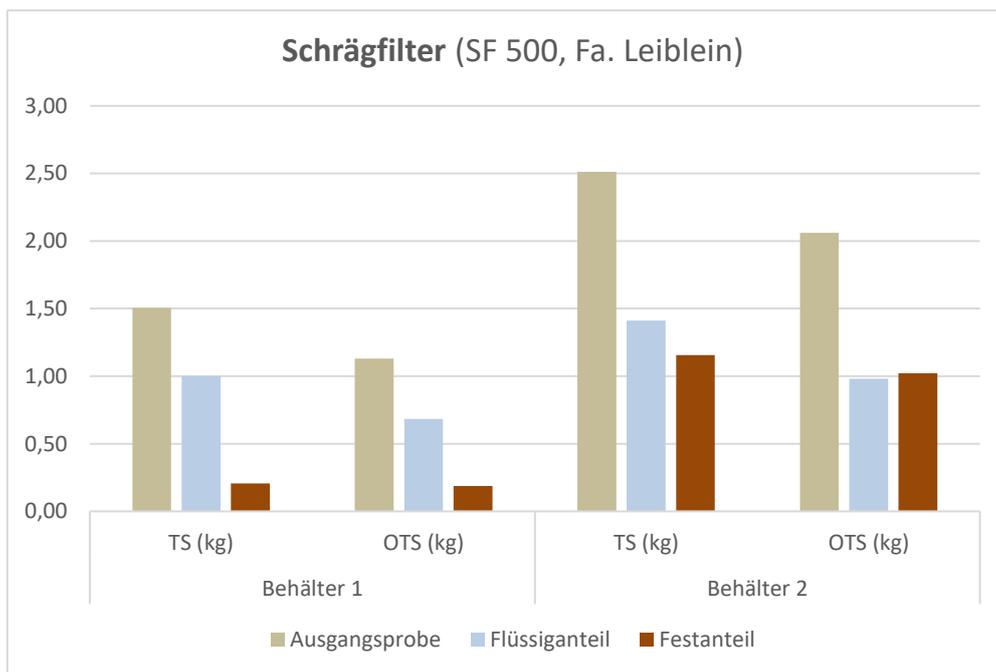


Abbildung 11: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Schrägfilters der Fa. Leiblein (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Tabelle 3: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Rotationsfilters der Fa. Assonic (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Rotationsfilter, RoSL, Fa. Assonic				
Behälter 1		Ausgangssprobe	Flüssiganteil (nach Filterung)	Festanteil (nach Filterung)
		<i>FM (kg)</i>	503,0	492,0
	<i>TS (%)</i>	0,32	0,20	16,10
	<i>OTS (%)</i>	0,25	0,13	15,68
	<i>TS (kg)</i>	1,61	0,98	0,16
	<i>OTS (kg)</i>	1,26	0,64	0,16
Behälter 2		Ausgangssprobe	Flüssiganteil (nach Filterung)	Festanteil (nach Filterung)
		<i>kg</i>	489,0	419,0
	<i>TS (%)</i>	0,27	0,25	4,39
	<i>OTS (%)</i>	0,20	0,17	4,20
	<i>TS (kg)</i>	1,32	1,05	0,31
	<i>OTS (kg)</i>	0,98	0,71	0,29

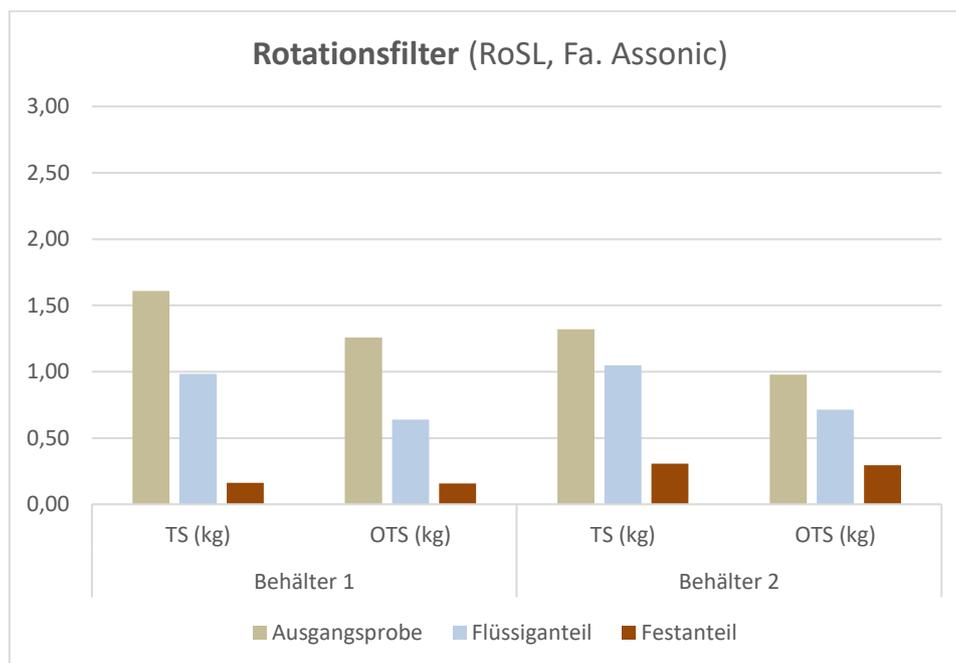


Abbildung 12: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Rotationsfilters der Fa. Assonic (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)

Als Fazit hat sich in den Versuchen gezeigt, dass mittels der Technologien Schrägfilter und Rotationsfilter im Vergleich zu einfachen Absetzversuchen ein hoher Trockensubstanzanteil im Festanteil (nach der Filterung bzw. Aufkonzentrierung) erreicht werden kann, jedoch kann maximal 50 Prozent der Trockensubstanz aus der Ausgangssprobe aufkonzentriert werden.

Nach den Trenntoiletten wurde das Braunwasser mittels Hebepumpe in die IBC-Tanks gepumpt. Somit wurden diese stark mechanisch beansprucht und auch homogenisiert. Auch wurden die Proben über einige Tage gesammelt und konnten nicht frisch verarbeitet werden. Der Feinpartikelanteil wurde dadurch stark erhöht und auch durch Flockung mittels Eisen(III)-chlorid konnte keine zufriedenstellende Abtrennung und Aufkonzentrierung der Trockensubstanz erreicht werden.

Daraus leitet sich die Empfehlung ab, den Wassereintrag beispielsweise durch Einsatz von Vakuum-Toiletten zu minimieren und weiterführende Forschungen zur Fest-Flüssigtrennung zu betreiben.

5.3. Behandlung des „festen“ (eingedickten) Gärrests

Der eingedickte Gärrest kann noch immer als signifikanter Nährstoffträger fungieren, sodass die Rezyklierung dieser Nährstoffe sowohl der Kreislaufwirtschaft als auch der Ernährung von Pflanzen dienen kann. Eine thermische Behandlung dieser Gärreste reduziert potenzielle hygienische Bedenken. Für eine derartige Weiterverarbeitung bieten sich zwei thermochemische Verfahren an: die hydrothermale Karbonisierung und die pyrolytische Karbonisierung. Gärrestproben aus den vorhergehenden Anaerob-Versuchen wurden mit beiden Verfahren behandelt, um die Machbarkeit und Verwendbarkeit der Karbonisierungsprodukte zu prüfen. Diese thermochemischen Verfahrensschritte wurden am Institut für Verfahrens- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt, und die weiterführenden Analysen zur Produktcharakterisierung teilweise ebenfalls dort und teilweise bei einem externen Labor (AGES GmbH).

Im August 2023 konnten die ersten Tests zur Weiterverarbeitung des Gärrests durchgeführt werden. Aus ca. 60 Liter an Gärrest wurde zunächst ca. 3,2 kg an eingedicktem Gärrest gewonnen. Dieser wurde weiter getrocknet und für die ersten Pyrolyse-Tests herangezogen. Dieses Ausgangsmaterial wurde nach der Pyrolyse zu ca. 100 Gramm Biokohle umgewandelt.

Weil der Trockensubstanzgehalt des Ausgangsmaterials für den Pyrolyseversuch immer noch relativ niedrig war (TS = ca. 8%), war zu erwarten, dass die Methode der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) einen besseren Verwertungsweg darstellen könnte. Weitere Gärrest-Produktionen 2023 und 2024 wurden daher auch unter dem Aspekt durchgeführt, Gärrest-Material sowohl für pyrolytische als auch HTC-Verarbeitung mit der Produktion von Pyrolyse- und Hydrokohlen zu gewinnen.

Bei der Analytik der karbonisierten Proben von 08/2023 auf die Hauptelementzusammensetzung zeigte sich, dass die Kohlenstoff-Konzentration in Pyrokohlen (Biochar) aus dem Gärrest um ca. 20 %, in Hydrokohlen um ca. 4 % gegenüber dem Inputmaterial abnahm (Tabelle 4). Bezüglich der Stickstoff-Konzentration waren hingegen die Verluste der Hydrokohlen größer (minus 41 %) als bei den Pyrokohlen (minus 36 %). Durch die geringen Probenmengen waren aus diesem Material keine weiteren Spuren- oder Nährstoffanalysen möglich, sodass bei weiteren anaeroben Vergärungsdurchgängen eine Erhöhung des Gärrest-Outputs im Auge behalten wurde.

Tabelle 4: Grundcharakterisierung des im August 2023 produzierten Gärrest-Materials sowie seiner Karbonisate (eigene Darstellung, Institut für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien)

Material	C (% TM)	H (% TM)	N (% TM)
Gärrest-Input 08/2023	32,7	4,69	3,89
Gärrest-Pyrolysat (550 °C)	26,5	0,42	2,47
Gärrest-HTC-Karbonisat (210 °C)	31,6	3,73	2,29

Weitere Materialproduktionen für ein umfangreicheres Analysenprogramm wurden im November/Dezember 2023 durchgeführt. Die Gärrestproben vom Dezember 2023 wurden bei 60 °C getrocknet, bei 550 °C pyrolysiert und die gewonnenen Biochar-Proben auf die Basisparameter (Hauptelemente) sowie Nährstoff- und Spurenelemente analysiert (Tabelle 5). Bei diesem Material fiel ein hoher Verlust des Kohlenstoffs während der Pyrolyse (ca. 80 %) bei starker Erhöhung des Asche-

Anteils auf. Dadurch reicherten sich insbesondere die Spurenelemente stark an, aber auch die Konzentration des Gesamt-Phosphors stieg um 59 %. Allerdings sank der Anteil des leicht verfügbaren Phosphors (neutral-ammoncitratlöslich) am Gesamtphosphor auf 37 %, während im ursprünglichen Gärrest 99 % leicht pflanzenverfügbar waren. Kalium war nur in geringen Anteilen (< 1 %) vorhanden, was für diese Art von Gärresten typisch ist.

Tabelle 5: Zusammensetzung des im Dezember 2023 produzierten Gärrest-Materials sowie seines Pyrolysats (eigene Darstellung, Inst. für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien)

		Gärrest 12/2023 Input	Gärrest 12/2023 Pyrolysat 550 °C
Parameter	Einheiten		
C (%)	Massen-%	31,80	6,30
H (%)	Massen-%	3,67	0,00
N (%)	Massen-%	3,35	0,35
Asche	Massen-%	43,2	98
Phosphat (P2O5), neutral-ammoncitratlöslich	Massen-%	5,73	3,41
Phosphat (P2O5), gesamt	Massen-%	5,78	9,19
Eisen (Fe)	Massen-%	4,42	6,02
Aluminium (Al)	Massen-%	1,51	2,47
Aluminiumoxid (%)		2,86	4,67
Cadmium (Cd)	mg/kg	<1,5	<1,5
Nickel (Ni)	mg/kg	18,9	128,7
Zink (Zn)	mg/kg	463	511
Blei (Pb)	mg/kg	12,9	55,7
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,315	0,015
Quecksilber (Hg) i.d.TS	mg/kg	0,302	0,015
Chrom (Cr)	mg/kg	33,9	136,6
Kupfer (Cu)	mg/kg	147	255
Arsen (As)	mg/kg	4	4,8
Kaliumoxid (K2O), gesamt	Massen-%	0,81	0,99

Die Düngewirkung eines Pyrolyseprodukts aus Gärresten würde daher meist auf seinem Phosphorgehalt aufbauen, da der Stickstoffanteil fest gebunden ist und zu langsam freigesetzt würde, um zu einer relevanten Düngewirkung beizutragen. Die für eine landwirtschaftliche Anwendung relevante Einhaltung der Schadstoff-Grenzwerte nach EBC (European Biochar Certificate) ergab allerdings bereits im Gärrest-Inputmaterial eine Überschreitung der Zink- und Kupfergrenzwerte. Durch die Anreicherung im Pyrolyse-Produkt wurden diese Werte nochmals erhöht, aber auch die Chrom-, Blei- und Nickelkonzentrationen überschritten den EBC-Grenzwert. Quecksilber-, Arsen- und Cadmiumkonzentrationen lagen wie auch bei der Vergleichsprobe von 04/2024 unter den Grenzwerten. Allerdings würde dem Material noch die Verwendungsklasse EBC-Rohstoff offenstehen, sofern keine anderen Regelungen den Einsatz in z.B. Baustoffen verhindern.

Um die Reproduzierbarkeit dieses Ergebnisses zu prüfen, wurde im April 2024 eine weitere Probe Gärrest erhalten, welche ebenfalls wieder getrocknet und bei 550 °C pyrolysiert wurde (Analyseergebnisse siehe Tabelle 6). Es bestätigte sich der signifikante Verlust von Kohlenstoff

während der Pyrolyse (Reduktion der C-Konzentration um ca. 75 %) und die deutliche Erhöhung des Asche-Anteils auf 86 %. Es bestätigte sich somit, dass die in den Gärresten vorliegenden Kohlenstoffverbindungen sehr viel labiler als in Pflanzenmaterial sind, sodass bei der Pyrolyse von Gärresten ein hoher Anteil des Kohlenstoffs in flüchtige Verbindungen umgewandelt wird. Dies erhöht dadurch den thermisch nutzbaren Anteil der Pyrolyse-Produkte, während bei der Pyrolyse von Pflanzenmaterial Kohlenstoff durch aromatische Kondensierung angereichert wird und nur ein geringerer Anteil sich in flüchtigen Verbindungen findet.

Tabelle 6: Zusammensetzung des im April 2024 produzierten Gärrest-Materials sowie seines Pyrolysats (550 °C). (eigene Darstellung, Inst. für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien)

		Gärrest 04/24 Input	Gärrest 04/24 Pyrolysat 550 °C
Parameter	Einheiten		
C (%)	Massen-%	39,96	9,84
H (%)	Massen-%	6,00	0,03
N (%)	Massen-%	5,32	0,99
Asche	Massen-%	28,6	85,9
Phosphat (P ₂ O ₅), neutralammoncitratlöslich	Massen-%	6,6	5,5
Phosphat (P ₂ O ₅), gesamt	Massen-%	7,1	22,3
Eisen (Fe)	Massen-%	11,4	35,4
Aluminium (Al)	Massen-%	1,4	4,3
Aluminiumoxid (%)		2,7	8,1
Cadmium (Cd)	mg/kg	<1,5	<1,5
Nickel (Ni)	mg/kg	<5	29,4
Zink (Zn)	mg/kg	107	208
Blei (Pb)	mg/kg	<10	10,7
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,016	0,011
Quecksilber (Hg) i.d.TS	mg/kg	0,014	0,011
Chrom (Cr)	mg/kg	30	88,9
Kupfer (Cu)	mg/kg	33,1	85,1
Arsen (As)	mg/kg	8,2	9,1

Phosphor war wiederum eines der mengenmäßig wichtigsten Elemente (9,7 % Gesamtphosphor P_t), allerdings lag der Anteil des leicht verfügbaren Phosphors nur bei etwa 25 % des Gesamt-Phosphors. Die bedeutet aber nicht, dass 75 % des Phosphors gar nicht verfügbar wären – ihre Freisetzung erfolgt nur sehr zeitverzögert, was wiederum für die Vermeidung von Gewässer-Eutrophierungen bei Bodenerosionen von Vorteil ist. Hohe Aluminium- und Eisenkonzentrationen im Input- und Pyrolyseprodukt waren offenbar durch den Einsatz von Fällungsmitteln bei der Gärrest-Aufkonzentrierung bedingt.

Das Gärrest-Inputmaterial war dieses Mal hinsichtlich der Spurenelement-Konzentrationen unverdächtig, die unvermeidbaren Anreicherungen durch die Pyrolyse hatten allerdings geringfügige Überschreitungen der EBC-Grenzwerte von Nickel, Zink und Chrom für den Einsatz im Bio-Landbau zur Folge. Die Grenzwerte für die konventionelle Landwirtschaft wurden nicht überschritten, allerdings müssen erst die gesetzlichen Rahmenbedingungen für den landwirtschaftlichen Einsatz eines

derartigen Produktes geschaffen werden. Arbeiten für die Schaffung der erforderlichen Rahmenbedingungen sind auf nationaler und internationaler Ebene bereits im Laufen.

Im Juni 2024 wurde eine weitere Gärrestprobe erhalten, welche zum Vergleich mit den Pyrolysekohlen mittels hydrothormaler Karbonisierung (HTC) zu Hydrokohle umgewandelt wurden. Bei beiden Kohleprodukten wurde das gleiche chemische Analysenprogramm angewendet (Tabelle 7).

Tabelle 7: Hauptelemente, Nährstoff- und Spurenelemente des im Juni 2024 produzierten Gärrest-Materials sowie zweier HTC-Karbonisate (eigene Darstellung, Institut für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien)

		Gärrest 06/24 Input	HTC-Kohlen 180 °C	HTC-Kohlen 210 °C
Parameter	Einheiten			
C (%)	Massen-%	45,6	46,7	47,7
H (%)	Massen-%	5,6	5,6	5,5
N (%)	Massen-%	2,4	1,9	1,8
Asche	Massen-%	17,0	17,8	20,9
Phosphat (P2O5), gesamt	Massen-%	3,33	4,04	4,48
Phosphat (P2O5), neutralammoncitratlöslich	Massen-%	3,22	3,86	4,21
Kaliumoxid (K2O), gesamt	Massen-%	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Eisen (Fe)	Massen-%	2,64	2,91	3,47
Aluminium (Al)	Massen-%	0,31	0,35	0,43
Aluminiumoxid (%)		0,59	0,66	0,81
Cadmium (Cd)	mg/kg	< 1,5	< 1,5	< 1,5
Nickel (Ni)	mg/kg	39,9	43,2	49,2
Zink (Zn)	mg/kg	685	752	915
Blei (Pb)	mg/kg	10,5	12,5	15,7
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,208	0,206	0,160
Quecksilber (Hg) i.d.TS	mg/kg	0,207	0,204	0,159
Chrom (Cr)	mg/kg	52,6	60,8	64,5
Kupfer (Cu)	mg/kg	186	219	251
Arsen (As)	mg/kg	1,3	0,9	0,9

Die milderen Prozessbedingungen einer HTC im Vergleich zur Pyrolyse hatten geringere Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff zur Folge, welche bei diesem Material auch noch geringer als bei der HTC-Verarbeitung der Proben von 2023 der Fall gewesen war. Der Ascheanteil wurde nur geringfügig erhöht (um 13 %), der Stickstoffverlust (in das Prozesswasser) betrug ca. 23 %. Die Erhöhung des Gesamtphosphoranteils fiel mit +28 % höher als die Zunahme des Ascheanteils aus. Der Anteil des leicht verfügbaren Phosphats am Gesamtphosphat war bei den HTC-Produkten ähnlich wie beim Gärrest-Inputmaterial (95 bzw. 97 %).

Auffallend erhöht (über den EBC-Grenzwerten) waren bereits im Inputmaterial die Konzentrationen von Kupfer und Zink. Dieser Befund war bereits bei den Inputproben von 12/2023 aufgetaucht und war systematisch mit der Herstellung der Gärreste verbunden. Eine spätere Analyse ergab, dass aus einer Dichtung, die als Messinglegierung ausgeführt ist, eine Diffusion von Kupfer und Zink in den

Gärreaktor erfolgte. Die weitere Anreicherung der Konzentrationen in den Hydrokohlen führte dadurch zu einer umso deutlicheren Überschreitung der EBC-Grenzwerte auch für konventionelle Landwirtschaft (um 108 % bei Zink und um 135 % bei Kupfer), während die anderen Spurenelemente keine Grenzwerte überschritten. Allerdings ist nicht zu vergessen, dass Hydrokohlen derzeit generell nicht für landwirtschaftliche Anwendungen zugelassen sind.

Der Vergleich zweier HTC-Karbonisierungstemperaturen (180 vs. 210 °C) zeigte großteils nur geringe Unterschiede: die Elementkonzentrationen der Hydrokohlen nach höherer Prozesstemperatur lagen im Durchschnitt um 8 % höher als jene nach der niedrigeren Temperatur (bei einer Standardabweichung von 14 %), was somit keine signifikante Unterscheidung erlaubte.

5.4. Behandlung des flüssigen Gärrests

In urinseparierenden, oder "NoMix" Toiletten wie der Laufen SAVE! werden Urin und Fäzes (Fäkalien) getrennt gesammelt und mit Wasser gespült. Die beiden Fraktionen werden dabei mit Spülwasser verdünnt und als Gelbwasser und Braunwasser bezeichnet. Die Trennleistung für den Urin beträgt nach eigenen Erfahrungen und nach Angaben des Herstellers maximal 80 %. Das Braunwasser enthält somit ungefähr 20 % der Urinfracht.

Um den Anteil der ausgeschiedenen Nährstoffe im Gelbwasser und Braunwasser zu berechnen, müssen die Aufteilung der Nährstoffe in Urin und Fäzes (Tabelle 8) sowie die Trennleistung von 80 % berücksichtigt werden (Tabelle 9).

Tabelle 8: Frachten der drei wichtigsten Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium in Urin und Fäzes (Fäkalien) gemäß Friedler et al. (2013)

Fraktion	Gesamtstickstofffracht		Gesamtphosphor		Kalium	
	[g N/Pers/d]	[%]	[g P/Pers/d]	[%]	[g/Pers/d]	[%]
Urin	9,2	86	0,8	67	2,9	76
Fäzes	1,5	14	0,4	33	0,9	24
Total	10,7	100	1,2	100	3,8	100

Tabelle 9: Frachten der drei wichtigsten Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium in Gelbwasser und Braunwasser unter der Annahme einer Urinentrennleistung von 80 % und den Frachten in Tabelle 8.

Fraktion	Gesamtstickstofffracht		Gesamtphosphor		Kalium	
	[g N/Pers/d]	[%]	[g P/Pers/d]	[%]	[g/Pers/d]	[%]
Gelbwasser	7,4	69	0,64	53	2,3	61
Braunwasser	3,3	31	0,56	47	1,5	39
Total	10,7	100	1,2	100	3,8	100

Das Braunwasser wird in der Vergärung behandelt. Unter der Annahme, dass sich der größte Teil der Nährstoffe nach der Vergärung in der Flüssigphase befindet, kann gemäß Tabelle 9 davon ausgegangen werden, dass der Gärrest beträchtliche Anteile an Nährstoffen enthält, nämlich ungefähr 30 % des Stickstoffs, knapp 50 % des Phosphors und knapp 40 % des Kaliums.

Dabei ist zu beachten, dass bei der Lagerung und Behandlung von Gelbwasser und Braunwasser Phosphatausfällungen auftreten können. Bei der anaeroben Lagerung von Gelbwasser wird Harnstoff abgebaut und durch die dadurch bedingte pH-Erhöhung fallen Struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) und verschiedene Calciumphosphatverbindungen aus (Udert et al., 2003a). Mindestens 30 % des Phosphors werden dadurch ausgefällt und sind nicht mehr in der gelösten Phase vorhanden. Die verfügbaren Mengen an Calcium und Magnesium bestimmen, wie viel Phosphat ausfallen kann. Ausfällungen von Stickstoff und Kalium sind vernachlässigbar. Auch wenn Struvit die Stickstoffverbindung Ammonium enthält, so ist doch der Anteil des Stickstoffs, der ausfallen kann, nur

ungefähr 1 % (Udert et al., 2003b). Während die Phosphatausfällung bei gelagertem Gelbwasser gut untersucht ist, liegen uns keine Angaben zu Ausfällungen von Phosphatmineralien während der Vergärung von Braunwasser vor. Es ist davon auszugehen, dass auch bei der Braunwasserbehandlung Phosphatmineralien ausfallen ähnlich wie bei der Schlammbehandlung auf Kläranlagen (Wild et al., 1996).

Das **Vuna-Verfahren** (<https://www.vunanexus.com>, Fumasoli et al., 2016) wurde entwickelt, um Nährstoffe aus Gelbwasser in Form eines Flüssigdüngers zurückzugewinnen. Der aus getrennt gesammeltem Gelbwasser hergestellte Dünger wird in Österreich unter dem Namen Aurin vermarktet. Das Vuna-Verfahren besteht aus mehreren Schritten. Gelbwasser wird nach der anaeroben Lagerung in einem biologischen Reaktor nitrifiziert. Dabei wird die Hälfte der weitaus wichtigsten Stickstoffverbindung, Ammonium, zu Nitrat umgewandelt. Gleichzeitig sinkt der pH-Wert von 9 auf Werte zwischen 5,5 und 6,5, was eine Verflüchtigung von Ammoniak verhindert. In der biologischen Behandlung werden auch bis zu 90 % der organischen Stoffe abgebaut. Als nächster Behandlungsschritt folgt die Entfernung von Arzneimittelrückständen und anderer Mikroverunreinigungen durch Adsorption an granulierter Aktivkohle. Der abschließende Behandlungsschritt ist die Destillation, bei der die Lösung zum Dünger Aurin eingedampft wird. Mindestens 95 % des Wassers wird abgetrennt und zurückgewonnen. Durch die Erwärmung auf über 80 °C während der Destillation werden Mikroorganismen einschließlich Krankheitserregern abgetötet. Praktisch alle Nährstoffe, die in der Flüssigphase des gelagerten Gelbwasser vorliegen, werden im Vuna-Verfahren im Dünger Aurin aufkonzentriert. Ein kleiner Teil des Stickstoffs kann bei der Destillation entweichen, doch kann dieser Teil durch die Wahl eines niedrigen pH-Wertes während der Nitrifikation auf unter einem Prozent gehalten werden (Udert und Wächter, 2012).

Eingrenzung der Forschungsfragen

Es wurde untersucht, ob Gelbwasser und Gärreste gemeinsam mit dem Vuna-Verfahren behandelt werden können, um die Nährstoffe beider Flüssigkeiten in einem konzentrierten Dünger zurückzugewinnen.

Aufgrund bisheriger Studien und Erfahrungen bei der Behandlung von Gelbwasser kann davon ausgegangen werden, dass auch bei einem Gemisch von Gelbwasser und Gärresten Mikroverunreinigungen mit Aktivkohle entfernt werden (Heusser et al., 2024) und Krankheitserreger in der Destillation abgetötet werden. Da bei der Mischung von Gelbwasser und Gärresten die Konzentration der gelösten Stoffe sinkt, kann bei der Destillation mehr als 95 % des Wassers abgetrennt und wiedergewonnen werden.

Zwei wesentliche Fragen blieben und wurden mit Experimenten untersucht:

1. Kann ein Gemisch von Gelbwasser und Gärresten genauso effizient wie Gelbwasser nitrifiziert werden?
Von besonderem Interesse war dabei die Nitrifikationsrate, die den Energieverbrauch des biologischen Prozesses bestimmt.
2. Gehen durch die Mischung von Gelbwasser und Gärresten weitere Nährstoffe durch Ausfällungen verloren?
Der Großteil des Calciums und Magnesiums wird mit den Fäzes ausgeschieden. Es ist zu

erwarten, dass eine Mischung von Gärresten und Gelbwasser zu weiteren Ausfällungen von Phosphaten führt.

Diese beiden Fragestellungen wurden mit Experimenten untersucht.

Methodische Vorgangsweise

Die *biologische Behandlung* wurde in einem Durchlaufreaktor mit 12 Liter (L) maximalem Füllstand durchgeführt. Der Reaktor wurde im Fed-Batch-Verfahren betrieben: Nach der Sedimentation und dem Abzug von 4 L Überstand wurde das Reaktorvolumen chargenweise auf 12 L erhöht. Die Chargenzugabe wurde über den pH-Wert im Reaktor gesteuert: Sobald der pH durch die Nitrifikation auf 6,3 gesunken war, wurde so lange Zulauf zudosiert, bis der pH-Wert wieder auf 6,4 gestiegen ist. Die Sauerstoffkonzentration wurde während der Behandlung auf Werte zwischen 5 und 5,8 mg O₂/L gehalten. Der Reaktor wurde mit 12 L Belebtschlamm aus dem Vuna-Reaktor im Eawag-Hauptgebäude "Forum Chriesbach" angeimpft. Nach 3,9 Tagen wurde der Reaktor nochmals mit 1,8 L eingedicktem Belebtschlamm aus demselben Vuna-Reaktor angeimpft. Die Konzentration an ungelösten Stoffen war am Anfang des Versuchs 4,3 g/L und am Ende 5,7 g/L. Während des Versuchs wurde kein Schlamm abgezogen. Die Temperatur im Reaktor lag während der gesamten Versuchsdauer von 12 Tagen zwischen 21 und 24 °C. Insgesamt wurden 83 L behandelt.

Die Beschickung des Reaktors erfolgte mit einem Gemisch aus gelagertem Gelbwasser aus dem Urinsammeltank im "Forum Chriesbach" ("Urin FC", Tabelle 10) und Gärresten aus der Versuchsanlage an der BOKU Tulln ("Gärrest Aug/Sep 2023, Tabelle 10). Mit dem Ziel, einen möglichst realistischen Zulauf herzustellen wurde angenommen, dass 30 % des Stickstoffs aus den Gärresten des Braunwassers und 70 % des Stickstoffs aus dem Gelbwasser stammen (siehe Tabelle 9). Das Verhältnis des Gärrestvolumens (V_G) zum Gelbwasservolumen (V_U) wurde anhand der folgenden Gleichungen berechnet.

$$Fracht_{G\ddot{a}rrest} = Q_G \cdot C_G = 0,3 \cdot Fracht_{total}$$

$$Fracht_{Urin} = Q_U \cdot C_U = 0,7 \cdot Fracht_{total}$$

$$\frac{V_G}{V_U} = \frac{Q_G}{Q_U} = \frac{0,3 \cdot C_U}{0,7 \cdot C_G}$$

wobei Q_G der Zulauf der Gärrest, Q_U der Zulauf des Gelbwassers, C_G die Stickstoffkonzentration im Gärrest und C_U der Zulauf im Gelbwasser ist. Mit den Konzentrationen $C_G = 410$ mg N/L und $C_U = 2070$ mg N/L (Tabelle 10) ergibt sich ein Verhältnis von Gärrestvolumen zu Gelbwasservolumen von 2,2. Das tatsächliche Mischverhältnis war jedoch 2,3, da die für die Berechnung verwendeten Messwerte leicht von den oben genannten später bestimmten Konzentrationen abwichen.

Bei der oben angewendeten Mischrechnung wurde außer Acht gelassen, dass ein Teil der Nährstoffe nach der Sedimentation der Feststoffe und vor der Gärung mit dem Überstand abgezogen wird. Dies sollte bei zukünftigen Projekten berücksichtigt werden, weil der Überstand beträchtliche Mengen an Nährstoffen enthalten kann.

Der Einfluss des Mischverhältnisses auf die Nährstoffzusammensetzung wurde mit gelagertem Gelbwasser aus dem Büro Gebäude der Eawag ("Urin BU", Tabelle 10) und Gärrest von der Versuchsanlage der BOKU am IFA Tulln ("Gärrest, Jan-Mar 2024", Tabelle 10) untersucht. Drei

Experimente (A, B und C) wurden durchgeführt, wobei in jedem Experiment sieben Mischungen hergestellt wurden mit jeweils 0 %, 25 %, 33 %, 50 %, 67 %, 75 % und 100 % Gelbwasseranteil. Von jeder Mischung wurden 200 mL in 250 mL luftdicht verschlossene Flaschen abgefüllt.

In Experiment A wurden die Mischungen anschließend für 8,9 Tage ohne Rühren gelagert, bei Experiment B für 44 Tage ohne Rühren und bei Experiment C für 20 Stunden mit Rühren. Experiment A war ein Vorexperiment, das in diesem Bericht nicht weiter diskutiert wird. Bei Experiment B und C wurden vor der Mischung grobe Feststoffe mit Kaffeefiltern aus dem Gelbwasser und dem Gärrest entfernt. Bei diesen beiden Experimenten wurden die Mischungen im Duplikat angesetzt, sodass Mittelwerte von zwei unabhängigen Flaschen mit dem gleichen Mischverhältnis bestimmt werden konnten. Der Unterschied zwischen Experiment B und C lag in der Probenbehandlung: In Experiment C wurden die filtrierten Proben angesäuert, um weitere Ausfällungen während der Lagerung zu verhindern. Die Experimente fanden bei Raumtemperatur (ca. 22 °C) statt.

Im Folgenden ist mit Ammonium die Summe aus NH_4^+ und NH_3 und mit Phosphat die Summe aus allen Phosphatspezies bezeichnet.

Ergebnisse der Experimente

Im Rahmen der Gärrestversuche an der Eawag wurden mehrere Gärreste und Gelbwässer untersucht (Tabelle 10). Die Konzentrationen in den verschiedenen Gärrest-Proben unterscheiden sich stark, was auf die unterschiedlichen Randbedingungen bei den Vergärungsversuchen zurückzuführen ist. Mögliche Einflussfaktoren sind die Menge Spülwasser, der Anteil Urin im Braunwasser und die Aufkonzentrierung der Feststoffe vor der Vergärung. Der Überstand ist die Flüssigkeit, die nach der Sedimentation der Feststoffe noch vor der Vergärung abgezogen wird. Die Messungen zeigen, dass der Überstand zwar geringere Konzentrationen als der Gärrest enthält, aber dass die Konzentrationen in einem ähnlichen Bereich liegen. Je nach Volumen des Überstandes kann der Nährstoffverlust erheblich sein, wenn der Überstand nicht weiter verwertet wird. Das bedeutet allerdings auch, dass tendenziell der Nährstoffverlust zunimmt, je höher die Aufkonzentrierung der Feststoffe und somit je höher der Energieertrag bei der Vergärung ist.

Die Unterschiede bei den beiden Gelbwasserproben sind auf die unterschiedlichen Toilettensysteme zurückzuführen. Im Bürogebäude ("Urin BU") waren zu diesem Zeitpunkt noch Roediger-NoMix-Toiletten eingebaut, die zwar weniger komfortabel sind, aber eine bessere Gelbwasserabtrennung gewährleisten als Laufen SAVE! Toiletten. Das Gelbwasser im Forum Chriesbach ("Urin FC") stammte aus drei Gebäuden, von denen eines bereits mit Laufen SAVE! ausgerüstet war und bei denen ein anderes ältere, zum Teil nicht mehr ganz funktionstüchtige Roediger-NoMix-Toiletten enthielt.

Der in Tabelle 10 aufgelistete Zulauf ist eine Mischung aus "Urin BU" und "Gärrest Aug/Sep 2023". Die Konzentrationen stimmen gut mit den Werten überein, die man aufgrund des Mischungsverhältnisses von $V_G/V_U = 0,43$ erwarten würde.

Obwohl versucht wurde, einen möglichst repräsentativen Zulauf aus Gärrest und Gelbwasser herzustellen, konnte dies nur annähernd erreicht werden. Einerseits wurde bei der Berechnung des Mischverhältnisses nicht berücksichtigt, dass ein Teil der Nährstoffe des Braunwassers mit dem Überstand verloren geht, andererseits sind die Konzentrationen im Gärrest stark von der Effizienz der

Gelbwasserabtrennung und der Feststoffkonzentrierung abhängig. Besonders die Feststoffkonzentrierung war während des Projektes noch in Entwicklung und nicht optimiert.

Tabelle 10: Zusammensetzung von Gärrest, Überstand, Gelbwasser und Reaktorzulauf (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag)

Material	Gärrest Mai/Juni 2023		Gärrest Aug/Sep 2023		Gärrest Jan-März 2024		Überstand Mai/Juni 2023	Urin FC Okt 2023	Urin BU August 2024	Zulauf Okt 2023		
Probenahmeort	BOKU Tulln		BOKU Tulln		BOKU Tulln		BOKU Tulln	Eawag FC	Eawag BU		biol. Reakt.	
Anzahl Messungen	4		1		4		1	1	4		3	
	Mittel	CV%	Mittel		CV%				Mittel	CV%	Mittel	CV%
N _{tot}	[mg/L]	-	410		-		-	2070	-		-	
N _{sol} ^c	[mg/L]	843 4,3	408		147 12,5		189	2110	3808 14		819 2,0	
NH ₄ -N	[mg/L]	782 5,0	324		109 3,5		145	2000	3260 12		833 7,6	
NO ₃ -N	[mg/L]	- -	<0.18		-		-	1,26	-		<18 -	
NO ₂ -N	[mg/L]	- -	2.49		-		-	<15,0	-		<15 -	
CSB _{tot} ^b	[mg/L]	1940 115	822		866 56,1		1533	242	2815 4		-	
CSB _{gel} ^b	[mg/L]	413 25,9	660		705 33,1		368	229	2727 3		-	
TOC	[mg/L]	315 56,7	-		-		487	-	-		-	
DOC	[mg/L]	118 4,6	-		-		101	-	-		-	
TIC	[mg/L]	434 2,3	-		279 6,3		152	-	1635 10		-	
Alk	[mmol/L]	59 3,3	47.9		-		23.2	153	-		-	
Cl	[mg/L]	5380 17,1	472		260 7,4		1210	1970	2403 13		907 2,3	
Na	[mg/L]	1360 6,6	662		444 2,4		393	1070	1283 13		790 4,6	
K	[mg/L]	1860 5,2	119		68 3,6		638	915	1120 11		373 8,9	
P _{tot}	[mg/L]	- -	54.3		-		-	477	-		-	
PO ₄ -P	[mg/L]	524 27,6	15.3		2 9,4		315	127	137 10		-	
SO ₄	[mg/L]	6 45,7	26.6		9 11,9		6.69	408	513 18		-	
Mg	[mg/L]	139 22,6	16.5		23 13,5		288	<5,00	6 158		-	
Ca	[mg/L]	570 4,8	31.7		46 4,7		656	<20,0	16 30		-	
GUS ^a	[mg/L]	12000 11,4	-		17 -		55	-	387 -		-	
pH	[-]	7,4 0,6	8.79		8 4,0		7.36	9,07	9 0		-	

Mittel: Mittelwert, CV%: relative Standardabweichung

kursiv unzuverlässige Werte

^a Gärreste Mai/Juni 2023: drei Messwerte

Gärreste Jan-März 2024: ein Messwert

Urin BU August 2024: ein Messwert

^b Gärreste Jan-März 2024: zwei Messwerte

Urin BU August 2024: zwei Messwerte

^c Zulauf biologischer Reaktor: nur zwei Messwerte (12.10.2023 und 13.10.2023)

Biologische Behandlung - Ergebnisse

Die Gelbwasser/Gärrest-Lösung konnte mit einer hohen Umsatzrate nitrifiziert werden (siehe auch Abbildung 13). Die Nitrifikationsrate nach Erreichen von drei hydraulischen Aufenthaltszeiten, also nachdem die Anfangslösungen zu mehr als 95 % ausgeschwemmt worden waren, betrug 780 mg N/L/d

und war somit höher als die in der Literatur dokumentierten Raten für die Produktion von Ammoniumnitrat aus Gelbwasser (Larsen et al., 2021). Höhere Raten können in der Literatur für Experimente gefunden werden, bei denen Ammonium dank Basendosierung vollständig zu Nitrat oxidiert wurde (Larsen et al., 2021) oder wenn Ammonium nur bis zu Nitrit und nicht bis zu Nitrat oxidiert wurde (Udert et al., 2003c). Hohe Ammoniumkonzentrationen behindern die Nitrifikation, besonders die Nitritoxidation. Durch die Mischung von Gelbwasser mit Gärrest, der geringere Ammoniumkonzentrationen enthält, kann somit eine höhere Nitrifikationsrate erreicht werden.

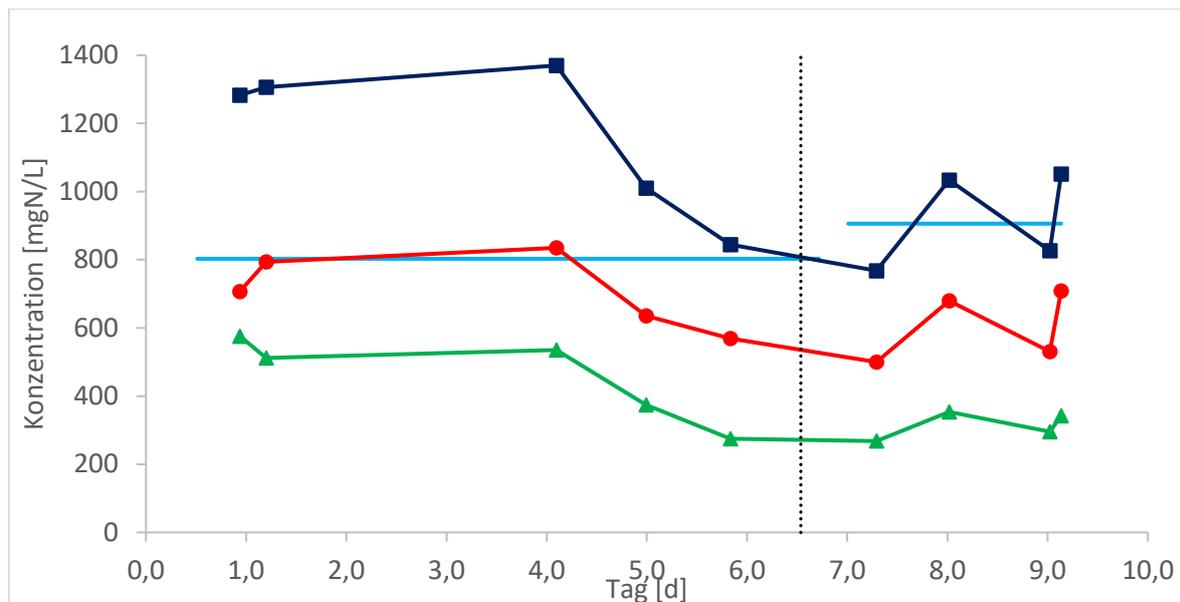


Abbildung 13: Konzentrationsverlauf von Ammonium und Nitrat während der biologischen Behandlung der Gelbwasser/Gärrest-Lösung. Dunkelblaue Linie und Quadrate: Summe von Nitrat und Ammonium im Ablauf; grüne Linie und Dreiecke: Ammonium im Ablauf, rote Linie und Kreise: Nitrat im Ablauf; hellblaue Linie: Ammonium im Zulauf. Gepunktete Linie: drei hydraulische Aufenthaltszeiten nach zweiter Zugabe von Schlamm. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag)

Weitere Beobachtungen sprechen dafür, dass die Mischung von Gelbwasser mit Gärrest die Nitrifikation vereinfacht. Während des gesamten Versuchs konnte kein Nitrit im Ablauf gefunden werden. Nitritakkumulation ist ein häufiges Problem der Nitrifikation von Gelbwasser (Faust et al., 2024). Das Verhältnis von Nitrat zu Ammonium war am Ende des Experiments ungefähr 2, es konnten also ungefähr zwei Drittel des Ammoniums im Zulauf zu Nitrat umgewandelt werden. Bei der Nitrifikation von Gelbwasser ist das Verhältnis 1. Das Nitrat-zu-Ammonium-Verhältnis wird durch die Alkalinität bestimmt, die in Gelbwasser ungefähr gleich groß ist wie die Ammoniumkonzentration (gemessen als mol/L). Im verwendeten Gärrest von August/September 2023 war das molare Verhältnis 2,1 mol/mol (Tabelle 3). In der Mischung mit Gelbwasser ergab sich somit ein molares Verhältnis von 1,3 mol/mol. Bei diesem Verhältnis können 65 % des Ammoniums oxidiert werden, was auch im Experiment beobachtet wurde.

Energiebedarf für die Behandlung der Gelbwasser/Gärrest-Lösung

Um abzuschätzen, wie hoch der Energiebedarf für die Behandlung der Gelbwasser/Gärrest-Lösung im Vergleich zur Behandlung von Gelbwasser im Vuna-Reaktor ist, können die Angaben zur Gelbwasser-Behandlung aus Fumasoli et al. (2016) verwendet werden. Die Autoren nahmen an, dass der biologische Reaktor kontinuierlich belüftet wird, um die Biomasse in Suspension zu halten. Sie berechneten, dass die elektrische Leistungsaufnahme für die Belüftung des 120 L Reaktors 70,4 W war und der volumetrische Energiebedarf für die Destillation 107 kWh/m³. Der Energiebedarf pro Kilogramm Stickstoff berechnet sich dann mit der folgenden Formel

$$E_{el,Biologie} = \frac{P_{el}}{V \cdot r_{NH_4}}$$

$$E_{el,Distillation} = \frac{E_{vol,Distillation}}{S_{NH_4,in}}$$

$$E_{el,gesamt} = E_{el,Biologie} + E_{el,Distillation}$$

mit $E_{el,Biologie}$: elektrischer Energiebedarf des biologischen Reaktors in kWh/kg N
 P_{el} : Leistungsaufnahme des biologischen Reaktors (0,0704 kW)
 V : Reaktorvolumen (0,12 m³)
 r_{NH_4} : volumetrische Beschickung des Reaktors mit Ammonium (4,86·10⁻² kg N/m³/h)
 $E_{el,Distillation}$: elektrische Energiebedarf für die Destillation in kWh/kg N
 $E_{vol,Distillation}$: volumetrische, elektrischer Energiebedarf (107 kWh/m³)
 $S_{NH_4,in}$: Ammoniumkonzentration im Zulauf

Wie in der Studie von Fumasoli et al. (2016) wird näherungsweise angenommen, dass das gesamte Wasser destilliert wird.

Tabelle 11: Elektrischer Energieverbrauch berechnet für die Anlage, beschrieben in Fumasoli et al. (2016). Die Angaben für die Konzentrationen und die volumetrische Beschickung sind aus dieser Studie und aus Fumasoli et al. (2016) für die Gelbwasser/Gärrest-Lösung bzw. für das gelagerte Gelbwasser

Zulauf	$S_{NH_4,in}$ [kgN/m ³]	$r_{NH_4,in}$ [kg N/m ³ /d]	$r_{NH_4,in}$ [kgN/m ³ /h]	$E_{el,Biologie}$ [kWh/kgN]	$E_{el,Distillation}$ [kWh/kgN]	$E_{el,gesamt}$ [kWh/kgN]
Gelbwasser/Gärrest	0,906	1,17	0,0486	12,1	118	130
Gelbwasser niedrige Konzentration	1,8	1,28	0,0533	11,0	59	70
Gelbwasser hohe Konzentration	4,1	0,62	0,0258	22,7	26	49

Die Angaben in Tabelle 11 erlauben einen Vergleich der Behandlung der Gelbwasser/Gärrest-Lösung mit der Behandlung von Gelbwasser. Die Werte für das Gelbwasser (niedrige Konzentration) mit 1,8 gN/L können näherungsweise verwendet werden, um den Energiebedarf zu berechnen, der für die Behandlung des in diesem Experiment verwendeten Gelbwassers nötig gewesen wäre. Der Energiebedarf für die biologische Behandlung ist in einem ähnlichen Bereich wie für die Behandlung von Gelbwasser. Hier wird der wegen der geringen Zulaufkonzentration erhöhte Energiebedarf durch die Einsparung durch die hohe Nitrifikationsrate kompensiert. Der Energiebedarf für die Destillation

ist aber wegen der geringen Zulaufkonzentration doppelt so hoch, sodass auch der gesamte Verbrauch an elektrischer Energie knapp doppelt so hoch ist (Tabelle 11).

Ergebnisse der Mischversuche

Wie bereits oben beschrieben, wurde der Einfluss verschiedener Mischungen von Gelbwasser und Gärrest auf die Nährstoffzusammensetzung untersucht. Drei Experimente (A, B und C) wurden mit jeweils sieben Mischungen (0 %, 25 %, 33 %, 50 %, 67 %, 75 % und 100 % Gelbwasseranteil) durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse dieser Mischversuche hinsichtlich der Konzentrationen von gelöstem Kalium, Ammonium und Phosphat (für Experiment C).

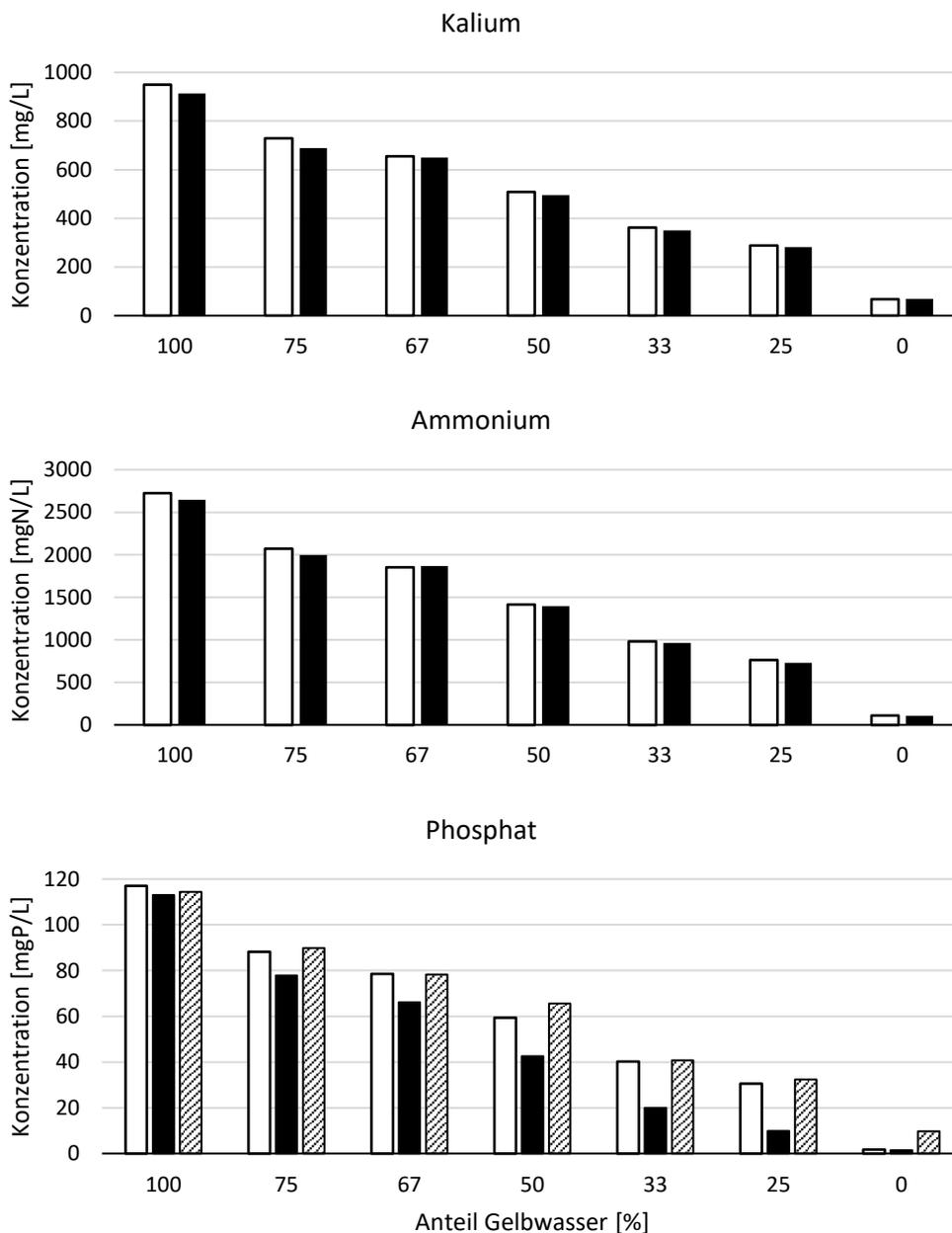


Abbildung 14: Konzentrationen von gelöstem Kalium, Ammonium und Phosphat in den Mischlösungen in Experiment C. Weiß: Erwartungswerte; schwarz: Messungen; schraffiert: Summe aus Messungen und berechneten Fällungsprodukten (siehe auch Tabelle 12) (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag)

Die Ammonium- und Kalium-Konzentrationen haben sich bei der Mischung von Gärrest und Gelbwasser stabil verhalten, während bei den gelösten Phosphat-Konzentrationen Verluste auftraten. Dies zeigt ein Vergleich der gemessenen Werte mit den Konzentrationen, die mit Hilfe des Mischverhältnisses und den Konzentrationen in den Ausgangslösungen Gärrest und Gelbwasser berechnet wurden (Abbildung 14). Auch bei Chlorid und Natrium konnten keine Verluste festgestellt werden (Daten nicht gezeigt). Der Phosphatverlust nimmt dabei mit dem Verhältnis von Gärrest zu Gelbwasser absolut (Abbildung 14) und relativ (Tabelle 12) zu. Zusammen mit Phosphat nehmen auch die Konzentrationen an gelöstem Calcium und Magnesium ab, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß. Bei Magnesium wurden Minderbefunde über 90 % festgestellt, während ungefähr ein Drittel des Calciums fehlte. Bei dem 55 % Minderbefund für Calcium für den Gelbwasseranteil 50 % (Tabelle 12) handelt es sich wahrscheinlich um einen Ausreißer. Die Werte zeigen, dass Magnesium fast vollständig ausfällt, während von Calcium meistens der größte Teil noch gelöst bleibt.

Magnesium fällt als Struvit aus, während Calcium mit Phosphat verschiedene Verbindungen eingehen kann. Unter der Annahme, dass sich Octacalciumphosphat (OCP) bildet, konnten in einer Studie die Verläufe der Phosphat- und Calcium-Messwerte am besten wiedergegeben werden (Udert et al., 2003 a). Unter der Annahme, dass sich Struvit und OCP bilden, können auch in diesem Fall die Verringerungen der gelösten Phosphatkonzentrationen ungefähr wiedergegeben werden, wobei Struvit ca. zwei Drittel der Ausfällungen ausmacht und OCP ein Drittel (Tabelle 13). Die Werte für OCP schwanken stärker und die hohen Werte für die Gelbwasseranteile von 75 % und 50 % sind möglicherweise Ausreißer. Die Vermutung, dass es sich bei den beiden Werten um Ausreißer handelt, wird auch durch die Messungen in Experiment B bestätigt. Hier lag der Durchschnitt der Calcium-Minderbefunde bei 27 %.

Tabelle 12: Minderbefund von gelöstem Phosphat, Calcium und Magnesium gegenüber den Erwartungswerten in Experiment C. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag)

Anteil Gelbwasser	Phosphat	Calcium	Magnesium
[%]	[%]	[%]	[%]
75	12	41	87
67	16	23	91
50	28	55	92
33	50	28	78
25	68	37	66

Die Phosphatverluste nahmen mit dem Anteil des Gärrests in der Mischung zu (Tabelle 14) und erreichten bei 75 % Anteil Gärrest (bzw. 25 % Gelbwasser) ca. zwei Drittel. Dieser Trend stimmt auch mit den Messwerten in Experiment B überein (Daten nicht gezeigt). Bei beiden Experimenten lag der Phosphatverlust bei 50% Gärrestanteil bei ca. 30 %. Falls der Gärrest, wie es in diesen Experimenten der Fall war, nur vernachlässigbar zur Gesamtkonzentration des Phosphats beiträgt (siehe Tabelle 10), muss davon ausgegangen werden, dass ein beträchtlicher Anteil des Nährstoffs Phosphor durch die Mischung von Gärrest und Gelbwasser verloren geht, während die Nährstoffe Stickstoff und Kalium nicht signifikant beeinflusst werden. Mit Hilfe der Daten in Experiment C kann berechnet werden, dass die Gesamtmenge des gelösten Phosphats um 25 % abnimmt, wenn Gelbwasser mit einer äquivalenten Menge Gärrest gemischt wird. Die Gesamtmengen an Stickstoff und Kalium nehmen leicht um 5 % bzw.

7 % zu (Tabelle 14). Der Verlust an Phosphat und der Zugewinn an Stickstoff und Kalium ist umso höher, je mehr Gärrest zugegeben wird.

Tabelle 13: Theoretische Anteile der Mineralien Struvit ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) und Octacalciumphosphat (OCP, $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) am Minderbefund von gelöstem Phosphat in Experiment C. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag)

Anteil Gelbwasser	Struvit	OCP
[%]	[%]	[%]
75	61	55
67	70	28
50	79	58
33	74	29
25	69	39

Tabelle 14: Veränderung der zurückgewonnenen Nährstoffmenge durch Zumischung von Gärrest unter der Annahme, dass das Gelbwasservolumen gleichbleibt und das Gärrestvolumen zunimmt. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag)

Anteil Gelbwasser	Phosphat	Ammonium	Kalium
[%]	[%]	[%]	[%]
100	0	0	0
75	-8	1	2
67	-12	6	4
50	-25	5	7
33	-47	9	14
25	-65	10	21

Schlussfolgerungen

Die Resultate und die Diskussion der Experimente erlauben die folgenden Schlussfolgerungen:

- Das Vuna-Verfahren eignet sich für die Behandlung von Mischungen aus Gelbwasser und Gärresten. Bei der biologischen Behandlung hohe Nitrifikationsraten erreicht werden, ohne dass sich Nitrit angereichert hat.
- Der Phosphorertrag im Düngerprodukt des Vuna-Verfahrens nimmt substantziell ab, wenn Gelbwasser mit Gärrest verdünnt wird. Dies ist dadurch bedingt, dass im Düngerprodukt zurzeit nur die gelösten Nährstoffe zurückgewonnen werden und die Mischung von Gärrest und Gelbwasser zu Phosphatausfällungen führt.
- Der Stickstoff- und Kaliumertrag im Düngerprodukt des Vuna-Verfahrens wird leicht erhöht, weil der Gärrest zusätzliche Mengen an Stickstoff und Kalium liefert. Da die Konzentrationen von Stickstoff und Kalium im Gärrest jedoch wesentlich geringer sind als im Gelbwasser, ist dieser Nährstoffgewinn gering.

- Der elektrische Energieverbrauch in kWh/kg N für die biologische Behandlung des Gelbwasser/Gärrest-Gemisches kann doppelt so hoch sein wie der elektrische Energieverbrauch, der für die Behandlung des unvermischten Gelbwasser notwendig wäre. Da die Rückgewinnung von Stickstoff und Kalium aber nur gering erhöht und für Phosphor sogar verringert wird, ist eine gemeinsame Behandlung des Gärrestes mit dem getrennt gesammelten Gelbwasser für die Nährstoffrückgewinnung wenig sinnvoll.
- Falls das Hauptziel die Rückgewinnung von Wasser ist, kann eine gemeinsame Behandlung von Gelbwasser und Gärresten interessant sein.

5.5. Energiebilanz der Biogaserzeugung

Für eine Energiebilanzierung der Biogasproduktion aus Braunwasser wurden die verschiedenen energetischen Inputs für den Betrieb der Biogasanlage dem energetischen Output in Form des Energiegehalts von Biomethan bzw. in Form des Stromertrags durch eine Brennstoffzelle, die mit dem erzeugten Biomethan betrieben wird, gegenübergestellt. Ausgegangen wurde dabei von einer Referenz-Biogasanlage für ein Wohngebäude mit 100 Bewohner:innen. Die Ergebnisse wurden auf Gebäude mit niedrigerer oder höherer Personenbelegung skaliert.

Auf der Inputseite wurden der Energiebedarf für die Förderpumpe (zur Förderung des Substrats), die Rührwerke, die Steuerung, und die Beheizung der Fermenter berücksichtigt. Der Heizenergiebedarf für die Fermenter entsteht einerseits, um das Substrat auf die gewünschte Temperatur in den Fermentern zu bringen sowie um die Wärmeverluste an die Umgebung auszugleichen (um die Reaktortemperatur möglichst konstant zu halten).

Die Referenzanlage besteht zwei Fermentern, welche mit einer Durchschnittstemperatur von 42 °C betrieben werden. Die Geometrie der Fermenter ist vereinfacht würfelförmig angenommen. Die Fermenter sind wärmegeklämt (Dämmdicke 15 cm seitlich, 10 cm oben/unten, Wärmeleitfähigkeit der Dämmung: 0,03 W/mK). Aus der Verweilzeit (Annahme: 15 Tage) und der zugeführten Substratmenge pro Tag ergibt rechnerisch sich das benötigte Volumen pro Fermenter. Die folgende Tabelle zeigt weitere Annahmen für Parameter zur Berechnung des Energieinputs für das Betreiben der Biogasanlage.

Tabelle 15: Parameter zur Berechnung des Energieinputs für die Biogas-Referenzanlage (Wohngebäude mit 100 Bewohner:innen). (eigene Darstellung)

Parameter	Wert	Einheit
<i>Förderpumpe</i>		
Elektrische Leistung	750	W
Maximale Fördermenge	420	L/h
<i>Rührwerke</i>		
Anzahl der Rührwerke	2	
Elektrische Leistung pro Rührwerk	210	W
Laufzeit pro Tag	3,2	h
<i>Steuerung (durchschn. Dauerleistung)</i>		
	15	W
<i>Fermenter</i>		
mittl. Temperatur	42	°C
mittl. Verweilzeit	15	d
U-Wert oben/unten	0,29	W/m ² K
U-Wert Mantel (Seitenwände)	0,29	W/m ² K

Die folgende Tabelle (Tabelle 16) zeigt die Werte jener Parameter, die zur Berechnung des Biomethan- und des davon abgeleiteten Energieertrags herangezogen wurden. Der Biomethanertrag hängt von der Menge an Fäkalien, Toilettenpapier und Speiseresten, dem Gehalt an organischer Trockensubstanz für

diese Fraktionen sowie vom jeweiligen spezifischen Biomethanertrag (für Fäkalien, Toilettenpapier und Speiseresten, in Liter/kg OTS) ab. Der Wert für den Biomethanertrag für Fäkalien wurde von Singh et al. (2021) entnommen, die Werte für Toilettenpapier und Speiseresten wurden aus Laborversuchen ermittelt. Es ergibt sich damit ein etwas höherer Biomethanertrag im Vergleich zu den im kontinuierlichen Laborbetrieb erreichten Werten. Es ist allerdings davon auszugehen, dass bei einem optimierten Betrieb einer Pilotanlage und einer verbesserten Fest-/Flüssigtrennung ähnliche Werte, wie für die Bilanzierungsberechnung verwendet, erreicht werden können. Unter Zugrundelegung der in obiger Tabelle dargestellten Parameterwerte ergibt sich ein Energieertrag aus Biomethan von 0,24 kWh pro Person und Tag.

Tabelle 16: Parameter zur Berechnung des Biomethan- und Energieertrags, pro Person und Tag (eigene Darstellung)

Parameter	Wert	Einheit
Fäkalienmenge (pro Person und Tag)	0,2	kg/P.d
Toilettenpapiermenge (pro P. u. T.)	0,003	kg/P.d
Speiserestmenge (pro P. u. T.)	0,1	kg/P.d
<i>Gehalte an OTS (Organische Trockensubstanz), bezogen auf Masse</i>		
Fäkalien	20	%
Toilettenpapier	92	%
Speisereste	17	%
<i>OTS, pro Person und Tag</i>		
Fäkalien	0,04	kg/P.d
Toilettenpapier	0,003	kg/P.d
Speisereste	0,017	kg/P.d
<i>Biomethanertrag, spezifisch</i>		
Fäkalien	375	L/kg OTS
Toilettenpapier	286	L/kg OTS
Speisereste	477	L/kg OTS
<i>Biomethanertrag, pro Person und Tag</i>		
Fäkalien	15,0	L/P.d
Toilettenpapier	0,8	L/P.d
Speisereste	8,1	L/P.d
Gesamt	23,9	L/P.d
<i>Energieertrag aus Biomethan, pro Person und Tag</i>		
	0,24	kWh/P.d

Die Ergebnisse der Energiebilanzberechnung für die Referenzanlage in einem Wohnhaus mit 100 Bewohner:innen sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Es ergibt sich in Summe ein Biomethanertrag von 2,39 m³ pro Tag, was einem Energieinhalt von 23,9 kWh pro Tag entspricht. Unter Abzug des Energieinputs von 5,7 kWh ergibt sich somit ein Nettoenergieertrag von 18,2 kWh pro Tag (bzw. von 0,18 kWh pro Person und Tag). Unter Annahme eines Wirkungsgrads von 60 % für eine

nachgeschaltete Brennstoffzelle ergibt sich eine Stromausbeute aus dem produzierten Biomethan von 14,3 kWh, unter Abzug des Energie- bzw. Strominputs ergibt dies einen Netto-Stromertrag von 8,6 kWh pro Tag (bzw. von 0,086 kWh pro Person und Tag).

Tabelle 17: Energiebilanz für eine Biogas-Referenzanlage in einem Wohnhaus mit 100 Bewohner:innen

<i>Parameter</i>	<i>Wert (in kWh/d)</i>
<i>Energieinputs</i>	
Förderpumpe	0,12
Rührwerke	1,34
Steuerung	0,36
Reaktorheizung	
Wärmezufuhr Substrat	1,90
Wärmeverluste	1,96
<i>Summe Energieinputs</i>	<i>5,68</i>
<i>Biomethanertrag</i>	<i>23,85</i>
<i>Nettoenergieertrag</i>	<i>18,17</i>
<i>Brennstoffzelle</i>	
Stromertrag (bei 60% Wirkungsgrad)	14,3
Abwärme	9,54
<i>Nettostromertrag</i>	<i>8,63</i>

Das Ergebnis der Energiebilanzierung für Gebäude mit unterschiedlicher Anzahl an Bewohner:innen zeigt die folgende Abbildung. Es ist erkennbar, dass der Nettoenergieertrag und der Netto-Stromertrag (pro Person und Tag) mit steigender Gebäudegröße (bzw. Bewohner:innenanzahl pro Gebäude) wächst, während der Energieinput pro Person und Tag sinkt. Ab einer Anzahl von 100 Bewohner:innen schwächt sich dieser Effekt deutlich ab, was am relativ flachen Verlauf der Ertragskurven bzw. der Inputkurve erkennbar ist. Hingegen sinkt unterhalb einer gewissen Bewohner:innenanzahl pro Gebäude der Nettoenergie- und Nettostromertrag sehr stark (insbesondere für Gebäude mit einer BewohnerInnen Anzahl unterhalb von 30 Personen ist dieser Effekt sehr deutlich erkennbar).

Während unter den gegebenen Annahmen der Nettostromertrag bei einer Bewohner:innenanzahl von 30 Personen bei 0,065 kWh pro Person und Tag liegt, liegt dieser bei einer Bewohner:innenanzahl von 500 Personen bei 0,1 kWh pro Person und Tag. Ähnliches gilt für den Nettoenergieertrag: Dieser liegt bei einer Bewohner:innenanzahl von 30 Personen bei 0,16 kWh pro Person und Tag liegt und bei einer Bewohner:innenanzahl von 500 Personen bei 0,2 kWh pro Person und Tag.

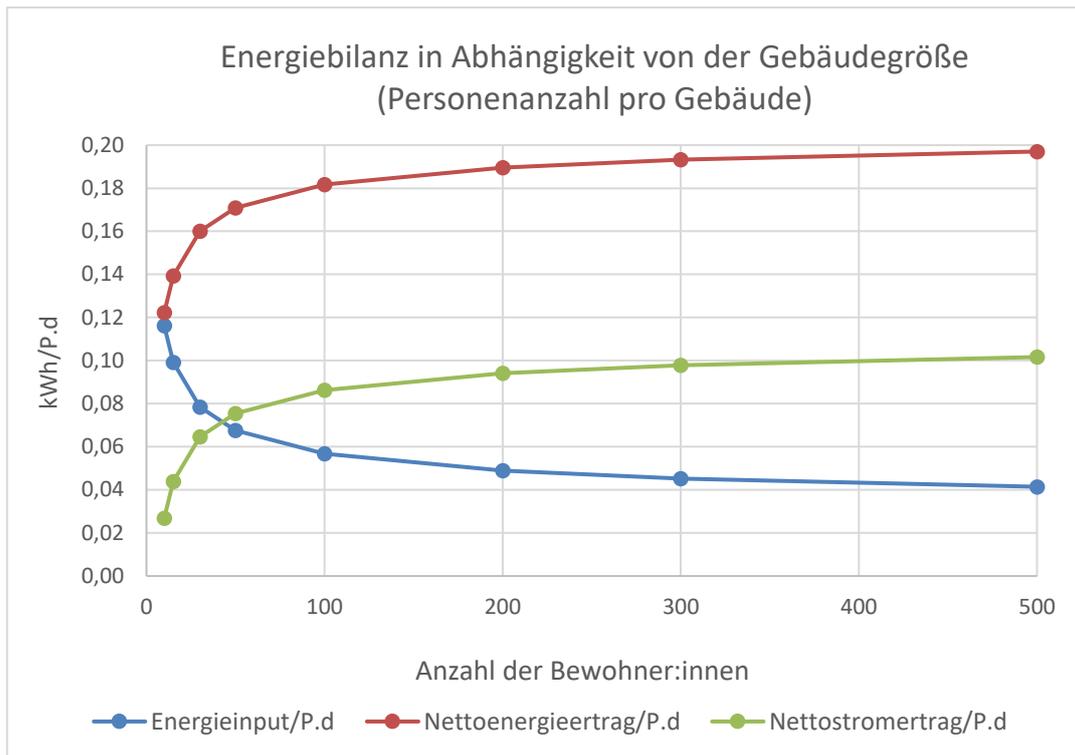


Abbildung 15: Energiebilanz in Abhängigkeit von der Gebäudegröße (Personenanzahl pro Gebäude) (eigene Darstellung, Schöberl & Pöll GmbH)

5.6. Sozialwissenschaftliche Untersuchungen

Der sozialwissenschaftlich orientierte Schwerpunkt im Projekt begann mit einer internationalen Literaturrecherche zum Thema WC-Nutzer:innen-Akzeptanz/Ablehnung, mit besonderem Fokus auf Trenntoiletten. Ziel war die Einordnung der im Projekt geplanten Erhebungen in den Kontext der bisherigen sozialwissenschaftlichen Bearbeitung des Themas und die Identifikation relevanter Ergebnisse wie auch von Problemen und Hemmnissen.

Die Recherche im Suchbereich ergab 323 Publikationen und Darstellungen, wobei die meisten Treffer zu WC-Psychologie/Soziologie (58), NoMix-Urintrennung (49) und Öffentliche/Schul-/Universitäts-WCs (45) erzielt wurden. Die NoMix-Trenntoilette vor der SAVE!-Technologie wurde in Europa positiv beurteilt, scheiterte aber an praktischen Mängeln (zu wenig Spülung, aufwendigere Reinigung, siehe z.B. Lienert & Larsen 2009). Diesen Nachteil hat die SAVE!-Technologie nicht.

Im Projekt wurden drei Erhebungen durchgeführt:

1. Befragung der Belegschaft am Produktionsstandort Gmunden der Fa. Laufen nach dem Einbau von zwei Save! Trenntoiletten. Schwerpunkte der Befragung: Nutzer:innenakzeptanz und -verhalten.
2. Online-Befragung, Kammerhof-Museum Gmunden, Sonderausstellung „Klo & so“, Zielgruppe Museumsbesucher:innen, Schwerpunkte: Nutzer:innenakzeptanz und -verhalten (im Vergleich zu Befragung 1 etwas allgemeiner und breiter angelegt).
3. Online-Befragung, Kreativ-Campus Atelier Gardens, Berlin Tempelhof (hier sind SAVE! Trenntoiletten installiert); Zielgruppe: WC-Nutzer:innen, Online-Fragebogen enthielt Elemente von Befragung 1 und Befragung 2.

5.6.1. Befragung der Belegschaft am Produktionsstandort Gmunden (Fa. Laufen)

Als motivierendste Behandlung des sozial/emotional nicht unheiklen Themas persönlicher WC-Nutzung einer Trenntoilette wurde eine fokussierte anonyme Fragebogenerhebung direkt nach dem WC-Besuch gewählt.

Unter Berücksichtigung der Literatur wurde die Feldstudie (zur Erhebung der Nutzerakzeptanz der neuartigen Trenntoilette SAVE!) im Diskurs mit der Firma Laufen/Gmunden und der Gewerkschaft als schriftliches Fragebogen-Feedback geplant. Unmittelbar nach Inbetriebnahme der zwei SAVE!-Testtoiletten am Standort Gmunden der Fa. Laufen wurde Anfang Juli 2022 (mit ausführlicher Erklärung durch die Werksleitung unter Teilnahme von Mitgliedern des Projektteams) mit der Feldstudie begonnen.

Der bewusst kurz gehaltene Fragebogen mit 7 Items (davon 3 qualitativ) fragte nach dem ersten Eindruck, Problemen bei der Benutzung, möglichen Verbesserungen, Akzeptanz des notwendigen Hinsetzens, Vergleich zum konventionellen WC und Wahl der Spültaste (groß/klein). (Siehe Fragebogen Belegschaft Gmunden im Anhang, Kap. 9.2.1).

Bögen und Schreibgeräte lagen direkt am Testort auf und wurden per Briefkasten gesammelt. Die zwei SAVE!-Test-WCs wurden als neue Option, nicht als Muss präsentiert – parallel waren noch die Urinale zugänglich. Wegen des geringen Frauenanteils in der Belegschaft wurde der Test nur im Männer-WC

durchgeführt. Parallel wurden Monitoringdaten (elektronischer Summenzähler für Kabinen- und Spülungsbenutzung, tägliche Auslesung) gesammelt.



Abbildung 16: Die Belegschaft der Fa. Laufen am Produktionsstandort Gmunden während der Kick-Off Veranstaltung der Nutzerbefragung am 5.7.2022 (Bildnachweis: Alexander Keul)

Die Anonymität und die Erklärungssession während der Kick-Off Veranstaltung führten zu einem befriedigenden Rücklauf: Im Juli 2022 langten 41 Fragebögen ein (37 Mitarbeiter aus der Produktion, 2 aus der Verwaltung, 2 aus der Entwicklungsabteilung).

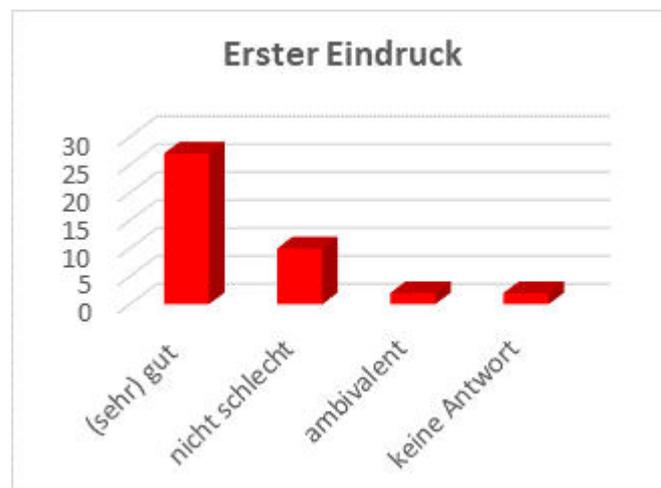


Abbildung 17: Ausschnitt aus den Befragungsergebnissen. (eigene Darstellung, Alexander Keul)

Der erste Eindruck der SAVE! Trenntoilette war bei 27 (65,9 %) (sehr) gut, bei 10 (24,4 %) nicht schlecht, bei 2 ambivalent. 39 (95 %) sahen kein Problem mit dem neuen WC. Nur 2 Teilnehmer sahen Probleme mit dem SAVE!-WC - einmal, dass die Betätigung der Spülung für Kinder zu streng sein könnte; einmal, das WC würde beim Spülen riechen. Bezüglich der Frage, ob das (für die Funktionalität der Trennung von Gelb- und Braunwasser notwendige) Hinsetzen auf dem WC störend sei, gaben 32 (78,0%) an,

diesbezüglich kein Problem zu sehen, 7 gaben keine Antwort, 2 sahen Probleme - einer fühlte sich gestört, für einen anderen war das notwendige Hinsetzen ungewohnt. Im Vergleich von SAVE! mit einem konventionellem WC fanden es 35 (85,3%) gleich gut, 4 sogar besser, 2 gaben keine Antwort.

Zu möglichen Verbesserungen: 36 (87,8%) hatten keine Verbesserungsvorschläge, 5 schon - dreimal wurden Aschenbecher angeregt (jedoch besteht Rauchverbot auf dem Firmen-WC), einmal eine "Duftlösung" gegen WC-Geruch, einmal (wohl scherzhaft) Musik, einmal wurde vermutet, die WC-Höhe wäre für Ältere zu niedrig.

Insgesamt wurde das getestete SAVE!-Trenn-WC also von der Laufen-Belegschaft durchaus positiv aufgenommen. Allerdings könnte die Tatsache, dass am Standort Gmunden die Muschel für das SAVE!-WC erzeugt und gebrannt wird, zu eher milden Urteilen bei der (die WC-Schale produzierenden) Belegschaft geführt haben.

5.6.2. Online-Befragung (Kammerhof-Museum Gmunden)

Ergänzend zur Befragung der Belegschaft in Gmunden wurde eine Online-Befragung mit dem Ziel durchgeführt, eine erweiterte Population zur Akzeptanz der SAVE!-Trenntoilettentechnologie und möglicher Endprodukte der Abwasserverwertung (Dünger, Pellets, Biokohle) zu befragen.

Um Teilnehmer:innen für diese Online-Befragung zu gewinnen, wurde die Vorgangsweise gewählt, Besucher:innen des Kammerhof-Museums in Gmunden Museums, in dem die Sonderausstellung „Klo & so“ stattfand, zu motivieren, während eines Museumsbesuchs an der Befragung teilzunehmen.

Die Befragung im Kammerhof-Museum in Gmunden wurde vom 19.11.2023 - 26.5.2024 durchgeführt. Dazu wurde ein SAVE!-WC als Exponat in der Ausstellung aufgestellt. Die Besucher:innen konnten über QR-Code mit einem Smartphone an der Online-Umfrage teilnehmen. Es ergab sich ein Endstand von 56 vollständigen Antworten, die mit SPSS ausgewertet wurden. (Siehe Fragebogen Museum Gmunden im Anhang, Kap. 9.2.2).

Teilgenommen haben 40 Einheimische (71,4 %) und 16 touristische Besucher:innen (28,6 %), 33 der Antwortenden waren weiblich (58,9%), 23 männlich (41,1%). Altersmaxima mit je 12 Personen (21,4%) waren 20-29 Jahre sowie 60-69 Jahre. 47 (84 %) der Teilnehmenden hatten höhere Bildung (10 Matura, 37 (Fach-)Hochschule).

Im Folgenden die Verteilung der Antworten auf einige wesentliche Fragen aus der Erhebung:

1. Diese Form eines Trenn-WCs

- habe ich hier im Museum zum ersten Mal gesehen – 42 (75,0%)
- kenne ich aus den Medien – 8 (14,3%)
- kenne ich von einer Ausstellung – 3 (5,4%)
- habe ich schon selbst ausprobiert – 3 (5,4%)

Von 11 ergänzenden spontanen Bemerkungen zum SAVE! Trenn-WC war eine ambivalent, alle anderen klar positiv.

2. Erscheint Ihnen eine Trennung von Urin und Feststoffen aus Umweltgründen schon im WC als

- sehr sinnvoll – 15 (26,8%)
- schon sinnvoll – 27 (48,2%)
- möglicherweise sinnvoll – 13 (23,2%)

- eher unsinnig, übertrieben – 1 (1,8%)

Die Gesamttendenz ist klar positiv. Alle 56 antworteten.

3. Würden Sie zeitweise (Urlaub/Hotel, Studentenheim, Büro/Arbeitsort) ein Trenn-WC benützen?

- ja, kann ich mir vorstellen – 44 (81,5 %)
- kann ich mir vielleicht vorstellen – 9 (16,7 %)
- nein, sicher nicht – 1 (1,8 %)

Also mehrheitlich positiv, 2 gaben keine Antwort.

4. Würden Sie beim Einzug in eine neue Wohnung, wenn Sie zwischen konventionell und Trenn-WC wählen könnten, ein Trenn-WC wählen?

- ja, kann ich mir vorstellen – 30 (55,6 %),
- kann ich mir vielleicht vorstellen 20 (37,0%)
- nein, sicher nicht – 4 (7,4%).

Mehrheitlich positiv, 4 gaben keine Antwort.

5. Halten Sie ein Trenn-WC im Vergleich zu einem konventionellen WC für

- viel praktischer – 7 (13,0%)
- möglicherweise praktischer – 39 (72,2%)
- eher unpraktischer – 8 (14,8%)

Tendenziell positiv, aber vorsichtiger, weil keine konkrete eigene Erfahrung vorliegt, 2 gaben keine Antwort.

6. Wären Sie bereit, bei einem Wohnungsneubau für ein Trenn-WC-System mit Nährstoffrückgewinnung etwas mehr Investitionskosten zu tragen und danach langfristig weniger Betriebskosten zu haben?

- ja, wenn die Investitionskosten überschaubar bleiben – 34 (61,8%),
- vielleicht schon – 17 (30,9%),
- eher nicht – 3 (5,5%),
- auf keinen Fall – 1 (1,8%).

Eine eher hypothetische, weil nicht aktuelle Frage. Unter dem Vorbehalt „Kosten überschaubar“ stimmt hier die Mehrheit prospektiv zu, eine Person gab keine Antwort.

7. Bei der biologischen Aufbereitung von getrenntem Urin und Feststoffen aus dem Trenn-WC werden voraussichtlich als Endprodukte Dünger-Pellets, Flüssigdünger (z.B. Aurin) und Biokohle für die Pflanzendüngung entstehen. Können Sie sich vorstellen, solche Produkte für Ihren Garten/Ihre Landwirtschaft zu verwenden?

- Ja – 33 (63,5 %)
- vielleicht – 17 (32,7 %)
- eher nicht – 2 (3,8 %)

Eine noch hypothetischere Frage, weil Prozess und Produkte erst projektiert sind und noch nicht vermarktet werden. Trotzdem stimmt eine Mehrheit auch hier zu. Wie bei den anderen Pro futuro-Fragen sind dies reine Absichtserklärungen ohne Realisierungs-/Entscheidungsdruck, also insofern eher mit Vorsicht zu betrachten.

Insgesamt äußerte sich von den 56 Umfrageteilnehmer:innen die Mehrzahl freundlich zum SAVE!-Trenn-WC und ebenso zu Umweltschutz und Ressourcensparen, auch zum eventuellen praktischen Einsatz einer SAVE! Trenntoilette. Bei 84 % der Teilnehmenden mit höherer Bildung (Bildungs-Bias) und einer (gegenüber dem konkreten WC-Test bei Laufen in Gmunden) abstrakten Testsituation sollte die erfreuliche Zustimmung nicht überbewertet werden.

5.6.3. Online-Befragung (Kreativ-Campus Atelier Gardens, Berlin Tempelhof)

Abschließend wurde gegen Projektende ein Fragebogen für SAVE!-Publikumstests erstellt und am Standort Berlin-Tempelhof im Kreativ-Campus Atelier Gardens als Pilotstudie getestet. An diesem Standort sind SAVE! Trenntoiletten installiert. Aus den beiden bereits besprochenen Umfragen (siehe oben) wurden 17 Fragen entnommen und damit eine deutsche und englische Version eines Fragebogens erstellt. (Siehe Fragebogen Berlin im Anhang, Kap. 9.2.3).

Im Inneren des SAVE!-WC am Standort machte ein deutsch-englischsprachiges Plakat auf die Umfrage aufmerksam, welche mittels QR-Code online am Handy gestartet werden konnte. Von 25. Oktober bis 27. November 2024 kam es vor Ort zu 68 online registrierten Kontakten, davon 45 deutschsprachig und 23 englischsprachig. Leider stiegen trotz guter Kontaktzahl insgesamt nur vier Personen (und zwei auch nur teilweise) in den Fragebogen ein, was keine relevante Statistik ermöglichte.

Wie schon am Beispiel der Museumsbefragung in Gmunden mit Einstieg über QR-Code tendenziell wahrgenommen, überwiegt bei anfänglich hoher Kontaktfrequenz doch eine gehörige Skepsis gegenüber QR-initiierten Umfragen (aus welchen Gründen auch immer), sodass die Endstichprobe hoch selektiv (Bildungs-Bias etc.) oder gar unbrauchbar sein kann. Abbruchgründe sind bei dieser Umfrageform nicht zu ermitteln.

Aus Sicht des Umfrage-Urhebers und -Auswerters ergeben die im Projekt durchgeführten Pilotstudien als Konsequenz, dass weitere mögliche Online-Nutzertestungen des innovativen SAVE!-WC-Konzeptes (durch die Laufen AG) nicht selbsterklärend, also als Selbstläufer via QR, zu erreichen sind, sondern doch „altmodisch“ als personbegleitete Nachbesuchs-Erhebung im WC-Bereich auf einem Laptop mit Online-URL zum Fragebogen organisiert werden müssen, um eine genügend große und repräsentative Nutzer:innenanzahl direkt zu motivieren und auch zu einem vollständig ausgefüllten Fragebogen bewegen zu können. Ohne eine solche soziale Kontrolle wird ein qualifizierter Produkttest mit „Laufkundschaft“ nicht erfolgreich und repräsentativ sein. Anders würde sich vermutlich ein Produkttest in einem neuen, mit SAVE!-WCs ausgestatteten Gebäude gestalten, wo deren Nutzer(innen) wohl ein höheres Grundinteresse an einer Produktevaluation und -verbesserung hätten.

In Summe lässt sich als Fazit festhalten, dass sich trotz methodischer Beschränkungen und gewisser Akzeptanzprobleme der Umfragemethodik in der ersten sozialwissenschaftlichen Evaluation des innovativen SAVE!-Trenn-WCs eine freundliche, interessierte Nutzer:innen- und Publikumsbeurteilung des Produkts zeigte, sodass dessen weiterer Einsatz in der Öffentlichkeit (samt weiterer Evaluation mit Umfrage-Instrumenten wie im Anhang) erfolgreich sein dürfte.

5.7. Anwendungsszenarien und Umsetzungsempfehlungen

In diesem Kapitel wird anhand einiger Fallstudien von exemplarischen bestehenden Gebäuden diskutiert, ob bzw. wie das in diesem Projekt untersuchte System zur gebäudeintegrierten Abwasserbehandlung in das jeweilige Gebäude integriert werden könnte. Nach einem Exkurs zur stofflich-energetischen Nutzung von Speiseabfällen werden schließlich Empfehlungen zur Umsetzung in Neu- und Bestandsbauten formuliert.

5.7.1. Fallstudien zur Systemintegration

Die Fallstudien zu den ausgewählten Gebäuden sind in der Reihenfolge der Bewohner:innenanzahl angeführt.

Am Krautgarten 21, 1220 Wien

Baujahr: 1902; Jahr der Sanierung: 1991; Anzahl der Wohneinheiten: 11; BGF: 685 m²

Bei diesem Gebäude (BJ 1902), mit einem Standard-Grundriss der Wiener Gründerzeit, gab es 1991 eine Sanierung mit Wohnungszusammenlegungen, Standardanhebung, Zentralheizungseinbau und Dachausbau zu nun 11 Wohnungen. Derzeit wird ein Umbau der Gas-Zentralheizung auf eine Grundwasser-Wärmepumpe sowie weitere Verbesserungen der thermischen Gebäudehülle geplant. Der derzeitige gemessene Warmwasser-Heizenergiebedarf sind ca. 26.000 kWh/a.



Abbildung 18: Straßenansicht des Gebäudes mit der Adresse Am Krautgarten 21, 1220 Wien. (Bildnachweis: Ernst Heiduk)

Für das Abwasser gibt es 2 Fäkalabfallstränge (DN 125) und 4 Grauwasserfallstränge (DN70). Die zusammenfassenden Leitungen im Kellerschoß (KG) sind unter dem Kellerboden verlegt. Wie im Plan

ersichtlich, liegt der Straßenkanal relativ tief und zwischen Haus und Straße gibt es einen 5 m tiefen gebäudeeigenen Vorgarten, in dem es einen Putzschacht mit Putzöffnung und Rückstauklappe gibt.

Der Umbau der Wohnungs-WCs mit Trenntoiletten und Trennabwasserleitungen wäre bei

- 6 Wohnungen mit geringem Umbau-Aufwand möglich und bei
- 2 Geschößwohnungen (Mittelwohnungen) und 3 Dachgeschoß-Wohnungen aber nicht möglich und
- der Einbau von küchenintegrierten Einwurfmöglichkeiten für biogene Küchenabfälle ist nur bei einer Küche mit geringem Umbau-Aufwand möglich.

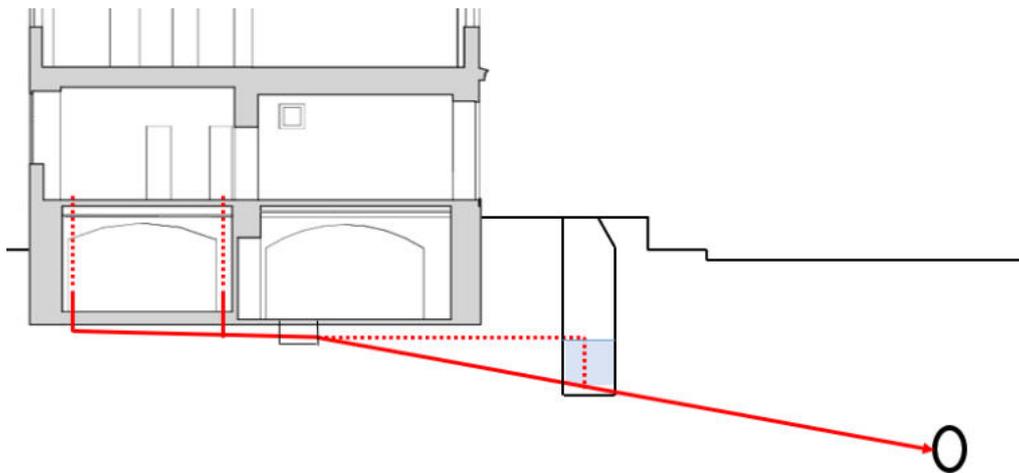


Abbildung 19: Schnitt KG, Höhenlagen der Abwasserleitung bis Straßenkanal (eigene Darstellung, Ernst Heiduk)

Daraus ergibt sich:

- Der Umbau auf ein Trenn-Abwasserrohrsystem wäre nur teilweise möglich und die dabei anfallenden Mengen an Braunwasser und die so erzielbaren Energiegewinne sind zu gering, um die Investition zu rechtfertigen. Die biogenen Küchenabfälle aller Hausbewohner:innen verbessern das Ergebnis, erfordern aber „disziplinierte“ Bewohner:innen, die die biogenen Küchenabfälle händisch einbringen.
- Die Wärmenutzung des gesamten Abwassers wäre nur durch einen neuen, in den Vorgarten einzugrabenden, Wärmetauscher-Behälter möglich oder
- wenn der bestehende Putzschacht kostengünstig zu einem Behälter für die Abwärmehückgewinnung umgebaut werden könnte. Der bestehend Putzschacht mit DN 1000 ist 4 m tief. Dazu müsste die Zuleitung ab Fundamentaußenkante bis zum Schacht verändert und angehoben werden. Dann wäre ca. 1,40 m Höhe als Wärmetauscher-Behälter nutzbar. Als Wärmetauscher-Platten könnten ringförmige Thermoplatten, wie sie teilweise in der Papierindustrie Verwendung finden, verwendet werden. <https://www.das-ee.com/de/fallstudie-waermeuebertrager-papierindustrie/>

Da alle Änderungen und Komponenten handwerklich eingebaut werden müssten, ist derzeit noch keine Kostenschätzung und Wirtschaftlichkeitsberechnung möglich.

Unterstein 206, 6941 Langenegg, Vorarlberg

Baujahr: 2015; Anzahl der Wohneinheiten: 12; BGF: 1.152 m²

Diese kleine Wohnhausanlage mit zwei Häusern und je 6 Wohnungen (BJ 2014) erreicht nach mehrjährigen Monitoring-Ergebnissen eine sehr hohe Energieeffizienz. Hier zeigt die Analyse der Gebäudekenndaten, der Abwassergebäudetechnik und des Warmwasser-Heizenergiebedarfs, dass in dieser Größenordnung weder eine Abwasser-Wärmerückgewinnungsanlage noch eine stofflich-energetische Nutzung von Braunwasser wirtschaftlich sinnvoll darstellbar ist. Obwohl alle Installationsschächte am Stiegenhaus liegen, sind sie nicht von außen zugänglich. Es wäre zwar auch mit relativ kleinen wohnungsseitigen Eingriffen und Mehraufwand machbar, Trenntoiletten und getrennte Abwasserleitungen einzubauen, die geringe Nutzer:innenzahl verursacht aber auf jeden Fall sehr hohe Anlagenkosten pro Nutzer/-in.



Abbildung 20: Wohnhausanlage Unterstein 205, Langenegg (Bildnachweis: Morscher Bauprojekte GmbH)

Für ähnlich offene Siedlungsstrukturen mit geringer Dichte ist es denkbar, gemeinschaftliche semi-dezentrale Anlagen und unter Niveau geführte Abwasserleitungen zu entwickeln, die die drei Rohrleitungen und die Wärmeleitungen zur Wärmepumpe zusammenfassen und wärmegeklärt im Boden verlegt werden können. So könnten dann mehrere Gebäude eine gemeinsame Aufbereitungsanlage nutzen und eine bessere Kostenstruktur erreichen.

Für Fälle wie diese wäre es wünschenswert, wenn Anbieter fertige Anlagen, die unter Niveau versetzt werden können, entwickeln würden.

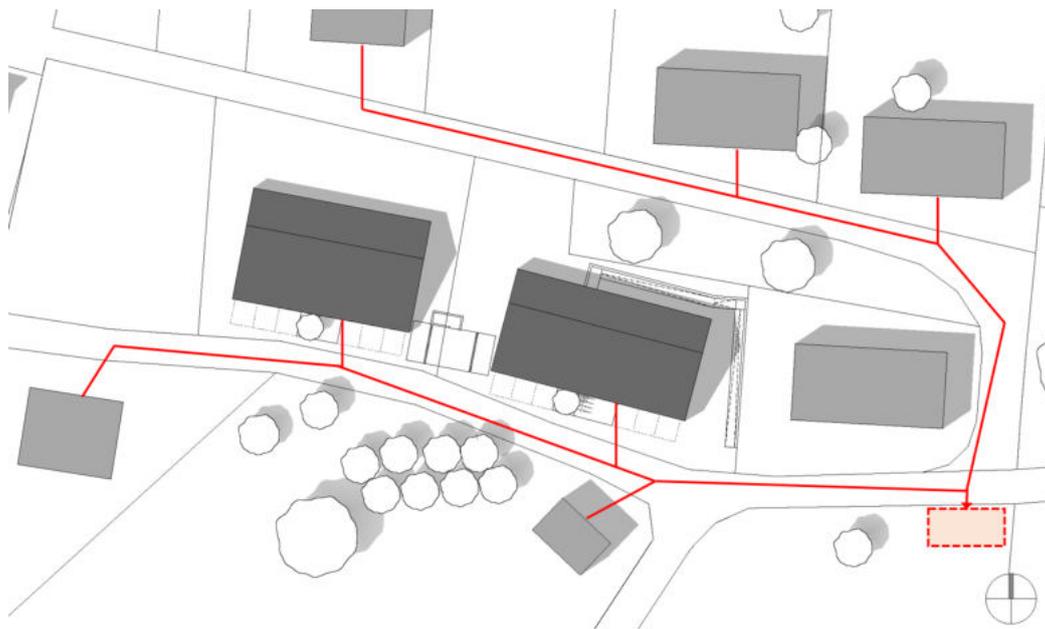


Abbildung 21: Schematische Darstellung einer semi-dezentralen Abwasseranlage (eigene Darstellung, Ernst Heiduk, basierend auf Plangrundlage von Herrmann Kaufmann Architekten)

Thaliastraße 37, 1160 Wien

Baujahr: 1895; Jahr der Sanierung: 2025; Anzahl der Wohneinheiten: 16; BGF: 1.350 m²

Dieses Gründerzeit-Eckhaus (BJ ca. 1895) mit derzeit 25 Wohnungen hatte bislang noch keine grundlegende Sanierung. Die Wohnungen wurden, teilweise in Eigenregie der Bewohner:innen, schrittweise zusammengelegt und Gasthermenheizungen eingebaut. Derzeit sind nur 2 Wohnungen bewohnt, ein Geschäftslokal und ein Gastronomiebetrieb nutzen das Erdgeschoß.

Demnächst ist eine umfassende Sanierung geplant. Dabei sollen Standardanhebungen der Wohnungen und ein Dachausbau, thermische Sanierungen der Außenhülle (Hoffassade, Fenster, Dach) sowie der Einbau einer Wärmepumpen-Zentralheizung vorgenommen werden. Als Wärmequelle der Wärmepumpe sollen im Hof und auf öffentlichem Grund (Parkstreifen Nebengasse) Erdsonden gebohrt werden. Die Abwasserrohre werden im Keller an der Kellerdecke abgehängt geführt. Da hier auch die gesamten Abwasserleitungen erneuert werden, gibt es hier die Möglichkeit, überall Trenntoiletten und getrennte Abwasserleitungen einzubauen. Die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser kann dadurch die Wärme für die Warmwasserbereitung bereitstellen. Das ist in diesem Fall besonders wertvoll, weil bei einem Eckhaus die Hoffläche sehr klein ist und dadurch die verfügbare Fläche für Erdsonden-Bohrungen sehr beschränkt ist.



Abbildung 22: Straßenansicht Thaliastraße 37, 1160 Wien (Bildnachweis: Ernst Heiduk)

Auch die energetische Nutzung des Braunwassers ist dadurch sehr gut möglich. Bei künftig 50 bis 70 Bewohner:innen und der Einbeziehung der biogenen Abfälle aus den Wohnungen und dem Gastronomiebetrieb ist hier ein wirtschaftlich und energetisch sinnvoller Betrieb der Anlage zu erwarten. Die Behälter und die Anlage können in Kellerräumen unter dem Hauseingang eingebaut werden. Ein alter Kaminzug in der Mittelwand kann für die Notfallentlüftung bei der Biogasanlage genutzt werden.

Allerdings könnte sich dieser relativ gute Energieertrag bei einem Wegfall des Gastronomiebetriebs (und seiner Speiseabfälle) deutlich ändern. Daher muss das Gesamtenergiekonzept des Gebäudes auch ohne diesen erhöhten rechnerischen Energiegewinn durch Gastronomiespeiseabfälle funktionieren.

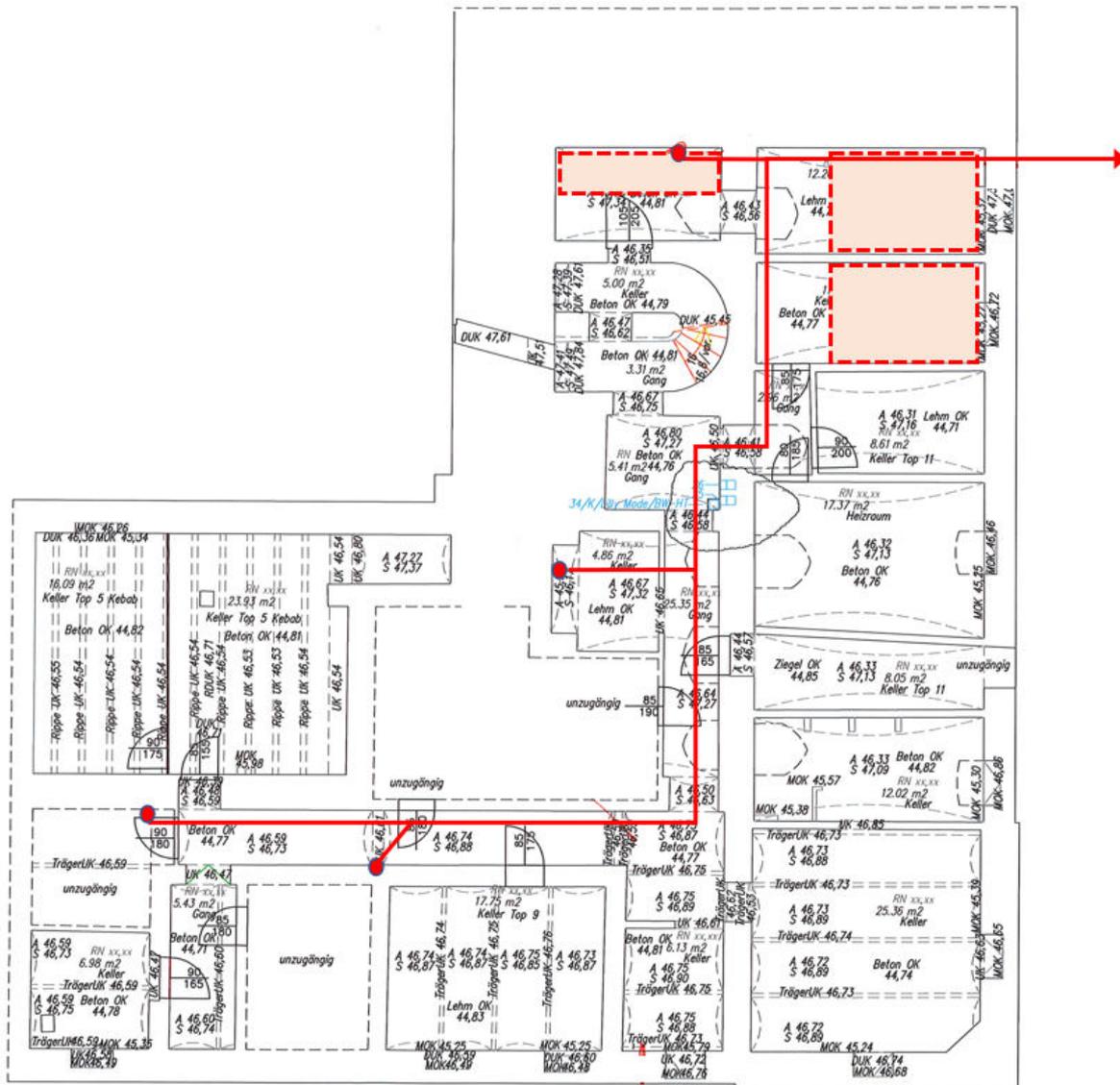


Abbildung 23: Grundriss KG mit möglichen Abwasserleitungen (Trennsystem) und Technikraumflächen (eigene Darstellung, Ernst Heiduk)

Zwieselweg 3, Haiming, 6425 Tirol

Baujahr: 2020; Anzahl der Wohneinheiten: 23; BGF: 1.849 m²

Bei dieser sehr kostengünstigen neuen Wohnhausanlage (BJ 2017) mit 23 Wohnungen ist der Energieverbrauch sehr gering (Passivhaus-Standard), weshalb die Mieter:innen auch sehr geringe Betriebskosten haben. Eine ergänzende PV-Anlage am Flachdach zur Eigenstromversorgung ist geplant. Da der gemeinnützige Wohnbauträger Installationsschächte so baut, dass diese vom Stiegenhaus aus zugänglich sind, ist es relativ leicht und kostengünstig möglich, eine Trennung der Abwasserrohre vorzunehmen und die bestehenden WC-Schalen gegen Trenn-Toiletten zu tauschen. Der nachträgliche Einbau von Urinalen und Einwurfmöglichkeiten für biogene Küchenabfälle ist aber auch hier nachträglich eher schwierig herzustellen. Der Einbau einer Abwasser-Wärmerückgewinnung und einer Kleinbiogasanlage zur Energiegewinnung ist somit möglich, allerdings ist dazu im

vorhandenen Haustechnikraum im Sockelgeschoss wahrscheinlich nicht genügend Platz. Dann gäbe es noch die Option, einen Stellplatz im Carport zu verbauen.

Tabelle 18: Übersicht Fallstudien: Eckdaten und Nettostromerträge (Eigene Darstellung, Schöberl & Pöll GmbH)

<i>Gebäudeadresse</i>	<i>Baujahr</i>	<i>Jahr der Sanierung</i>	<i>Wohn-einheiten</i>	<i>Bewohner: innenzahl (geschätzt)</i>	<i>BGF</i> <i>m²</i>	<i>Netto-strom-ertrag (pro Jahr)</i> <i>kWh/a</i>	<i>Netto-strom-ertrag (pro Bew. und Tag)</i> <i>kWh/P.d</i>	<i>Netto-strom-ertrag (pro BGF)</i> <i>kWh/m².a</i>
Am Krautgarten 21, 1220 Wien	1902	1991	11	23	685	484	0,057	0,71
Unterstein 206, 6941 Langenegg	2015	Neubau	12	30	1152	708	0,065	0,61
Thaliastraße 37, 1160 Wien	1895	2025 (geplant)	16	40	1350	1038	0,071	0,77
Zwieselweg 3, 6425 Haiming	2020	Neubau	23	58	1849	1653	0,079	0,89

Die obige Tabelle bietet eine Übersicht zu einigen Eckdaten der besprochenen Fallstudien und zeigt den potentiellen Nettostromertrag, der sich ergibt, falls eine gebäudeintegrierte Biogasanlage (mit den Inputsubstraten Braunwasser und Speiseabfälle) mit nachgeschalteter Brennstoffzelle, die den Biomethanoutput verwertet, installiert würde. Der Nettostromertrag ergibt sich unter der Annahme, dass die nachgeschaltete Brennstoffzelle mit einem Wirkungsgrad von 60 % betrieben wird, wobei der Strombedarf für den Betrieb der Biogasanlage vom Stromertrag der Brennstoffzelle abgezogen ist (Details zur Methodik der Energiebilanzierung siehe Kapitel 5.5).

Der Nettostromertrag pro Person und Tag bewegt sich zwischen 0,057 und 0,079 kWh/P.d, auf die Bruttogrundfläche (BGF) und ein Jahr bezogen zwischen 0,61 und 0,89 kWh/m²a. Hier ist zu berücksichtigen, dass größere Gebäude mit einer höheren Bewohner:innenanzahl besser hinsichtlich des Nettostromertrags abschneiden, wie das auch im Kapitel 5.5 gezeigt wurde (der Nettostromertrag pro Person und Tag kann bei größeren Gebäuden bis zu 0,1 kWh/P.d betragen). Die Abwärme der Brennstoffzelle (ca. 40%, Temperaturniveau ca. 80°C) könnte direkt im Gebäude genutzt werden.

Fallen in einem Gebäude mehr biogene Küchenabfälle an, wenn es z.B. einen Gastronomiebetrieb im Gebäude gibt, kann der Energieertrag noch deutlich steigen. Beim Objekt Thaliastraße 37 gibt es einen kleinen Gastronomiebetrieb, der in obiger Berechnung allerdings nicht berücksichtigt ist.

Schlussfolgerungen aus den Fallstudien

Aus der Analyse der Fallstudien zur Systemintegration in Bestandsobjekten lassen sich folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen ableiten:

Die **Nutzung der Abwärme des Abwassers** ist bzw. wäre bei fast allen größeren Bestandsgebäuden ein wichtiger Schritt, um die Energieeffizienz zu steigern und die laufenden Betriebskosten für die Bewohner:innen zu reduzieren. Ob es in einzelnen Bestandsgebäuden auch wirtschaftlich machbar ist,

hängt jeweils von der bautechnischen Situation ab. Generell kann man sagen: Je größer bzw. je mehr Bewohner:innen ein Gebäude hat, umso eher ist es wirtschaftlich interessant.

Die **stofflich-energetische Nutzung von Braunwasser mittels Kleinbiogasanlage**, wie in diesem Projekt untersucht, ist bei Bestandsgebäuden leider nur in Ausnahmefällen realisierbar. Das ist dann der Fall, wenn

- es größere Gebäude mit vielen Bewohner:innen sind
- oder kontinuierlich viele biogene Lebensmittelabfälle verfügbar sind,
- Generalsanierungen durchgeführt werden bei denen auch die Abwasserinstallationen erneuert werden.
- Weiters muss neben dem Gebäude oder im Untergeschoss des Gebäudes ausreichend Raum für die Anlage verfügbar sein und die Sicherheitsauflagen müssen erfüllbar sein.

Zusätzlich ist bei einer (General-)sanierung mitzubedenken, als Teil eines ganzheitlichen Kreislaufsystems auch eine Grauwasseraufbereitungsanlage und eine Anlage zur stofflichen Verwertung von Gelbwasser/Urin mit Pflanzennährstoff-Rückgewinnung zu implementieren.

5.7.2. Stofflich-energetische Nutzung von Speiseabfällen

Eine gut funktionierende Verdauung entnimmt aus der Nahrung den größten Teil des Nährstoff- und Energieanteils. Daher enthalten verdaute Nahrungsmittelreste wenig weiter nutzbare Energie. Allerdings besteht etwa die Hälfte der Fäkalausscheidungen (bei Menschen und Tieren) aus Darmbakterien, die wieder aus energiereicheren Stoffen bestehen.

Der Energieertrag einer gebäudeintegrierten Biogasanlage, welche den Braunwasserstrom verwertet, kann durch die zusätzliche Nutzung von Speiseresten, also Lebensmittelabfällen die im Gebäude anfallen, deutlich gesteigert werden. Es ist also sinnvoll, sich auch mit der Einbringung dieser in das Biogassystem zu beschäftigen.

Die derzeitige gesetzliche Regelung besagt, dass biogene Abfälle, die nicht im unmittelbaren Bereich des Haushaltes verwertet werden, für eine getrennte Sammlung bereitgestellt werden müssen. (Verordnung über die getrennte Sammlung biogener Abfälle (BGBl. Nr. 68/1992) - §2). Welche organischen Abfälle aus Küche und Haus für die Sammlung von biogenen Abfällen (Biotonne) geeignet sind, definiert beispielsweise die Stadt Wien (<https://www.wien.gv.at/umwelt/ma48/beratung/muelltrennung/biogener-abfall/sammlung.html>) mit:

- Ungewürzte und ungekochte Obst- und Gemüseabfälle,
- Pflanzen mit geringen Mengen anhaftender Blumenerde im Wurzelbereich sowie
- Tee- und Kaffeesud.

Aus dem würde sich ableiten, dass der Großteil der organischen Küchen- und Speiseabfälle wie

- Reststoffe der Speisenzubereitung,
- Speisereste aller Art und
- verdorbene Lebensmittel

nicht für die Entsorgung über die Sammlung von biogenen Abfällen geeignet wären. Stattdessen sind diese Küchen- und Speiseabfälle im Restmüll zu entsorgen, der in der Regel in die Müllverbrennung geht. Wenn diese „nassen“ Speiseabfälle so in der Müllverbrennung verbrannt werden, erfordert der hohe Wasseranteil zusätzliche Verbrennungsenergie und macht so die Müllverbrennung weniger

energieeffizient. Außerdem werden die enthaltenen (Pflanzen)-Nährstoffe dem Kreislauf entzogen und selbst Phosphor kann aus der Asche von Müllverbrennungsanlagen nicht rückgewonnen werden, weil die Asche zu viele andere schädliche Substanzen enthält (siehe auch https://www.parlament.gv.at/dokument/fachinfos/zukunftsthemen/118_phosphorre recycling.pdf).

Eine Alternative wäre die Entsorgung von biogenen Abfällen über das Abwassersystem. In vielen Ländern (z.B. USA, Japan, Dänemark, Großbritannien, Irland, Italien, Norwegen, Spanien) dürfen biogene Küchenabfälle über die Kanalisation entsorgt werden, wenn dafür in den Küchen Küchenabfallzerkleinerer (KAZ) verwendet werden, die die Küchenabfälle fein zerkleinern. In anderen europäischen Ländern wie Schweiz, Österreich und teilweise Deutschland (durch Kommunen und Abwasserverbände) ist das Entsorgen generell, also auch mit Küchenabfallzerkleinerern, verboten. Diese unterschiedlichen Regelungen beruhen auf der unterschiedlichen Einschätzung möglicher Einflüsse auf die Rattenpopulation und die Kanalverfettung. Während die eine Seite Lebensmittelabfälle im Abwasser als Rattenfutter sieht, argumentiert die Gegenseite, dass das fein zerkleinerte Material von den Ratten nicht ausgefiltert und gefressen werden kann (Kegebein 2006).

In Österreich ist nach dem Wasserrechtsgesetz (WRG) die Einleitung von Abfällen in die Kanalisation grundsätzlich verboten. Die Zerkleinerung von Küchenabfällen und die anschließende Entsorgung über das Abwasser stellt eine unzulässige Abfallentsorgung dar. Gemäß Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) sind KAZ als Abfallbehandlungsanlage zu sehen und somit bewilligungspflichtig. Der unbewilligte Einsatz ist demnach unzulässig und kann mit Verwaltungsstrafen geahndet werden. Auch Landesgesetze wie das Wiener Kanalanlagen- und Einmündungsgebührengesetz (§3) verbieten das Einleiten von Küchenabfällen in die Kanalisation. (<https://www.wenigermist.at/kuechenabfallzerkleinerer-in-oesterreich-verboten>)



Abbildung 24: Spüle mit Küchenabfallzerkleinerer (KAZ), schematische Darstellung (Bildnachweis: FreePik, License Free https://www.freepik.com/free-vector/kitchen-sink-with-slices-vegetables-falling-with-water-into-food-waste-disposer-realistic_6804341.htm)

Wenn aber das Abwasser nicht direkt ins Abwassersystem eingeleitet wird, würde aus unserer Sicht keines dieser Verbote greifen. Eine biologische Aufbereitung von Braunwasser und biogenen Küchenabfällen in den Gebäuden wäre also möglich. Natürlich sind aber bei der Biogas-/Methan-Produktion die entsprechenden Sicherheitsvorschriften (hinsichtlich Explosionsschutz u.a.) einzuhalten.

Ein Spezialfall der biogenen Küchenabfälle ist Altspeiseöl. Dieses ist ähnlich energiereich wie Dieselkraftstoff. Das würde einerseits den Energieertrag der Biogasanlage sehr deutlich steigern. Wenn es aber nicht gleichmäßig, sondern intervallweise eingespeist wird, können sich die Mikroorganismen nicht schnell genug an den stark unterschiedlichen Energieinhalt anpassen und es kann auch zu Minderertrag an Methan führen. Für größere Mengen an Altspeiseöl sollte daher auch weiterhin ein eigenes Sammelsystem genutzt werden, wodurch sie zu biogenem Treibstoff weiterverarbeitet werden können.

Auch für die Gastronomie und Großküchen, in der ca. 40 % der Lebensmittel-Abfälle anfallen, gibt es bewährte Sammelsysteme, die weiter genutzt werden sollten (siehe z.B. <https://www.meiko.com/de-de/produkte/speisereste-anlagen#>). Hier gibt es für größere Betriebe mit größeren Abfallmengen auch eigene Klein-Biogasanlagen am Markt (<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/edz/projekte/bio4gas-4-kammer-kleinbiogasanlage-fuer-die-effiziente-biogasproduktion-aus-landwirtschaftlichen-nebenprodukten.php>). Eine Ausnahme ist dann gegeben, wenn der Gastronomiebetrieb in einem Wohnhaus untergebracht ist. Dann wäre es sinnvoll, dessen biogene Abfälle in die gebäudeeigene Biogasanlage einzuleiten.

5.7.3. Empfehlungen zur Umsetzung in Neu- und Bestandsbauten

Im Sinne einer ganzheitlichen Verwertung der verschiedenen Abwasserströme in Gebäuden ergeben sich folgende Empfehlungen für die praktische Umsetzung bei umfassenden Gebäudesanierungen und Neubauten:

- *Nutzung der thermischen Energie des Abwassers* zur Warmwasserbereitung. Mittels Wärmetauschern und einer Wärmepumpe kann damit sehr effizient der gesamte Wärmebedarf zur Warmwasser-bereitung bereitgestellt werden. Falls die Abwasserrohre am Weg zum Wärmerückgewinnungsbehälter die thermische Gebäudehülle verlassen, sollten sie (nach derzeitigem Wissensstand) sowie der Behälter selbst wärmedämmend werden (um unnötige Wärmeverluste zu vermeiden).
- *Der Einbau getrennter Abwasserleitungen zur Trennung von Grauwasser und Fäkalwasser.* Wenn die Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser stattfindet, ist weniger Reinigungsaufwand für die Wärmetauscher notwendig und das Grauwasser kann zu Nutzwasser aufbereitet werden.
- Ein darüber hinausgehender *Einbau von Trenntoiletten* zur zusätzlichen Trennung von Schwarzwasser in Gelbwasser (Urin mit Spülwasseranteil) und Braunwasser (Fäkalien mit Spülwasseranteil). Das macht zusätzlich eine stofflich-energetische Nutzung der Abwasserfraktionen möglich.
- Eine *Einbeziehung der Speiserestentsorgung* in das Abwasserkonzept und Verwertung der Speisereste in der gebäudeintegrierten Klein-Biogasanlage würde den Ertrag erhöhen.

- Hinkünftig könnte ein weiterer Baustein die Eliminierung von Schadstoffen (Medikamentenrückstände u.a.) sein. In dieser Hinsicht gibt es zurzeit interessante Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (z.B. das im Rahmen der „Expedition Zukunft - Challenge Wasser & Boden“ geförderte Projekt DIAMONDcleanWATER).

5.8. Beitrag des Projekts zu den Gesamtzielen der FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft

Die FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft verfolgt strategische und operative Ziele.

Unter den *vier strategischen Zielen* (Positive Klima- und Umweltwirkung, Versorgungssicherheit und soziale Verantwortung, Technologieführerschaft, Wissensaufbau und Kooperation) trägt das Projekt am stärksten zu den Zielen

- Positive Klima- und Umweltwirkung; und
- Technologieführerschaft

bei.

Positive Klima- und Umweltwirkung: Perspektivisch durch eine Entlastung von Kläranlagen bzw. des Abwasserbehandlungssystems (der in den Kanalrohren stattfindende Abbau organischer Substanzen emittiert Methan), durch eine perspektivische Reduktion der Düngerproduktion durch Nährstoffrückgewinnung, durch einen Beitrag zur Grundlastdeckung des Gebäudeenergiebedarfs aus nicht-fossiler Energie.

Technologieführerschaft: Die im Projekt entwickelten und erprobten Technologien und Verfahren tragen zu einer Technologieführerschaft in dem Bereich gebäudeintegrierter Klein-Biogasanlagen bei.

Unter den *drei operativen Zielen* (Intensivierung der Produktnutzung, Optimierter Ressourceneinsatz, Schließen von Stoffkreisläufen) trägt das Projekt am stärksten zu dem drittgenannten Ziel bei.

Schließen von Stoffkreisläufen: Forschungs- und Entwicklungsvorhaben beeinflussen die Erreichung dieses Ziels positiv, wenn sie dazu beitragen, Abfallströme besser zu erfassen, aufzubereiten und stofflich sowie energetisch zu verwerten. Genau diese Prozessschritte (bessere Erfassung, Aufbereitung, und stoffliche sowie energetische Verwertung) erfolgten im Projekt auf Toilettenabwasserstrom (bzw. Braunwasserstrom im Speziellen).

6 Schlussfolgerungen

Im Projekt konnten Erkenntnisse in verschiedenen wesentlichen inhaltlichen Bereichen gewonnen werden.

1. Biogasproduktion aus Braunwasser

Um eine *effiziente Biogasproduktion aus Braunwasser* zu ermöglichen, sollte der Wassereintrag bei der Toilette minimiert und eine mechanische Beanspruchung (z.B. mit Pumpen) vermieden werden. Ein zu hoher Wasseranteil reduziert den Biogasertrag und die hydraulische Verweilzeit im Biogas-Fermenter, gleichzeitig erhöht sich der Energiebedarf für die Fermenter-Heizung.

Die Versuche im Rahmen des Projektes haben gezeigt, dass eine Aufkonzentrierung mittels Flockung und Absetzung sehr aufwendig ist und den Trockensubstanzgehalt von rund 0,5 % auf maximal 3,0 % erhöhen kann. Auch gehen über den Überstand, welcher jenen Teil des Ausgangssubstrats enthält, der nicht aufkonzentriert wurde, Feinpartikel und Nährstoffe verloren, die nicht im Fermenter und im Gärrest (zur Düngerproduktion) verwertet werden können.

Deshalb wird empfohlen, den Wassereintrag beispielsweise durch Einsatz von Vakuum-Toiletten zu minimieren und weiterführende Forschungen zur Fest-Flüssigtrennung zu betreiben.

2. Behandlung der Gärreste

Bei der Herstellung von *eingedicktem Gärrest* ist darauf zu achten, dass nicht durch vorhergehende Prozessschritte die Konzentrationen von Spurenelementen erhöht worden sind. Ansonsten kann insbesondere bei einer pyrolytischen Karbonisierung des Gärrests die Anreicherung der Spurenelemente dazu führen, dass Grenzwerte für eine *landwirtschaftliche Anwendung des Pyrolyseprodukts* überschritten werden. Dadurch würde die ansonsten wünschenswerte Rezyklierung von Nährstoffen, insbesondere Phosphor, von vornherein ausgeschlossen.

Die Kohlenstoff-Verbindungen im Gärrest neigen stärker als bei pflanzlichen Inputmaterialien einer Pyrolyse zum Übergang in die flüchtige Phase. Dadurch kommt es nicht zur von der Pflanzenkohle her bekannten starken Anreicherung von Kohlenstoff in den Pyrolysaten. Dies mindert zwar einen möglichen Ertrag durch Verkauf von Kohlenstoff-Zertifikaten, erhöht aber das Potential zur energetischen Nutzung der flüchtigen Pyrolyse-Produkte.

Eine *gemeinsame Behandlung von Urin und Gärresten* für die Produktion von Flüssigdünger hat sich als eher wenig interessant erwiesen. Zwar kann etwas mehr Stickstoff und Kalium zurückgewonnen werden, aber es treten auch Phosphorverluste auf und der Energiebedarf steigt wegen des höheren Wasseranteils wesentlich. Diese Erkenntnis ist besonders dann wichtig, wenn mit dem Düngerverkauf der Betrieb der Anlage mitfinanziert wird. Falls der primäre Fokus aber auf der Wasserrückgewinnung liegt, kann eine gemeinsame Behandlung von Urin und Gärresten dennoch interessant sein. Die Entscheidung, ob Urin und Gärreste gemeinsam behandelt werden sollen, hängt deshalb vom Geschäftsmodell ab.

3. Energiebilanzierung und Anwendungsszenarien

Bei einer Gegenüberstellung der energetischen Inputs für den Betrieb der Biogasanlage mit dem Biomethanertrag ergibt sich eine positive Energiebilanz, die sich mit steigender Gebäudegröße erhöht.

Der gesamte, von der Gebäudegröße bzw. Bewohner:innenanzahl abhängige Nettoenergieertrag (d.h. nach Abzug des Energieinputs) mit rund 0,2 kWh pro Person und Tag (bzw. ca. 0,1 kWh Netto-Stromausbeute pro Person und Tag) kann einen Beitrag zur Grundlastdeckung für das Gebäude leisten.

In Bestandsgebäuden ist die stofflich-energetische Nutzung von Braunwasser mittels Kleinbiogasanlage nur in Ausnahmefällen bzw. bei einer Totalsanierung realisierbar. Unter verschiedenen günstigen Voraussetzungen (größere Gebäude mit vielen Nutzer:innen, kontinuierliche Verfügbarkeit größerer Mengen biogener Lebensmittelabfälle, Zugänglichkeit der bestehenden Installationsschächte, Erneuerungsmöglichkeit bestehender Abwasserinstallationen, ausreichende Raumverfügbarkeit für die Anlage) kann auch in Bestandsgebäuden eine Umsetzung möglich sein. Somit werden zukünftige Anwendungen schwerpunktmäßig auf den Bereich von Neubauten fokussiert sein.

Kleinbiogasanlagen mit Brennstoffzellen zur stofflich-energetische Nutzung von Braunwasser sollten immer Teil eines ganzheitlichen Kreislaufsystems für Abwasser sein. Zu dieser ganzheitlichen Perspektive gehören zusätzliche Aspekte wie eine Nutzung der Abwärme des Abwassers, eine Grauwasseraufbereitungsanlage oder eine Anlage zur stofflichen Verwertung von Gelbwasser/Urin mit Pflanzennährstoff-Rückgewinnung.

4. Akzeptanz und Verhalten der Nutzer:innen

Die im Projekt durchgeführten sozialwissenschaftlichen Evaluationen des innovativen SAVE!-Trenn-WCs zeigen eine freundliche, interessierte Nutzer:innen- und Publikumsbeurteilung des Produkts, sodass dessen weiterer Einsatz in der Öffentlichkeit (samt weiterer Evaluation) erfolgreich sein dürfte. Zukünftige Evaluationen sollten Akzeptanzprobleme der Umfragemethodik mitberücksichtigen. Online-Nutzertestungen des innovativen SAVE!-WC-Konzeptes sind nicht notwendigerweise selbsterklärend, also als Selbstläufer via QR, zu erreichen, sondern sollten „altmodisch“, als personbegleitete Nachbesuchs-Erhebung im WC-Bereich auf einem Laptop mit Online-URL zum Fragebogen organisiert werden, um eine genügend große und repräsentative Nutzer:innenanzahl direkt zu motivieren und auch zu einem vollständig ausgefüllten Fragebogen bewegen zu können. Anders würde sich vermutlich ein Produkttest in einem neuen, mit SAVE!-WCs ausgestatteten Gebäude gestalten, wo deren Nutzer:innen wohl ein höheres Grundinteresse an einer Produktevaluation und -verbesserung hätten.

Verwertbarkeit und Umsetzbarkeit der Erkenntnisse

Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes werden im bereits parallel laufenden (und bis zur Umsetzung weiterlaufenden) Projekt „Plusenergy-FLAGSHIP“ (Stadt der Zukunft, 8. Ausschreibung) verwertet. In diesem Projekt wird in der – noch zu errichtenden – neuen schwimmenden Unternehmenszentrale der viadonau (Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH) eine Pilotanlage mit Trenntoiletten, Kleinbiogasanlage, Brennstoffzelle und Urinverwertung errichtet. Der Einsatz von einfacher Fest-/Flüssigtrenntechnologie (z.B. „Wisy“-Filter) wird im Projekt „Plusenergy-FLAGSHIP“ weiterhin getestet und die Effizienz (ohne vorgeschaltener Pumpe/Homogenisierung) zur Wasserabtrennung und Feststoffaufkonzentrierung ermittelt.

Generell ist festzuhalten, dass weitere Umsetzungsbeispiele von Interesse sind, da erst aus einem realen Betrieb verschiedene Erkenntnisse hinsichtlich Praxistauglichkeit gewonnen werden können.

Für eine weitergehende Umsetzung sind auch *verschiedene rechtliche Hürden* von Bedeutung. So ist die Realisierung von *Biogasanlagen in Gebäuden* eine nennenswerte Herausforderung, da sicherheitstechnische Aspekte hinsichtlich des Explosionsschutzes eingehalten werden müssen.

Karbonisate aus Gärresten und Kläranlagen (Klärschlamm) sind in Österreich nicht als Düngemittel zugelassen. Bestrebungen zur Lockerung dieser Bestimmungen sind im Gange und wurden in anderen Ländern auf nationaler Ebene bereits umgesetzt (SE, DK, CZ). Hinsichtlich des Einsatzes von Flüssigdünger besteht zurzeit nur eine Zulassung für Flüssigdünger aus Urin. Mit einem angepassten Antrag für eine Düngerbewilligung könnten aber Hürden für eine Zulassung von Flüssigdüngern, welcher unter Verwendung von Gärresten produziert werden, überwunden werden.

Die Ergebnisse sind relevant sowohl für Forschungsgruppen, die zum Thema "ressourcen-orientierte Sanitärsysteme" arbeiten, als auch für Anlagenentwickler:innen, Planungsbüros, Architekturbüros und Bauherr:innen, die solche Systeme installieren möchten.

7 Ausblick und Empfehlungen

Weiterführende *Forschungs- und Entwicklungsarbeiten* sollten auf folgende Punkte fokussieren:

1. Biogasproduktion aus Braunwasser

- Weitere Optimierung der Fest-/Flüssigtrennung mit möglichst einfacher Technologie (z.B. „Wisyl“-Filter, o.Ä.)
- Weitere Reduktion des Wasserbedarfs von Trenntoiletten
- Monitoring von Pilot-Anlagen im Realbetrieb.

2. Verbesserung der Umsetzbarkeit einer gebäudeintegrierten Klein-Biogasanlage

- Entwicklung einer günstigen und realisierbaren Biogas-Kleinstanlage zur Vergärung von Braunwasser
- Adressieren der rechtlichen Herausforderungen hinsichtlich der Realisierbarkeit von Biogasanlagen in Gebäuden (Schwerpunkt sicherheitstechnische Aspekte).

3. Rückgewinnung von Nährstoffen aus den Gärresten

- Optimierung der Verfahren zur Rückgewinnung von Nährstoffen aus den Gärresten
- Erhöhung des bioverfügbaren Phosphor-Anteils in Karbonisaten
- Entwicklung von praxistauglichen Düngerprodukten; Erreichen von Düngerbewilligungen.

Hinsichtlich einer *Erhöhung des Potenzials für die wirtschaftliche Umsetzung und Markteinführung* von Systemen, wie sie im Projekt untersucht wurden, ist vor allem von Bedeutung, dass sie in Richtung Anwendbarkeit und Kostenreduktion verbessert werden. Auch die verschiedenen rechtlichen Hemmnisse sind durch geeignete Schritte (wie Genehmigungsverfahren von Düngerprodukten) zu adressieren.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Biogas-Laboranlage (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien).....	20
Abbildung 2: Die Biogas-Laboranlage im Betrieb. Rechts der Vorlage- bzw. Absetzbehälter, links die drei Fermenter, Materialfluss von rechts nach links (Bildnachweis: Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien).....	21
Abbildung 3: Eine der beiden installierten Trenntoiletten am Standort Gmunden der Fa. Laufen. An der Innenseite der Tür ist ein Informationsblatt mit einer Prinzipskizze der Toilette und einer „Benutzungsanleitung“ angebracht (Bildnachweis: Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)	22
Abbildung 4: Sammlung der Braunwasserfraktion am Standort Gmunden der Fa. Laufen. Links hinten zwei IBC-Sammeltanks, rechts vorne ein Absetzbehälter (Bildnachweis: Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien).....	23
Abbildung 5: Biomethanertrag (bezogen auf organische Trockensubstanz und chemischen Sauerstoffbedarf) von Braunwasser, Probe „Laufen 1 (SAVE!)“ (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien).....	26
Abbildung 6: Biomethanertrag (bezogen auf organische Trockensubstanz und chemischen Sauerstoffbedarf) von Speiseresten, Probe „Speisereste 2 (dick)“ (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien).....	26
Abbildung 7: Biogasproduktion, organische Raumlast, zugeführte Substratmenge und hydraulische Verweilzeit der kontinuierlich betriebenen Fermenter über den Zeitraum Oktober 2023 bis August 2024 (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)	28
Abbildung 8: pH-Wert und Summe der feinen flüchtigen Fettsäuren in Fermenter 1 (oben) und Fermenter 2 (unten) über den Zeitraum April 2023 bis August 2024 (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien).....	29
Abbildung 9: Ergebnisse der Abbauprobe von Sulfamethoxazol (Antibiotikum, oben) und Diclofenac (Schmerzmittel, unten) im Batch-Versuch (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien).....	30
Abbildung 10: Ergebnisse der Mikrobiom-Untersuchung der Proben aus den Fermenter 1 (links) und Fermenter 2 (rechts) in Form von „Krona Charts“. In türkis der Anteil der Archaeen, welche für die Methanproduktion zuständig sind, in rot/rosa der Anteil der verschiedenen Bakterienarten (Quelle: Microsynth AG, Balgach, Schweiz)	31

Abbildung 11: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Schrägfilters der Fa. Leiblein (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)..	33
Abbildung 12: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Rotationsfilters der Fa. Assonic (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)	34
Abbildung 13: Konzentrationsverlauf von Ammonium und Nitrat während der biologischen Behandlung der Gelbwasser/Gärrest-Lösung. Dunkelblaue Linie und Quadrate: Summe von Nitrat und Ammonium im Ablauf; grüne Linie und Dreiecke: Ammonium im Ablauf, rote Linie und Kreise: Nitrat im Ablauf; hellblaue Linie: Ammonium im Zulauf. Gepunktete Linie: drei hydraulische Aufenthaltszeiten nach zweiter Zugabe von Schlamm. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag).....	46
Abbildung 14: Konzentrationen von gelöstem Kalium, Ammonium und Phosphat in den Mischlösungen in Experiment C. Weiß: Erwartungswerte; schwarz: Messungen; schraffiert: Summe aus Messungen und berechneten Fällungsprodukten (siehe auch Tabelle 12) (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag).....	48
Abbildung 15: Energiebilanz in Abhängigkeit von der Gebäudegröße (Personenanzahl pro Gebäude) (eigene Darstellung, Schöberl & Pöll GmbH).....	55
Abbildung 16: Die Belegschaft der Fa. Laufen am Produktionsstandort Gmunden während der Kick-Off Veranstaltung der Nutzerbefragung am 5.7.2022 (Bildnachweis: Alexander Keul).....	57
Abbildung 17: Ausschnitt aus den Befragungsergebnissen. (eigene Darstellung, Alexander Keul).....	57
Abbildung 18: Straßenansicht des Gebäudes mit der Adresse Am Krautgarten 21, 1220 Wien. (Bildnachweis: Ernst Heiduk).....	61
Abbildung 19: Schnitt KG, Höhenlagen der Abwasserleitung bis Straßenkanal (eigene Darstellung, Ernst Heiduk).....	62
Abbildung 20: Wohnhausanlage Unterstein 205, Langenegg (Bildnachweis: Morscher Bauprojekte GmbH)	63
Abbildung 21: Schematische Darstellung einer semi-dezentralen Abwasseranlage (eigene Darstellung, Ernst Heiduk, basierend auf Plangrundlage von Herrmann Kaufmann Architekten)	64
Abbildung 22: Straßenansicht Thaliastraße 37, 1160 Wien (Bildnachweis: Ernst Heiduk).....	65
Abbildung 23: Grundriss KG mit möglichen Abwasserleitungen (Trennsystem) und Technikraumflächen (eigene Darstellung, Ernst Heiduk).....	66

Abbildung 24: Spüle mit Küchenabfallzerkleinerer (KAZ), schematische Darstellung (Bildnachweis: FreePik, License Free https://www.freepik.com/free-vector/kitchen-sink-with-slices-vegetables-falling-with-water-into-food-waste-disposer-realistic_6804341.htm)	69
---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Substratanalysen und Biomethanerträge von Braunwasserproben, Speiseresten und Toilettenpapier (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)	24
Tabelle 2: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Schrägfilters der Fa. Leiblein (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)..	33
Tabelle 3: Ergebnisse der Versuche zur Fest-/Flüssigtrennung des Braunwassers mit Hilfe des Rotationsfilters der Fa. Assonic (eigene Darstellung, Institut für Umweltbiotechnologie, BOKU Wien)	34
Tabelle 4: Grundcharakterisierung des im August 2023 produzierten Gärrest-Materials sowie seiner Karbonisate (eigene Darstellung, Institut für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien).....	36
Tabelle 5: Zusammensetzung des im Dezember 2023 produzierten Gärrest-Materials sowie seines Pyrolysats (eigene Darstellung, Inst. für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien)	37
Tabelle 6: Zusammensetzung des im April 2024 produzierten Gärrest-Materials sowie seines Pyrolysats (550 °C). (eigene Darstellung, Inst. für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien).....	38
Tabelle 7: Hauptelemente, Nährstoff- und Spurenelemente des im Juni 2024 produzierten Gärrest-Materials sowie zweier HTC-Karbonisate (eigene Darstellung, Institut für Verfahrens- und Energietechnik, BOKU Wien)	39
Tabelle 8: Frachten der drei wichtigsten Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium in Urin und Fäzes (Fäkalien) gemäß Friedler et al. (2013)	41
Tabelle 9: Frachten der drei wichtigsten Nährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium in Gelbwasser und Braunwasser unter der Annahme einer Urinentrennleistung von 80 % und den Frachten in Tabelle 8.....	41
Tabelle 10: Zusammensetzung von Gärrest, Überstand, Gelbwasser und Reaktorzulauf (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag).....	45
Tabelle 11: Elektrischer Energieverbrauch berechnet für die Anlage, beschrieben in Fumasoli et al. (2016). Die Angaben für die Konzentrationen und die volumetrische Beschickung sind aus dieser	

Studie und aus Fumasoli et al. (2016) für die Gelbwasser/Gärrest-Lösung bzw. für das gelagerte Gelbwasser	47
Tabelle 12: Minderbefund von gelöstem Phosphat, Calcium und Magnesium gegenüber den Erwartungswerten in Experiment C. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag)	49
Tabelle 13: Theoretische Anteile der Mineralien Struvit ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) und Octacalciumphosphat (OCP, $Ca_8H_2(PO_4)_6 \cdot 5H_2O$) am Minderbefund von gelöstem Phosphat in Experiment C. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag).....	50
Tabelle 14: Veränderung der zurückgewonnenen Nährstoffmenge durch Zumischung von Gärrest unter der Annahme, dass das Gelbwasservolumen gleichbleibt und das Gärrestvolumen zunimmt. (eigene Darstellung, K. Udert, Eawag).....	50
Tabelle 15: Parameter zur Berechnung des Energieinputs für die Biogas-Referenzanlage (Wohngebäude mit 100 Bewohner:innen). (eigene Darstellung)	52
Tabelle 16: Parameter zur Berechnung des Biomethan- und Energieertrags, pro Person und Tag (eigene Darstellung)	53
Tabelle 17: Energiebilanz für eine Biogas-Referenzanlage in einem Wohnhaus mit 100 Bewohner:innen	54
Tabelle 18: Übersicht Fallstudien: Eckdaten und Nettostromerträge (Eigene Darstellung, Schöberl & Pöll GmbH)	67
Tabelle 19: Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert wurden	83
Tabelle 20: Beschreibung der Metadaten für Analysen im Laborbetrieb der Biogasanlage	84
Tabelle 21: Beschreibung der Metadaten für Analysen der eingedickten Gärreste und der Karbonisate (Institut für Verfahrens- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur Wien).....	85
Tabelle 22: Beschreibung der Metadaten für Analysen der flüssigen Gärreste, in Kombination mit Urinproben (Eawag, Kai Udert)	85
Tabelle 23: Beschreibung der Metadaten von Datensatz LAU_GMU	87
Tabelle 24: Beschreibung der Metadaten von Datensatz MUS_GMU	87
Tabelle 25: Beschreibung der Metadaten von Datensatz BERLIN.....	88

Literaturverzeichnis

Faust, V., Vlaeminck, S.E., Ganigué, R. and Udert, K.M. (2024): Influence of pH on Urine Nitrification: Community Shifts of Ammonia-Oxidizing Bacteria and Inhibition of Nitrite-Oxidizing Bacteria. *ACS ES&T Engineering* 4(2), 342-353.

Friedler, E., Butler, D. and Alfiya, Y. (2013): Wastewater composition. In: *Source Separation and Decentralization for Wastewater Treatment*. Larsen, T.A., Udert, K.M. and Lienert, J. (Herausgeber), pp. 259-273, IWA Publishing, London UK.

Fumasoli, A., Etter, B., Sterkele, B., Morgenroth, E. and Udert, K.M. (2016): Operating a pilot-scale nitrification/distillation plant for complete nutrient recovery from urine. *Water Science and Technology* 73(1), 215-222.

Heusser, A., Dax, A., McArdell, C.S. and Udert, K.M. (2024): Comparing the adsorption of micropollutants on activated carbon from anaerobically stored, organics-depleted, and nitrified urine. *Water Research* 257, 121615.

Kegebein, Jörg (2006): Die Verwendung von Küchenabfallzerkleinerern (KAZ) aus abwasser- und abfallwirtschaftlicher Sicht, Dissertation Universität Karlsruhe – Verlag Siedlungswasserwirtschaft, 2006, Schriftenreihe des SWW Karlsruhe – Band 122, ISBN-10: 3-9809383-5-2, ISBN-13: 978-3-9809383-5-8

Larsen, T.A., Riechmann, M.E. and Udert, K.M. (2021): State of the art of urine treatment technologies: A critical review. *Water Research X* 13, 100114.

Lienert, J., Larsen, T.A. (2009): High acceptance of urine source separation in seven European countries: A review. *Environmental Science & Technology* 44, 556-566.

Singh Shubhra, Hariteja N., Sharma Shilpi, Raju N. Janardhana, Prasad Renuka T.J. (2021): Production of biogas from human faeces mixed with the co-substrate poultry litter & cow dung. *Environmental Technology & Innovation* 23 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101551>

Udert, K.M., Larsen, T.A., Biebow, M. and Gujer, W. (2003a): Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water Research* 37(11), 2571-2582.

Udert, K.M., Larsen, T.A. and Gujer, W. (2003b): Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. *Water Research* 37(11), 2667-2677.

Udert, K.M., Fux, C., Münster, M., Larsen, T.A., Siegrist, H. and Gujer, W. (2003): Nitrification and autotrophic denitrification of source-separated urine. *Water Science and Technology* 48(1), 119-130.

Udert, K.M. and Wächter, M. (2012): Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research* 46(2), 453-464.

Wild, D., Kisliakova, A. and Siegrist, H. (1996): P-fixation by Mg, Ca and zeolite A during stabilization of excess sludge from enhanced biological p-removal. *Water Science and Technology* 34(1-2), 391-398.

Abkürzungsverzeichnis

ABR	Anaerobic Baffle Reactor
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
FM	Frischmasse
HTC	Hydrothermal Carbonisation (Hydrothermale Karbonisierung)
HPLC chromatography)	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (high performance liquid chromatography)
kWh	Kilowattstunde
OTS	Organische Trockensubstanz
TKN	Gesamtstickstoff
TS	Trockensubstanz
VFAs	Freie flüchtige Fettsäuren (Volatile fatty acids)

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

1: Datenerstellung und Dokumentation

Es wurden keine Daten im großen Stil aus externen oder internen Quellen (bzw. Vorprojekten) im Projekt verwendet, nur einzelne Daten aus der wissenschaftlichen Literatur, siehe z.B. Kapitel 5.4 und Kapitel 5.5.

Die folgende Tabelle beschreibt jene Daten, welche Projekt generiert wurden.

Tabelle 19: Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert wurden

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
Gärrest-Input 08/2023; Gärrest 12/2023 Input; Gärrest 04/24 Input; Gärrest 06/24 Input	Chemische Analysen von Gärrest-Inputmaterialien sowie ihrer Karbonisate	Numerisch	Chemische Analyse- daten	Institut für Verfahrens- und Energie- technik der Universität für Bodenkultur Wien	nicht öffentlich
Daten Gaerrest Urin Ueberstand	Messungen der Zusammensetzung von Gärresten, Urin und des Überstands der Vergärung	Numerisch	Chemische Analyse- daten	Eawag (Kai Udert)	Können mit dem Bericht veröffentlicht werden
Daten Nitrifikation	Messungen während eines Experimentes zur aeroben biologischen Behandlung eines Gärrest/Urin-Gemisches	Numerisch	Chemische Analyse- daten	Eawag (Kai Udert)	Können mit dem Bericht veröffentlicht werden
Daten Misch- experiment	Gärreste und Urin wurden in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt und dann gemessen	Numerisch	Chemische Analyse- daten	Eawag (Kai Udert)	Können mit dem Bericht veröffentlicht werden

Datenfile Abwasser-kreislauf	Chemische Analysen Substrate, Fermenter-inhalte und Gärreste	Numerisch	Analysenergebnisse der Routineanalytik/Monitoring	Institut für Umweltbiotechnologie der Universität für Bodenkultur Wien	nicht öffentlich
Kontis Abwasser-kreislauf	Datenaufnahme Monitoring kontinuierliche Biogas-Fermenter	Numerisch	Zeitreihen von Monitoring-daten	Institut für Umweltbiotechnologie der Universität für Bodenkultur Wien	nicht öffentlich
LAU_GMU	Produkttest SAVE! nach Benützung	Text und numerische Variablen	Excel-Datei	Projektpartner Alexander Keul	Auf Wunsch zusendbar
MUS_GMU	Produkttest SAVE! in der Ausstellung „Klo & So“ des Kammer-museums in Gmunden	Text und numerische Variablen	Excel-Datei	Projektpartner Alexander Keul	Auf Wunsch zusendbar
BERLIN	Produkttest SAVE! nach Benützung	Text und numerische Variablen	Excel-Datei	Projektpartner Alexander Keul	Keiner; da zu geringe Stichprobe

Die Daten wurden entweder im Rahmen der im Zuge des Projekts durchgeführten Laborversuche (Beschreibungen siehe obige Tabelle, Zeilen 1 bis 6) oder der Befragungen (Beschreibungen siehe obige Tabelle Zeilen 7 bis 9) durchgeführt.

Die folgenden Tabellen (Tabelle 20 bis Tabelle 25) beschreiben die Metadaten der im Projekt generierten Daten.

Tabelle 20: Beschreibung der Metadaten für Analysen im Laborbetrieb der Biogasanlage

Attribut	Beschreibung
ID	„Datenfile Abwasserkreislauf“; „Kontis Abwasserkreislauf“ (Excel-Files)
Titel	Analysenergebnisse Forschungsprojekt Abwasser-Kreislauf
Zusammenfassung	Dokumentation der Analysenergebnisse und Datenaufnahme Fermenter
Kurzbezeichnung	Datenaufnahme und Datenauswertung
Einheit	Siehe Tabellen/Auswertungen im Bericht
Zeitintervall	2022 - 2024
Zeitraum und Referenzjahr	2022 - 2024
Institution	https://boku.ac.at/ifa-tulln/institut-fuer-umweltbiotechnologie
Kontakt	Wolfgang.gabauer@boku.ac.at
Mitwirkende und Rolle	Thomas Heger - Analytik, Projektmitarbeiter Sanjay Chauhan - Analytik, Projektmitarbeiter

	Nagihan Aydin - Analytik, Projektmitarbeiterin Luděk Poschmaier-Kamarád - Projektleiter Wolfgang Gabauer - Projektleiter
Methodik	Auswertung und Dokumentation in MS Excel
Datenvervollständigung	Analysenwiederholung
Quelldaten	Datendokumentation und Auswertung interne Files
Kommentar	-
Erstellungsdatum	2024-09-31
Datentyp	Analysendaten
Versionsstand	V1

Tabelle 21: Beschreibung der Metadaten für Analysen der eingedickten Gärreste und der Karbonisate (Institut für Verfahrens- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur Wien)

Attribut	Beschreibung
ID	Gärrest-Input 08/2023; Gärrest 12/2023 Input; Gärrest 04/24 Input; Gärrest 06/24 Input
Titel	Analysen Gärrest + Karbonisate
Zusammenfassung	Gehalte von Hauptelementen, Nähr- und Spurenelementen
Kurzbezeichnung	Gärrest
Einheit	Siehe Tabellen
Zeitintervall	2023-2024
Zeitraum und Referenzjahr	2023-2024
Institution	https://boku.ac.at/map/ivet
Kontakt	gerhard.soja@boku.ac.at
Mitwirkende und Rolle	David Gansterer-Heider – Analytik Gerhard Soja - Berichterstellung
Methodik	Je nach Parameter variabel
Datenvervollständigung	Analysenwiederholung
Quelldaten	Siehe Labordaten und externe Laborprotokolle AGES GmbH
Kommentar	-
Erstellungsdatum	30.9.2024
Datentyp	Analysedaten
Versionsstand	V1

Tabelle 22: Beschreibung der Metadaten für Analysen der flüssigen Gärreste, in Kombination mit Urinproben (Eawag, Kai Udert)

Attribut	Beschreibung
ID	
Titel	Daten_Gaerrest_Urin_Ueberstand.csv
Zusammenfassung	Messungen von Gärresten, Urin und Überstand der Vergärung
Kurzbezeichnung	
Einheit	
Zeitintervall	

Zeitraum und Referenzjahr	2023 bis 2024
Institution	Eawag, das Wasserforschungsinstitut im ETH-Bereich
Kontakt	kai.udert@eawag.ch
Mitwirkende und Rolle	Leiter des Unterprojektes: Kai Udert Projektbearbeitende: Marco Kipf, Bettina Sterkele Laborteam: Aline Hobi, Silvia Richter
Methodik	chemische und physikalische Messungen
Kommentar	
Erstellungsdatum	2024-12-17
Datentyp	CSV
Versionsstand	V1
ID	
Titel	Daten_Mischexperimente
Zusammenfassung	Gärreste und Urin wurden in unterschiedlichen Verhältnissen gemischt und dann gemessen.
Kurzbezeichnung	
Einheit	
Zeitintervall	
Zeitraum und Referenzjahr	2023 bis 2024
Institution	Eawag, das Wasserforschungsinstitut im ETH-Bereich
Kontakt	kai.udert@eawag.ch
Mitwirkende und Rolle	Leiter des Unterprojektes: Kai Udert Projektbearbeitende: Bettina Sterkele Laborteam: Aline Hobi, Silvia Richter
Methodik	chemische und physikalische Messungen
Kommentar	-
Erstellungsdatum	2024-12-17
Datentyp	CSV
Versionsstand	V1
ID	
Titel	Daten_Nitrifikation
Zusammenfassung	Messungen während eines Experimentes zur aeroben biologischen Behandlung eines Gärrest/Urin-Gemisches
Kurzbezeichnung	
Einheit	
Zeitintervall	
Zeitraum und Referenzjahr	2023 bis 2024
Institution	Eawag, das Wasserforschungsinstitut im ETH-Bereich
Kontakt	kai.udert@eawag.ch
Mitwirkende und Rolle	Leiter des Unterprojektes: Kai Udert Projektbearbeitender: Marco Kipf Laborteam: Aline Hobi, Silvia Richter
Methodik	chemische und physikalische Messungen
Kommentar	-
Erstellungsdatum	2024-12-17
Datentyp	CSV

Versionsstand	V1
---------------	----

Tabelle 23: Beschreibung der Metadaten von Datensatz LAU_GMU

Attribut	Beschreibung
ID	LAU_GMU - Belegschaft Werk Laufen in Gmunden, Österreich
Titel	LAU_GMU
Zusammenfassung	Produkttest SAVE! WC nach Benützung durch die Belegschaft
Kurzbezeichnung	Nutzerevaluation
Zeitraum und Referenzjahr	Juli 2022
Institution	Limesurvey.orf/de Onlineumfrage via Host Universität Salzburg – siehe www.plus.ac.at/datenschutz/datenschutzinformationen/umfragen
Kontakt	alexander.keul@plus.ac.at als Projektleiter
Mitwirkende und Rolle	Keine weiteren Mitarbeiter
Methodik	Fragebögen zum Ausfüllen, Datatypie als Excel-File, statistische Auswertung mittels SPSS-IBM
Datenvervollständigung	Keine Vervollständigung fehlender Daten
Quelldaten	Keine
Kommentar	Sozialwissenschaftliche Kurzumfrage mit qualitativen und quantitativen Daten
Erstellungsdatum	Datum der Datenerstellung (2022-07-16)
Datentyp	Qualitativ (Text) und numerisch
Versionsstand	Erste Version der Daten, anonym laut DSGVO weiterverwendbar

Tabelle 24: Beschreibung der Metadaten von Datensatz MUS_GMU

Attribut	Beschreibung
ID	MUS_GMU – Besucher Kammerhofmuseum Gmunden, Österreich
Titel	MUS_GMU
Zusammenfassung	Produktbeurteilung von ausgestellttem SAVE! WC
Kurzbezeichnung	Nutzerevaluation
Zeitraum und Referenzjahr	19.11.2023-26.5.2024
Institution	Limesurvey.orf/de Onlineumfrage via Host Universität Salzburg – siehe www.plus.ac.at/datenschutz/datenschutzinformationen/umfragen
Kontakt	alexander.keul@plus.ac.at als Projektleiter

Mitwirkende und Rolle	Keine weiteren Mitarbeiter
Methodik	Via QR-Zugang Online-Fragebögen zum Ausfüllen, Sammlung als Excel-File, statistische Auswertung mittels SPSS-IBM
Datenvervollständigung	Keine Vervollständigung fehlender Daten
Quelldaten	Keine
Kommentar	Sozialwissenschaftliche Umfrage mit qualitativen und quantitativen Daten
Erstellungsdatum	Datum der Datenerstellung (2024-06-24)
Datentyp	Qualitativ (Text) und numerisch
Versionsstand	Erste Version der Daten, anonym laut DSGVO weiterverwendbar

Tabelle 25: Beschreibung der Metadaten von Datensatz BERLIN

Attribut	Beschreibung
ID	BERLIN – WC-Besucher in Berlin-Tempelhof, Deutschland
Titel	BERLIN
Zusammenfassung	Produkttest SAVE! WC nach Benützung durch die Besucher
Kurzbezeichnung	Nutzerevaluation
Zeitraum und Referenzjahr	25.10.-27.11.2024
Institution	Limesurvey.orf/de Onlineumfrage via Host Universität Salzburg – siehe www.plus.ac.at/datenschutz/datenschutzinformationen/umfragen
Kontakt	alexander.keul@plus.ac.at als Projektleiter
Mitwirkende und Rolle	Keine weiteren Mitarbeiter
Methodik	Fragebögen zum Ausfüllen, Datatypie als Excel-File, statistische Auswertung mittels SPSS-IBM – leider keine auswertbare Anzahl von Datensätzen
Datenvervollständigung	Keine Vervollständigung fehlender Daten
Quelldaten	Keine
Kommentar	Sozialwissenschaftliche Kurzumfrage mit qualitativen und quantitativen Daten
Erstellungsdatum	Datum der Datenerstellung (2024-12-09)
Datentyp	Qualitativ (Text) und numerisch
Versionsstand	Erste Version, zu geringe Anzahl auswertbarer Datensätze

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Die im Projekt generierten Daten unterliegen keinen Persönlichkeits- oder Urheberrechten. Dies gilt auch für die Daten aus den Fragebogen- bzw. Onlineerhebungen (diese sind anonymisiert).

3: Datenspeicherung und -erhalt

Die Daten sind auf den EDV-Systemen der jeweiligen Institutionen gespeichert und unterliegen den Richtlinien der jeweiligen Institution, was Backups etc. betrifft.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Die im EDV-System des IFA Tulln (BOKU University) abgelegten Daten sind nicht öffentlich zugänglich (siehe Tabelle 20 und Tabelle 21).

Die an der Eawag generierten Daten können öffentlich zur Verfügung gestellt werden (siehe Tabelle 22).

Die anonymisierten Datensätze aus den Nutzerbefragungen können bei Bedarf jederzeit weiterwendet werden können (siehe Tabelle 23 bis Tabelle 25).

9.2. Weitere Anhänge

9.2.1. Fragebogen für die Befragung der Belegschaft im Werk Gmunden der Fa. Laufen

LAUFEN MEIN **save!**-PRODUKTTEST Datum: a.k. FFG

Ich bin Laufen-Mitarbeiter in der Produktion der Verwaltung der Entwicklungsabteilung.

Was fiel Ihnen im save!-WC als **erster Eindruck** positiv auf? Fiel Ihnen dabei etwas negativ auf?

.....
Gab es bei Ihrer Benutzung des save!-WC **ein Problem**? Wenn ja - was genau war das Problem?

.....
Falls bei Ihrer save!-Nutzung etwas nicht in Ordnung war, wie könnte es **verbessert** werden?

.....
Die **Trennfunktion** des save!-WC funktioniert nur dann, wenn man sich zum Gebrauch hinsetzt.
 für mich kein besonderes Problem / das stört mich / ich will mich nicht jedesmal hinsetzen.

Im **Vergleich** zu einem **konventionellen WC** empfinde ich den Gebrauch des save!:
 als besser als etwa gleich gut als schlechter

Zur **WCspülung** des save! habe ich die große Spültaste die kleine Spaltaste betätigt.

Danke, dass Sie sich am Produkttest beteiligen! Bitte Ihren ausgefüllten Fragebögen gleich abgeben.

9.2.2. Online-Umfrage Kammerhof-Museum Gmunden, Sonderausstellung „Klo & So“

Sehr geehrte(r) Ausstellungsbesucher(in) von „Klo & so“ in Gmunden!

Sie haben in der Ausstellung auch das neue Trenn-WC SAVE! von Laufen mit Informationsposter gesehen. Vielen Dank, dass Sie sich freundlicherweise an unserer Umfrage „WC 2050“ beteiligen. Es ist eine digitale Online-Umfrage am PC, ohne Papier und Bleistift, und dauert nur einige Minuten. Wenn Ihnen die Umfrage zwischendurch gar nicht mehr gefällt, können Sie auch vorzeitig aussteigen. Bitte beantworten Sie möglichst jede Frage, damit wir eine Vorstellung davon bekommen, wie Sie sich das „WC 2050“ selbst vorstellen. Nach Ihren Antworten und dem Abschluss der Online-Umfrage erhalten Sie an der Museumskassa als Dankeschön ein kleines Geschenk.

Ich bin: Touristische(r) Besucher(in) von Gmunden / Einheimische(r) aus Österreich

Für touristische Besucher(innen) – Mein Land/Bundesland:

Für Einheimische – Postleitzahl (Österreich):

Ich bin: weiblich / männlich / divers

Mein Alter: Jahre

In meinem Haushalt leben außer mir noch: Erwachsene / Kinder

Mein Beruf: / in Ausbildung / Hausfrau/mann / in Pension

Mein höchster Schulabschluss: Grundschule / Lehre, Berufsschule / Matura, Abitur / (Fach)Hochschule

Warum haben Sie heute die WC-Ausstellung „Klo und so“ besucht?

Ich besuche diese Ausstellung hier: allein / mit Partner(in)/Freund(in) / mit Kind(ern) / zusammen mit einer Reise-/Ausflugsguppe / zusammen mit Leuten aus meiner Firma

Ich wäre auch dann ins Kammerhof-Museum Gmunden gekommen, wenn es dort keine Ausstellung Klo & So gegeben hätte: Ja, sicher / vielleicht schon / eher nicht / nein, sicher nicht

Wenn Sie vor allem wegen des Klo & So ins Kammerhof-Museum Gmunden gekommen sind: Wie beurteilen Sie persönlich den Wert/die Attraktivität des restlichen Ausstellungsangebotes? <qualitativ>

Finden Sie Umweltschutz, natürliche Kreisläufe und den sparsamen Umgang mit Ressourcen allgemein: sehr wichtig / schon wichtig / nur teilweise wichtig / nicht so wichtig, wird übertrieben

Sind Sie Mitglied bei einer Naturschutz-/Umweltschutzorganisation?: ja / nein

Ich vermeide alle öffentlichen Toiletten und gehe viel lieber zu Hause aufs WC: ja, immer, sofern möglich / ja, in Einzelfällen / nein, macht mir nichts aus

Ich habe zu Hause: ein konventionelles WC mit Spülkasten / ein WC mit zusätzlichem Urinal / ein WC mit zusätzlichem Bidet / ein „Dusch-WC“ (Reinigungsfunktion per Wasserstrahl auf Knopfdruck) / ein

WC mit Unterdruckspülung und reduziertem Spülwasser / ein Kompost-WC ohne Spülung / etwas anderes:

Diese Form eines „Trenn-WC“ (Trennung von Urin und Fäkalien/Feststoffen) habe ich hier im Museum zum ersten Mal gesehen / kenne ich aus den Medien / kenne ich von einer Ausstellung / habe ich schon selbst ausprobiert – Wie fanden Sie es?

Erscheint Ihnen persönlich eine Trennung von Urin und Feststoffen aus Umweltgründen schon im WC als: Sehr sinnvoll / schon sinnvoll / möglicherweise sinnvoll / eher unsinnig, übertrieben

Würden Sie zeitweise (Urlaub/Hotel, Studentenheim, Büro/Arbeitsort) ein Trenn-WC benützen? Ja, kann ich mir vorstellen / kann ich mir vielleicht vorstellen / nein, sicher nicht

Würden Sie beim Einzug in eine neue Wohnung, wenn Sie zwischen den Varianten konventionelles WC und Trenn-WC wählen könnten, eine Wohnung mit Trenn-WC wählen? Ja, kann ich mir vorstellen / kann ich mir vielleicht vorstellen / nein, sicher nicht

Halten Sie ein Trenn-WC im Vergleich zu einem konventionellen WC für: Viel praktischer / möglicherweise praktischer / eher unpraktischer / völlig unpraktisch

Halten Sie ein Trenn-WC im Vergleich zu einem konventionellen WC für: Viel hygienischer / möglicherweise hygienischer / eher unhygienischer / völlig unhygienisch

Frage für Männer: Damit das Trenn-WC funktionieren kann, müssen sich auch Männer immer hinsetzen. Wäre dieses Verhalten für Sie als Nutzer: in Ordnung, kein Problem / störend, weil ungewohnt / völlig unmöglich, weil Männer zum Urinieren ein Urinal nutzen

Um Wasser zu sparen und Abwasser zu reduzieren, sollten Nutzer(innen) eines Trenn-WCs nach dem Urinieren nur die Kurzspültaste drücken. Wäre das für Sie als Nutzer(in): selbstverständlich / störend, weil ungewohnt / völlig unmöglich, weil ich am WC immer lange spüle

Wären Sie bereit, bei einem Wohnungsneubau für ein Trenn-WC-System mit Nährstoffrückgewinnung etwas mehr Investitionskosten zu tragen und danach langfristig weniger Betriebskosten zu haben? Ja, wenn die Investitionskosten überschaubar bleiben / vielleicht schon / eher nicht / auf keinen Fall

Ist Ihnen zum Trenn-WC oder allgemein zum WC noch etwas eingefallen, wonach hier nicht gefragt wurde, das Sie aber persönlich für wichtig halten?

Bei der biologischen Aufbereitung von getrenntem Urin und Feststoffen aus dem Trenn-WC werden voraussichtlich als Endprodukte Dünger-Pellets, Flüssigdünger (z.B. Aurin) und Biokohle für die Pflanzendüngung entstehen. Können Sie sich vorstellen, solche Produkte für Ihren Garten/Ihre Landwirtschaft zu verwenden? Ja / vielleicht / eher nicht / sicher nicht

Nochmals vielen Dank für Ihre Teilnahme an unserer Umfrage und Ihre für Forschung und Praxis wertvollen Anregungen! Diese Umfrage ist anonym.

9.2.3. Online-Umfrage Kreativ-Campus Atelier Gardens, Berlin Tempelhof

Sehr geehrte(r) Benutzer(in) des neuen Trenn-WCs SAVE! von Laufen: Diese digitale Online-Umfrage ist über den QR-Code zugänglich, anonym und dauert nur einige Minuten. Sie können jederzeit aussteigen. Wir würden uns aber über Ihre vollständige Antwort freuen. Vielen Dank!

Ich bin: Berliner(in) / Tourist(in) / Ausländer(in) - Mehrfachnennung möglich

Ich bin: weiblich / männlich / divers

Mein Altersjahrzehnt: unter 20 / 20-29 / 30-39 / 40-49 / 50-59 / 60-69 / 70 und darüber

Mein Beruf: / in Ausbildung / Hausfrau/mann / in Pension

Ich benütze das SAVE!-WC heute zum ersten Mal / ich benütze es öfter / regelmäßig

Was fällt Ihnen am SAVE!-WC positiv auf?

Was fällt Ihnen am SAVE!-WC negativ auf?

Gab es bei Ihrer SAVE!-Benutzung ein Problem? Was war das genau?

Könnte Ihrer Meinung am SAVE!-WC etwas verbessert werden?

Das SAVE!-Trenn WC funktioniert nur, wenn sich alle – auch die Männer – hinsetzen: Für mich kein Problem / das stört mich / ich will mich aber nicht jedesmal hinsetzen

Im Vergleich zu einem konventionellen WC finde ich den Gebrauch von SAVE! als: Praktischer / unpraktischer Hygienischer / unhygienischer

Ich war jetzt am SAVE!-WC: „groß“ / „klein“

Zur Spülung des SAVE!-WC habe ich danach: Die große Spültaste / die kleine Spartaste betätigt

Finden Sie Umweltschutz, natürliche Kreisläufe und den sparsamen Umgang mit Ressourcen: sehr wichtig / schon wichtig / nur teilweise wichtig / nicht so wichtig, wird übertrieben

Ich habe zu Hause: ein konventionelles WC mit Spülkasten / ein WC mit zusätzlichem Urinal / ein WC mit zusätzlichem Bidet / ein „Dusch-WC“ (Reinigungsfunktion per Wasserstrahl auf Knopfdruck) / ein WC mit Unterdruckspülung / etwas anderes (z.B. ein Kompost-WC)

Erscheint Ihnen eine Trennung von Urin und Feststoffen aus Umweltgründen schon im WC als: Sehr sinnvoll / schon sinnvoll / möglicherweise sinnvoll / eher unsinnig, übertrieben

Könnten Sie sich in einer neuen Wohnung, falls dadurch nur wenig Mehrkosten entstehen, ein Trenn-WC wie das SAVE! vorstellen? Ja, kann ich mir vorstellen / vielleicht / nein, sicher nicht

Nochmals vielen Dank für Ihre Teilnahme an unserer anonymen Umfrage und Ihre für Forschung und Praxis wertvollen Anregungen!