

Zurück in
den Kreislauf –
Handbuch
für die Sanitär-
und Nährstoffwende



ZURÜCK IN DEN
KREISLAUF
zirkulierBAR

.....
: Zurück in
den Kreislauf –
Handbuch
für die Sanitär-
und Nährstoffwende

REGION.
innovativ



GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung





Sammlung



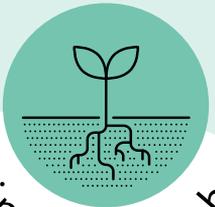
Transport



kulierBAR



Verwertung



Düngung & Anbau



Inverkehrbringen

Inhaltsverzeichnis

1 Kleine Verrichtung, große Wirkung

Relevanz und Zielsetzung des Handbuchs 9

Was und für wen? Verwendung des Handbuchs13

Das zirkulierBAR Konsortium 14

2 Der Weg zur Wende

Voraussetzungen für eine erfolgreiche
Sanitär- und Nährstoffwende 17

2.1 Trockentoiletten: akzeptiert oder anrücklich?

Akzeptanz von Trockentoiletten und Recyclingdüngern 18

Gesellschaftliche Akzeptanz ressourcenorientierter Sanitärsysteme 19

Akzeptanz von Recyclingdüngern in der Landwirtschaft 21

Fazit: Große Offenheit für Trockentoiletten und Recyclingdünger
in Landwirtschaft und Gesellschaft 22

2.2 Alles, was Recht ist

Rechtliche Hemmnisse und Lösungswege 24

Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen 26

Märkte durch EU-Recht erweitern 27

Auswahl und Vereinheitlichung eines Abfallschlüssels für Trockentoiletteninhalte	29
(Weiter-)Entwicklung von Produktstandards	30

2.3 Erfolgreiche Innovation

Das Innovationsökosystem Eberswalde	31
Wie ist das Innovationsökosystem Eberswalde entstanden?	31
Welche Erfolgsfaktoren lassen sich aus der Entstehungsgeschichte des Innovationsökosystems in Eberswalde ableiten?	34

2.4 Rollen und Erfolgsfaktoren in Kommunen

Erfahrungen aus dem zirkulierBAR-Netzwerk für beobachtende Kommunen	37
Welche Rollen müssen besetzt werden, um eine nachhaltige Sanitärversorgung in einer Kommune zu realisieren?	37
Welche Akteur:innen besetzen die Rollen des Innovationsökosystems im Landkreis Barnim?	40
Welche institutionellen und individuellen Stärken wurden bei der Systeminnovation im Landkreis Barnim identifiziert und sollten in anderen Kommunen gefördert werden?	42
Welche Gründe haben Kommunen für eine Sanitär- und Nährstoffwende? Was sind die zentralen Entwicklungsstufen und -hemmnisse?	46
Roadmap – Meilensteine einer kommunalen Sanitär- und Nährstoffwende	50
Transfer der Systeminnovation in eine beobachtende Kommune: Wie verläuft der Transfer in der Stadt Köln?	52

2.5 Fachliche Vielfalt

Weitere Akteur:innen der Sanitär- und Nährstoffwende	54
Welche Erfahrungen und Perspektiven sollten bei der Umsetzung der Sanitär- und Nährstoffwende mit einbezogen werden?	54
Welche Probleme, Anforderungen, Potenziale, Hürden und Lösungswege sind für Akteur:innen aus Architektur und Planung entscheidend?	55

2.6 Forschendes Lernen

Wie vermittele ich Wissen und Methoden an Studierende?	59
Was ist „forschendes Lernen“?	59
Wie wurde forschendes Lernen im zirkulierBAR-Projekt umgesetzt?	61
Good Practices – Was hat sich im Seminar besonders bewährt?	63

3

Sanitär- und Nährstoffwende in der Praxis

Von der Sammlung über die Verwertung bis hin zur Düngung .. 69

3.1 Ressourcen aus der Schüssel als Schlüssel?

Trockentrenntoiletten auf dem Prüfstand	70
Welche Umweltwirkungen hat eine Trockentrenntoilette im Vergleich zur Wasserspültoilette?	70
Wie viel Wasser und Energie sparen Trockentrenntoiletten im Vergleich zur Wasserspültoilette?	72
Was sind die institutionellen Fragen und Lösungen zu öffentlichen Trockentrenntoiletten?	73

3.2 Aus „Pfui“ wird „Hui“

Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten	80
Planung der Recyclinganlage	80
Was sind die wichtigsten Planungsschritte vor Errichtung der Anlagen?	80
Betrieb der Recyclinganlage	85
Wie funktionieren die Anlagen? Wo liegen die Herausforderungen und Risiken?	86
Welche peripheren Infrastrukturen sind im Betrieb notwendig oder hilfreich?	94

Was kosten Bau und Betrieb einer Recyclinganlage?	96
Wie viel und welche Düngemittel sind zu erwarten? Wie viel konventionellen Dünger können sie ersetzen?	102
Qualitätssicherung von Recyclingdüngern	104
Auf welche Schadstoffe und Krankheitserreger wird der Recyclingdünger aus Inhalten von Trockentoiletten untersucht?	104
Wo können die Untersuchungen durchgeführt werden?	105
Mit welchen Methoden wird der Kompost untersucht?	107
Wie hoch ist der Nährstoffgehalt des Düngers?	109
Was kostet die Qualitätskontrolle des Recyclingdüngers?	110

3.3 Ab aufs Feld

Den Kreislauf schließen	111
Wie wirken die neuen Recyclingdünger aus Inhalten von Trockentoiletten? ...	111
Warum wollen wir Nährstoffe recyceln?	111
Wie können wir Nährstoffe recyceln?	111
Dürfen Recyclingdünger aus Inhalten aus Trockentoiletten auf dem Feld genutzt werden?	113
Welche Versuche haben wir mit den Recyclingdüngern gemacht und was sind die Ergebnisse?	113

4 Von der Linie zum Kreis

Ausblick in eine zirkuläre Zukunft	125
Literatur	128
Impressum	136



1

Kapitel

Kleine Verrichtung, große Wirkung

Relevanz und Zielsetzung des Handbuchs

9

*Kleine Verrichtung,
große Wirkung*

1

In diesem Handbuch geht es um eine kleine alltägliche Verrichtung mit großer Wirkung. Um eine Innovation, die auf uralten Traditionen beruht und die einen essenziellen Beitrag zur Lösung ökologischer Probleme leisten kann. Und es geht um einen grundlegenden Paradigmenwechsel. Wir wollen Nährstoffe, die zuhauf in menschlichen Ausscheidungen enthalten sind, wieder in den natürlichen Kreislauf zurückführen. Urin und Fäzes werden dafür in Trenntoiletten gesammelt, aufbereitet und hygienisiert. Als Recyclingdünger auf dem Acker liefern sie Nährstoffe, fördern den Bodenaufbau und binden CO₂. Jahrtausendlang nutzten Menschen Ausscheidungen als Dünger und organischen Bodenverbesserer. Mit der Urbanisierung und den damit einhergehenden seuchenhygienischen Problemen verschwanden die traditionellen Recyclingdünger zunehmend aus der Landwirtschaft. Ab Mitte des 19. Jahrhunderts entstanden in den Städten der westlichen Industrieländer aufwändige Kanalisationssysteme. Zusammen mit Wasseranschlüssen in den Häusern waren sie die Grundlage für eine schnelle Verbreitung des Water Closet – des uns bekannten WC. Justus von Liebig, bedeutender Forscher der Pflanzenernährung und Agrochemie, warnte schon im 19. Jahrhundert davor, sich der Fäkalien über die Kanalisation zu entledigen. Durch die Einführung der WCs gelange eine „ganz ungeheuere Menge von Düngstoffen“ in die Flüsse und Meere, und gehe somit für die „Wiedererzeugung von Nahrung [...] unwiederbringlich verloren“. Heute sind Wassertoiletten für uns selbstverständlich. Ja, sie erscheinen uns geradezu alternativlos.

Doch Alternativen werden wir brauchen, denn die wasserbasierte Entsorgung menschlicher Ausscheidungen hat ökologische Nachteile, die immer deutlicher werden. Ein Drittel unseres kostbaren Trinkwassers spülen wir in Deutschland einfach die Toilette hinunter – zusammen mit Rückständen von Medikamenten und Schadstoffen. Bisher gibt es keine wirksamen Verfahren, um sie in den Kläranlagen wieder aus dem Abwasser zu entfernen. Sie gelangen so in Gewässer und Grundwasser und bedrohen die Ökosysteme. Wichtige Pflanzennährstoffe in unseren Ausscheidungen – wie Phosphor und Stickstoff – werden weggeschwemmt und müssen in Kläranlagen mühsam wieder aus dem Abwasser gefiltert werden, sonst düngen wir damit Gewässer statt Äcker.

Auf den Äckern schließlich landet neben Gülle auch jede Menge synthetischer Dünger. Dessen Herstellung verbraucht nicht nur Erdgas, sondern emittiert auch große Mengen an CO₂.

Unsere Lebens- und Wirtschaftsweise überschreitet die Grenzen des Ökosystems Erde massiv. Klimawandel, Ressourcenknappheit und Artensterben sind dramatische Folgen daraus. Sie zeigen, dass wir unsere Art zu leben und zu wirtschaften grundlegend ändern müssen. Die Europäische Union hat beschlossen, diese Transformation mit Maßnahmen wie dem Green New Deal und dem Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft anzugehen. Bis 2050 soll der Übergang zu einer kreislauforientierten, klimaneutralen und wettbewerbsfähigen Wirtschaft in Europa vollzogen sein.

Wie aber kann ein solcher Transformationsprozess gelingen? Wie lassen sich Prinzipien und Denkweisen verändern, die wir lange für selbstverständlich gehalten haben? Und welche Rolle spielen wir selbst dabei?

Ein wichtiges Element in diesem Veränderungsprozess ist die Entwicklung zukunftsfähiger Lösungen. Ideen, die funktionieren und konkrete Vorteile bringen, können sich auch jenseits von politischen Meinungen durchsetzen. Die Wende hin zu einem Nährstoffkreislauf bringt viele Vorteile. Sie trägt dazu bei, die Landwirtschaft mit Recyclingdünger zu versorgen, den Boden zu verbessern, den Abbau und Verbrauch von Erdgas und Rohphosphat zu verringern, im großen Stil Trinkwasser zu sparen und die Belastung der Gewässer mit Nähr- und Schadstoffen zu reduzieren.

Bleibt die Frage, welche konkreten Transformationsschritte nötig sind, damit die Nährstoffwende in Gang kommt. Und wie kann der systemische und interdisziplinäre Ansatz gelingen, der dafür nötig ist?

Dieses Handbuch liefert Antworten dazu. Es bündelt die Erfahrungen und Ergebnisse aus zirkulierBAR, einem dreijährigen Forschungsprojekt, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Programmlinie REGION.innovativ gefördert wurde. Als Praxisleitfaden für die Sanitär- und

Nährstoffwende präsentiert das Handbuch fundierte Forschungsergebnisse, berichtet über die Erfahrungen aus der Praxis und motiviert zur Nachahmung. Herzstück des Projekts zirkulierBAR ist die Recyclinganlage in Eberswalde, ein Reallabor, in dem Urin und Fäzes auf regionaler Ebene gesammelt, hygienisiert und im Sinne der Kreislaufwirtschaft als Recyclingdünger wiederverwertet werden. Untersuchungen im Rahmen der Qualitätssicherung haben gezeigt, dass die produzierten Recyclingdünger gesundheitlich unbedenklich sind und alle Anforderungen an Düngemittel erfüllen. Ihre Wirkung wurde in Feldversuchen untersucht und bewiesen. In einer Umfrage bewerteten Bio-Anbau-Verbände den Einsatz von Recyclingdüngern als positiv. Auch die gesellschaftliche Akzeptanz wurde im Rahmen einer Umfrage ermittelt. Über 50 Prozent der Befragten zeigten sich offen für Trenn toiletten und Recyclingdünger.

Wichtige Umsetzungspartnerinnen für die Sanitärwende sind die Kommunen. Durch Wissenstransfer und Netzwerkarbeit entstand eine Gruppe von bundesweit mehr als 25 Kommunen, die sich für alternative Wege in der Sanitärversorgung interessieren. Parallel wurde erforscht, welche institutionellen Gestaltungsfragen sich in Kommunen hinsichtlich einer öffentlichen, ressourcenorientierten Sanitärversorgung ergeben. Die Entwicklung alternativer Sanitärkonzepte wird derzeit noch durch eine unklare und widersprüchliche Rechtslage behindert. Konkrete Vorschläge für einen angepassten Rechtsrahmen wurden erarbeitet und im Dialog mit Menschen aus Politik, Verbänden und Verwaltung erörtert.

Bis die Sanitär- und Nährstoffwende in die Breite gehen kann, wird sie von engagierten Menschen weiterbewegt werden. Ohne mutige Praxispartner und Kommunen, die Pilotprojekte umsetzen und das Reallabor aufgebaut haben, wäre unsere Arbeit gar nicht möglich gewesen. Wir sind überzeugt, dass die Sanitär- und Nährstoffwende nicht aufzuhalten ist. Mit diesem Handbuch wollen wir zum Aufbruch in die zirkuläre Zukunft ermutigen. Wir wünschen viel Spaß dabei!

Was und für wen?

Verwendung des Handbuchs

Materialien

Einige Artikel im Handbuch enthalten weiterführende Materialien (z. B. Arbeitshilfen, Excel-Tools, weiterführende Artikel). Diese werden in Form eines digitalen Anhangs zur Verfügung gestellt. Auf die Materialien wird in den jeweiligen Artikeln verwiesen. Der digitale Anhang ist auf folgender Internetseite verfügbar: www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch

Zielgruppen

Das Handbuch richtet sich an vier Zielgruppen: kommunale Mitarbeitende, Planende, Landwirt:innen und die Öffentlichkeit. Ein Leitsystem in Form von Icons hilft den Leser:innen, sich innerhalb des Handbuchs zu orientieren. Neben jedem Artikel wird die jeweilige Zielgruppe als Icon ausgewiesen, wenn gleich alle Kapitel für alle Zielgruppen lesenswert sind.



kommunale
Mitarbeitende



Planende



Landwirt:innen



Öffentlichkeit

Das zirkulierBAR-Konsortium Mitwirkende am Handbuch und Projekt

zirkulierBAR ist ein Forschungsprojekt, das nur im Zusammenschluss von fachlich und regional engagierten Partner:innen gelingen konnte. Insgesamt zehn Partner:innen bildeten das zirkulierBAR-Konsortium, darunter Kommunen, Start-ups, Unternehmen, Universitäten und Forschungseinrichtungen. Im Folgenden werden alle Partner:innen und Personen vorgestellt, die an zirkulierBAR mitgewirkt haben.

Organisation	Beschreibung	Mitwirkende
<p>Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e. V.</p> 	<p>Das Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e. V. ist ein Institut der Leibniz-Gemeinschaft. Das IGZ betreibt pflanzenwissenschaftliche Grundlagenforschung mit Blick auf Anwendungsmöglichkeiten bei Gemüse- und Zierpflanzen und bei der Nutzung pflanzlicher Biodiversität. Das IGZ verantwortete in zirkulierBAR die Projektkoordination und den Transfer in die akademische und berufliche Bildung.</p>	<p>Cordula Andrä Lea Drimus Maxie Klein Dr. Ariane Krause Susann Pophal Corinna Schröder Lilly Schuster</p>
<p>Stadt Eberswalde</p> 	<p>Die Kreisstadt Eberswalde ist mit mehr als 40.000 Einwohner:innen die bevölkerungsreichste Stadt im Landkreis Barnim. Trockentoiletten des Projektpartners Finizio sind in Eberswalde im öffentlichen Raum bereits seit 2020 (2019, zwar noch nicht barrierearm, aber der erste "Egon" stand bereits 2019 am Waldfriedhof Eberswalde) im Einsatz. Im Rahmen von zirkulierBAR baute die Stadt Eberswalde in interkommunaler Zusammenarbeit mit dem Landkreis Barnim eine Kontaktstelle für beobachtende Kommunen auf, die den Transfer der Technologie in andere Kommunen verantwortete.</p>	<p>Anna Calmet Silke Leuschner Jacob Renner Severine Wolff</p>
<p>Landkreis Barnim</p> 	<p>Barnim ist ein Landkreis in Brandenburg mit Verwaltungssitz in der Kreisstadt Eberswalde. Im Rahmen von zirkulierBAR baute der Landkreis Barnim in interkommunaler Zusammenarbeit mit der Stadt Eberswalde eine Kontaktstelle für beobachtende Kommunen auf, die den Transfer der Technologie in andere Kommunen verantwortete. Darüber hinaus wurde die Forschungsanlage auf einer kreiseigenen Fläche errichtet.</p>	<p>Dr. Wilhelm Benfer Annika Grebener</p>
<p>Kreiswerke Barnim GmbH</p> 	<p>Die Kreiswerke Barnim sind eine kreiseigene Gesellschaft des Landkreises Barnim mit der Vision „Die Zukunft ist erneuerBAR“. Die verschiedenen Tochtergesellschaften des kommunalen Unternehmensverbundes widmen sich diversen Aufgaben der Daseinsvorsorge im Landkreis Barnim. Innerhalb von zirkulierBAR waren die Kreiswerke Barnim als Bauträgerin und Praxispartnerin an der Errichtung der Forschungsanlage auf ihrem Gelände beteiligt.</p>	<p>Carsten Beneker Tobias Hübner Christian Mehnert Leon Pütz Christian Vahrson</p>
<p>Finizio - Future Sanitation GmbH</p> 	<p>„Nach uns der Humus“ lautet das Motto des Eberswalder Start-Ups, das zirkulierBARs Praxispartner war. Finizio betreibt seit 2019 gemeinsam mit den KWB die erste Pilotanlage zur Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten in Deutschland. Im Rahmen von zirkulierBAR wurde diese um eine Forschungsanlage mit einem Humusregal und einer Urinaufbereitungsanlage ergänzt.</p>	<p>Florian Augustin James Barker Johannes Hölzel Katharina Müller Jolanthe Stelzer</p>

Organisation	Beschreibung	Mitwirkende
<p>Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE)</p> 	<p>An der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde wird Nachhaltigkeit in Lehre, Forschung, Transfer und Verwaltung gelebt und gemeinsam gestaltet. Die Hochschule entwickelt anwendungsorientierte Lösungen für eine zukunftsfähige Verknüpfung von Gesellschaft und Umwelt. Die beiden am Projekt beteiligten Fachbereiche „Nachhaltige Wirtschaft“ sowie „Landschaftsnutzung und Naturschutz“ entwickelten im Projekt das Planspiel komm:loop und forschten an der Düngewirkung von Recyclingdüngern und deren Akzeptanz unter Landwirt:innen.</p>	<p>Jan-Ole Boness Hannah Di Terlizzi Prof. Dr. Roland Hoffmann-Bahnsen Prof. Dr. Jutta Knopf Katja Searles Markus Ulrich (im Unterauftrag)</p>
<p>Technische Universität (TU) Berlin</p> 	<p>Die TU Berlin ist eine traditionsreiche und weltweit anerkannte Berliner Forschungsuniversität und will Wissenschaft und Technik zum Nutzen der Gesellschaft weiterentwickeln. Die Mitglieder der Universität sind dem Prinzip der nachhaltigen Entwicklung verpflichtet. Die TU war an zirkulierBAR mit den beiden Fachgebieten „Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie“ und „Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik“ beteiligt und forschte an agrar- und ressourcenökonomischen Voraussetzungen für eine Sanitär- und Nährstoffwende.</p>	<p>Maja Aßmann Nils Bieschke Kai Feskorn Albrecht Fritze Prof. Dr. Christian von Hirschhausen Elsa Madleen Jung Prof. Dr.-Ing. Vera Susanne Rotter Gero Scheck Sebastian Schürhoff Dr. Greta Sundermann Sijia Tang Anna Lena Willburger</p>
<p>Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI) des Fraunhofer IAO</p> 	<p>Das Fraunhofer Center for Responsible Research and Innovation entwirft nachhaltige Zukunftsszenarien und entwickelt passende Transformationsprozesse und Innovationsstrategien für gesellschaftlich akzeptierte Technologien, Produkte und Geschäftsmodelle. In zirkulierBAR wurde ein Akzeptanzdialog und die Weiterentwicklung des regionalen Innovationsökosystems umgesetzt. Darüber hinaus wurde der gesellschaftspolitische Dialog durch das CeRRI geleitet.</p>	<p>Hannah Bergmann Felix Bickert Dr. Marie Lena Heidingsfelder Theresa Pausch Ulrike Silz</p>
<p>Deutsches Biomasse Forschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ)</p> 	<p>Das DBFZ ist eine Ressortforschungseinrichtung des Bundes (BMEL), die sich in angewandter Forschung mit der energetischen und integrierten stofflichen Nutzung von Biomasse beschäftigt. In zirkulierBAR arbeitete das DBFZ an der Prüfung und Anpassung eines bestehenden Produktstandards, der DINSPEC91421:2020. Darüber hinaus brachte es Empfehlungen zur Anpassung abfallrechtlicher Regelungen hervor (zirkulierBAR Positionspapiere).</p>	<p>Roman Adam Dr. Claudia Kirsten Dr. Jana Mühlenberg Dr. Thomas Zeng</p>
<p>Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) gemeinnützige GmbH</p> 	<p>Das Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH, ist eine unabhängige Forschungseinrichtung in Berlin. Sie erforscht und entwickelt ökologisch, sozial und generativ verträgliche Lösungsstrategien für Wirtschaft und Gesellschaft. In zirkulierBAR verantwortete das ITZ das Erfolgsmonitoring mit einer indikatorbasierten Selbstevaluation.</p>	<p>Dr. Lydia Illge</p>



2

Kapitel

Der Weg zur Wende

Voraussetzungen für eine
erfolgreiche Sanitär- und Nährstoffwende

Der Weg zur Sanitär- und Nährstoffwende wird nicht nur am Planungstisch und auf dem Feld entschieden, sondern auch im Alltag und im Kopf der Menschen. Neben einem funktionierenden ressourcenorientierten Sanitärsystem braucht es die gesellschaftliche Akzeptanz dafür. Neben der Herstellung eines wirksamen Recyclingdüngers braucht es Landwirt:innen, die ihn einsetzen. Dazu kommen noch rechtliche Hemmnisse und Hürden sowie eine Vielzahl praktischer Fragen, die sich bei der Planung und Umsetzung eines solchen Innovationsvorhabens ergeben.

Die nachfolgenden Kapitel illustrieren die wichtigsten Stationen, Herausforderungen, Lösungen und Erfolgsfaktoren auf dem Weg zur Sanitär- und Nährstoffwende.

2.1 Trockentoiletten: akzeptiert, oder anrücklich?

Akzeptanz von Trockentoiletten und Recyclingdüngern

Autor:innen: Hannah Bergmann, Felix Bickert,
Ariane Krause, Theresa Pausch, Katja Searles

Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS) und der daraus gewonnene Dünger lassen sich nur dann erfolgreich etablieren und skalieren, wenn sie von den Menschen auch angenommen werden. Das betrifft sowohl die Nutzenden der Toiletten als auch diejenigen, die den Dünger und die land- bzw. gartenwirtschaftlichen Produkte aus entsprechendem Anbau nutzen. Interessen und Ansprüche der Gesellschaft im Innovationsprozess mit einzubeziehen, ist also essenziell (Rogers, 2003). Nur so lassen sich Vorbehalte, Risiken und Hemmnisse frühzeitig erkennen und die Systeme erfolgreich umsetzen. Bisher gibt es allerdings kaum Untersuchungen dazu, inwieweit



Trockentoiletten und Recyclingdünger in Deutschland akzeptiert sind. Bisherige Studien fokussieren auf Vakuum-Toiletten bzw. Recyclingdünger aus Urin und Abwasser. Ihre Ergebnisse deuten jedoch auf eine hohe Akzeptanz hin (siehe z. B. Ebert et al., 2021; Simha et al., 2021; Utai et al., 2022; Wolf et al., 2023).

Vor diesem Hintergrund wurden im Projekt zirkulierBAR zwei Akzeptanzerhebungen zur zirkulären Nutzung von Inhalten aus Trockentoiletten durchgeführt:

- (1) eine quantitative, bevölkerungsrepräsentative Erhebung vom Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI) des Fraunhofer Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) sowie
- (2) eine qualitativ-explorative Interviewstudie der Hochschule für nachhaltige Entwicklung (HNE) Eberswalde.

Gesellschaftliche Akzeptanz ressourcenorientierter Sanitärsysteme

Im August 2022 erfolgte eine Online-Erhebung mit einer bevölkerungsrepräsentativen Stichprobe von $n = 2046$ Personen. Dabei wurde die Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft von Trockentoiletten bei potenziellen Nutzenden untersucht sowie die Bereitschaft von Konsumierenden, Lebensmittel zu verzehren, die mit Recyclingdüngern aus menschlichen Ausscheidungen gedüngt wurden.

Über die Hälfte (55 Prozent) der befragten Personen bewertet die Nutzung bzw. die Möglichkeit der Nutzung von Trockentoiletten als positiv. Allerdings hat nur ein geringer Anteil der Befragten (26 Prozent) schon einmal eine Trockentoilette genutzt. Davon würde gut die Hälfte (52 Prozent) sie wieder benutzen. Die wenigen Nutzungserfahrungen wurden vor allem in Gärten (30 Prozent), auf Festivals (29 Prozent), im öffentlichen Raum (25 Prozent) und auf Campingplätzen (21 Prozent) gemacht. Die Mehrheit der Befragten (74 Prozent) äußerte schließlich, dass sie sich grundsätzlich mehr Toiletten im öffentlichen Raum wünscht.

Affektive Akzeptanz

Hinsichtlich der zentralen Akzeptanzfaktoren liegt der größte Hebel auf der affektiven, also emotionalen Ebene. Sorgt die Vorstellung von Trockentoiletten für Ekel und Besorgnis (z. B. wegen Hygiene und Geruch), nimmt die Bereitschaft zur Nutzung ab. Bilder und Erzählungen, die positive Aspekte wie Wasserersparnis und Nährstoffrecycling in den Vordergrund stellen, erhöhen die Akzeptanz. Ein weiterer Faktor ist das Problembewusstsein, also das individuelle Wissen über Wasserknappheit, Nährstoffe, Düngemittelherstellung und gesundheitliche Risiken. Ohne entsprechendes Wissen bzw. Bewusstsein sinkt auch die Akzeptanz zur Nutzung von Trockentoiletten. Zusätzlich braucht es Vertrauen darin, dass die öffentlichen und privaten Akteur:innen die Systeme rechtskonform umsetzen, für die notwendige Hygiene sorgen und qualitätsgesicherte Produkte herstellen. Über die Akzeptanz entscheidet nicht zuletzt auch das Kosten-Nutzen-Verhältnis bei Herstellung, Installation und Betrieb von Trockentoiletten im öffentlichen Raum (im Vergleich zu herkömmlichen Wassertoiletten). Gerade hier fehlt aber häufig das entsprechende Wissen zu Kosten und Nutzen.

Geschlechtsspezifische Akzeptanz

Die Studienergebnisse zeigen geschlechterspezifische Unterschiede in der Akzeptanz von Trockentoiletten im öffentlichen Raum. So haben z. B. die befragten Frauen höhere Erwartungen an Hygiene, Geruch und Nutzbarkeit. Aus ihrer Sicht sollte eine Trockentoilette in Nutzung und Aussehen vergleichbar sein mit einer herkömmlichen Toilette. Für Frauen ist es schließlich auch deutlich wichtiger als für Männer, dass die Entleerung der Trockentrenntoilette sowie alle weiteren Schritte nicht in ihrer Verantwortung liegen. Zukünftige Produktentwicklungen sollten daher die spezifischen Bedürfnisse von Frauen berücksichtigen.

Akzeptanz der Lebensmittel

Der zweite Teil der Befragung bezog sich auf die Akzeptanz von Lebensmitteln, die mit Recyclingdüngern gedüngt wurden. Den Ergebnissen nach würden 44 Prozent der Deutschen Gemüse aus entsprechendem Anbau essen. Und obwohl ein generelles Interesse daran bekundet wird, besteht in der Bevölkerung nur ein geringes Wissen über Düngemittelherstellung, Recyclingdünger und Nährstoffrecycling. Fast die Hälfte der Befragten (46 Prozent) weiß grundsätzlich nicht, womit Lebensmittel

gedüngt werden. 55 Prozent gaben an, nicht darauf zu achten, wie die Lebensmittel gedüngt sind, die sie kaufen.

Risikobedenken

Ein weiterer wichtiger Akzeptanzfaktor ist die Unbedenklichkeit des Düngers. 42 Prozent der Befragten sehen in Recyclingdünger kein gesundheitliches Risiko für den Menschen. Dem gegenüber stehen jedoch mehr Personen, die das Risiko entweder nicht einschätzen können oder aber Vorbehalte bzw. Bedenken haben. Aufklärung, Bildung und Wissenstransfer sind somit wichtige Hebel, um in der Gesellschaft das Interesse und die Akzeptanz für ressourcenorientierte Sanitärsysteme zu fördern. Dafür braucht es eine ebenso passgenaue wie ansprechend gestaltete und positive Kommunikation mit den Verbraucher:innen.

Akzeptanz von Recyclingüngern in der Landwirtschaft

Neben den Verbraucher:innen ist natürlich auch die Akzeptanz der landwirtschaftlichen Erzeugenden entscheidend, um die Recycling-Technologien zum Erfolg zu führen. In einer qualitativ-explorativen Studie wurden daher fünf Vertreter:innen von Anbauverbänden befragt, die insgesamt 40 Prozent der Bio-betriebe bzw. 56 Prozent der ökologisch bewirtschafteten Fläche in Deutschland repräsentieren.

Hohe Bereitschaft zum Einsatz von Recyclingdüngern bei Öko-Anbauverbänden

Der Ökolandbau ist grundsätzlich sehr offen für Recyclingdünger aus Inhalten von Trockentoiletten. Recycling ist den Erzeugenden ein vertrautes Grundprinzip. In ihren Verbandsrichtlinien steht es an erster Stelle. Die Herkunft der Ausscheidungen, ob also tierischer oder menschlicher Art, ist für die Erzeugenden nachrangig, solange die Seuchenhygiene in der stofflichen Verwertung berücksichtigt ist. Letztlich sind sie auf einen stetigen Nährstoffrücklauf angewiesen, um betriebsspezifische Nährstofflücken zu schließen. Diese Lücken ergeben sich vorrangig in nährstoffintensiven Produktionssystemen wie dem Gemüsebau, aber auch in viehlosen bzw. viehschwachen Marktfruchtbetrieben¹. Tierische Ausscheidungen sind im Ökolandbau eine wichtige Nährstoffquelle und Ausgangsstoff für bodenverbessernden Kompostdünger.

1) Betriebe, die mehr als 50 Prozent des Betriebs-einkommens durch den Verkauf von Marktfrüchten erzielen.

Der Marktanteil von Biofleisch ist im Vergleich zu pflanzlichen Erzeugnissen allerdings niedrig. Im Jahr 2022 waren nur 3,9 Prozent des in Deutschland verkauften Fleisches biologischer Herkunft (BZL, 2023). Es mangelt also an Nährstoffquellen für die pflanzliche Erzeugung und Bodenverbesserung. Das zeigt sich auch am Markt: Aktuell ist die Nachfrage nach nachhaltigen Nährstoffquellen höher als das Angebot. Das führt nicht zuletzt dazu, dass die Erzeugerverbände für bestimmte Produktionssysteme Kompromisse bei den Qualitätsanforderungen an Düngemittel eingehen. So erlauben sie zum Beispiel den Einsatz aufbereiteter Schlachtabfälle, bei denen die Herkunft der Tiere nicht mehr nachvollziehbar ist. Aus Sicht der Verbände ist es deshalb wichtig, weitere lokale, nachhaltige und sichere Nährstoffquellen zu erschließen.

Voraussetzungen für den Einsatz von Recyclingdünger

Grundvoraussetzung für den landwirtschaftlichen Einsatz von Recyclingdünger ist die rechtliche Zulassung sowie die Zulassung über die EU-Ökoverordnung. Aus Sicht der befragten Anbauverbände hängt die Akzeptanz von Recyclingdünger dann vor allem vom Kosten-Nutzen-Verhältnis ab. Die Kosten für die Erzeugenden setzen sich zusammen aus dem Erwerb des Düngers, dem Transport zum Betrieb sowie der Ausbringung (was jeweils die Maschinen- und Treibstoffkosten beinhaltet). Der Nutzen ergibt sich aus der Düngewirkung (also der Nährstoffverfügbarkeit), der organischen Masse zum Bodenaufbau und der lokalen Verfügbarkeit. Insgesamt, so die Befragten, sollten sich die neuartigen Düngemittel in bestehende Betriebspraktiken integrieren lassen. Das gilt sowohl für den Technikeinsatz als auch mit Blick auf die im Ökolandbau geltenden Regelwerke (z. B. Betriebsmittelliste). Ein Verband betonte, dass die Akzeptanz aufseiten der Verbraucher:innen eine zentrale Voraussetzung für den Einsatz des Recyclingdüngers sei. Nach Einschätzung der Verbandsvertreter:innen braucht es für die Markteinführung von Recyclingdünger eine Kommunikationsstrategie, die alle Stakeholder umfasst: Erzeugende, Verbände und Konsumierende.

Fazit: Große Offenheit für Trockentoiletten und Recyclingdünger in Landwirtschaft und Gesellschaft

Die Einbeziehung verschiedener Interessensgruppen ist ein wesentlicher Schritt im Innovationsprozess recyclingorientierter

Sanitärsysteme. Sie ist maßgeblich für deren Erfolg. Die Ergebnisse der Befragungen bestätigen eine bereits hohe Akzeptanz sowohl in der Gesellschaft als auch bei den ökologischen Anbauverbänden. Nachfolgend die zentralen Akzeptanzfaktoren, die sich aus den beiden Befragungen ergeben. Sie sollten bei der weiteren Entwicklung und Umsetzung von Trockentrenntoiletten sowie dem Einsatz von Recyclingdüngern berücksichtigt werden.

- **Affekt:** Gefühle (z. B. Interesse, Ekel) sind entscheidend für die Bereitschaft, Trockentoiletten zu nutzen. In diesem Zusammenhang können neue, ansprechende Bilder und ein verbessertes Nutzungserlebnis förderlich sein.
- **Problembewusstsein:** Wissen zu Wasserknappheit, Nährstoffen, Düngemittelherstellung und gesundheitlichen Risiken ist in der Bevölkerung bisher nicht weit verbreitet, wirkt aber akzeptanzfördernd.
- **Gesetzliche Klarheit:** Der rechtskonforme Einsatz der Dünger sowie Vertrauen in die ausführenden Akteur:innen (privat und staatlich) sind eine wichtige Grundvoraussetzung.
- **Kosten-Nutzen-Verhältnis:** Recyclingdünger und Trockentoiletten sollten im Kosten-Nutzen-Verhältnis vergleichbar mit handelsüblichen Lösungen sein. Eine Preisstütze ist besonders in der frühen Technologieentwicklungsphase wichtig.
- **Qualitätsstandards und Produktsicherheit:** Um die Qualität und gesundheitliche Unbedenklichkeit von Recyclingdünger sicherzustellen, braucht es einheitliche Produktstandards. Angewendet werden sollte die bereits vorhandene DIN SPEC 91421 (vgl. DIN, 2023).
- **Regionalität:** Da der Transport des Düngers für die Erzeugenden einen Kostenfaktor darstellt, sind dezentrale Verwertungsstrukturen sinnvoll.

Aus den Befragungen wird deutlich: Eine höhere Akzeptanz in Landwirtschaft und Gesellschaft kann die Entwicklung und Durchsetzung ressourcenorientierter Sanitärsysteme maßgeblich beschleunigen und den Weg zur Sanitär- und Nährstoffwende ebnen.

2.2

Alles, was Recht ist

Rechtliche Hemmnisse und Lösungswege

Autor:innen: Roman Adam, Claudia Kirsten

Am Markt gibt es effiziente Aufbereitungstechnologien, die Schadstoffe aus Trockentrenntoiletteninhalten (TTI) gezielt abtrennen und so den Reststoff zu einem verwertbaren Düngemittel machen. Zu den Technologien für separat erfasste Feststoffe (Fäzes) zählen die Hygienisierung und stabilisierende Humifizierung. Infolge eines besonders hoch temperierten, aeroben Behandlungsverfahrens werden pathogene Keime unschädlich gemacht, wodurch ein hochwertiger Kompost entsteht. Die Flüssigphase der Trockentrenntoilette (also der Urin) lässt sich mittels Nitrifikation und Aktivkohleadsorption (Abtrennung nahezu aller Spurenstoffe wie Arzneimittel, Drogen und Hormone) zu marktfähigen, flüssigen Recyclingdüngern aufarbeiten. In Österreich konnte ein solches Produkt bereits etabliert werden (Eawag, 2024). In Deutschland verhindern es die rechtlichen Rahmenbedingungen, einen solchen Recyclingdünger in den Verkehr zu bringen. Es fehlt an der Standardisierung und zugehörigen Zertifizierung des Recyclingdüngers sowie an der Anpassung des rechtlichen Rahmens. Das alles wirkt als direktes Hemmnis in folgenden Bereichen:

Fehlender Verwertungsweg im Kreislauf-, Abfall- und Düngerecht

Die Bioabfallverordnung (BioAbfV, 2022) als Teil des Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, 2023) regelt die Anforderungen an die Verwertung von Bioabfällen, die nicht mit dem Abwasser gesammelt werden. Hier bedarf es einer Anpassung der BioAbfV auf Bundesebene. Konkret könnten getrennt von Abwasser gesammelter Urin und Fäzes in die Begriffsdefinition des Bioabfalls in § 2 Nr. 1 der BioAbfV aufgenommen werden. Das würde einen ordnungsgemäßen Verwertungspfad eröffnen. Hierbei ist den Voraussetzungen der Ordnungsmäßigkeit und Schadlosigkeit Rechnung zu tragen. Eine ordnungsgemäße



Verwertung beinhaltet einen legalen Weg des Inverkehrbringens. Für den Recyclingdünger wäre eine Berücksichtigung in der Düngemittelverordnung (DüMV, 2019) erforderlich. Das könnte ebenfalls auf Bundesebene geregelt werden. Konkret könnten Urin und Fäzes in Tabelle 7 der Anlage 2 der deutschen DüMV als „Ausgangsstoff“ für die Düngemittelherstellung aufgenommen werden.

Inverkehrbringen von Recyclingdüngerprodukten mittels EU-Recht

Nicht nur über das nationale Düngerecht, sondern auch auf EU-Ebene existiert eine Möglichkeit des Inverkehrbringens von Düngemitteln. Gegenwärtig ist zwar das Inverkehrbringen von Recyclingdüngern aus TTI über die *Fertilizing Products Regulation* (EU) 2019/1009 (EU-Verordnung 2019/1009) nicht möglich. Diese EU-Verordnung steht aber unter einem ständigen Entwicklungsprozess, weshalb Erweiterungen das zukünftig ändern könnten. Darüber hinaus könnten Herstellende von Recyclingdüngern, die in einem anderen Mitgliedstaat der EU bereits eine Zulassung für Recyclingdüngerprodukte erhalten haben, auf Basis der „Erklärung zur gegenseitigen Anerkennung“ gemäß Verordnung (EU) 2019/515 (EU-Verordnung 2019/515) eine Produktanerkennung erhalten. Diese Anerkennung durch eine deutsche Düngemittelverkehrskontrolle wäre dann aber auf das konkrete Produkt beschränkt.

Erleichterte Sammlung und Behandlung von Trockentoiletteninhalten

Die Vereinheitlichung der Abfallschlüsselnummer würde den Umgang mit Inhalten von Trockentrenntoiletten operativ vereinfachen. Hierfür wurden die gängigen Abfallschlüsselnummern für TTI im Netzwerk für nachhaltige Sanitärsysteme (NetSan) abgefragt und bewertet. Im Fazit empfiehlt das zirkulierBAR-Konsortium den Entsorgenden bzw. deren Träger:innen die temporäre Verwendung des Abfallschlüssels 20 03 99 „Siedlungsabfälle a. n. g.“.

Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen²

Ausgangslage

Ressourcen wiederverwerten, anstatt sie wegzuspülen – das geht mit einem Sanitärsystem auf Basis von Trocken- oder Trenn-toiletten. Moderne Aufbereitungstechniken ermöglichen es, getrennt und wasserlos gesammelte Toiletteninhalte zu erfassen und effizient zu Recyclingdünger für die landwirtschaftliche Nutzung aufzubereiten. Gegenüber der herkömmlichen Entsorgung auf dem Abwasserweg birgt dieses ressourcenorientierte System zentrale Vorteile:

- es spart Trinkwasser
- es reduziert Schadstoffe
- es erhöht die Recyclingquote
- es erhöht die Ressourceneffizienz

Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (auch ROSS oder ROS genannt) sind bereits in Parks, Gärten, Häusern und ganzen Quartieren weltweit im Einsatz. Reallabore erforschen, entwickeln und erproben die Herstellung verschiedener Recyclingdünger.

Hindernis

Warum wird das erwiesene und erprobte Potenzial von Recyclingdünger in Deutschland noch nicht genutzt? Ganz einfach: Weil es die rechtlichen Rahmenbedingungen momentan nicht zulassen. Unvollständige oder widersprüchliche Definitionen und Einordnungen verhindern, dass Recyclingdünger in Deutschland ordnungsgemäß produziert und wirtschaftlich genutzt werden kann.

Handlungsempfehlungen

Die rechtlichen Rahmenbedingungen könnten geklärt werden, indem menschlicher Urin und Fäzes in die Begriffsdefinition des Bioabfalls in § 2 Nr. 1 der BioAbfV aufgenommen werden. Dadurch könnten Urin und Fäzes auch in Tabelle 7 der Anlage 2 der deutschen Düngemittelverordnung (*DüMV*, 2019) als

2) www.zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/positionspapier-1/

„Ausgangsstoff“ für die Düngemittelherstellung aufgenommen werden, etwa in Kategorie 7.4.4 als „organische Abfälle“. Alternativ könnte in der DüMV eine zusätzliche Kategorie erfasst werden, die Urin und Fäzes aus Trenntoiletten einschließt. Die neue Kategorie könnte mit Auflagen zur Hygienisierung (wie zum Beispiel der Warmbehandlung) eingeschränkt werden und eine Qualitätssicherung nach DIN SPEC 91421 (*Deutsches Institut für Normung, 2020*) fordern oder auf die gewerbliche Nutzung beschränkt werden. Auf kommunaler Ebene bedarf es zudem eines Wahlrechts zwischen dem Abwasser- und dem Abfallpfad anstelle der existierenden Anschlusspflicht an den Wasserpfad. Das würde den lokal begrenzten Einsatz von Trockentoiletten aufheben und wirtschaftliche Absatzmöglichkeiten schaffen, die wiederum als Motor der Weiterentwicklung dienen können. Die einheitliche Hygienisierung und Güte der Recyclingdünger könnte durch die im Produktstandard DIN SPEC 91421 verankerte Qualitätssicherung belegt werden oder durch eine daraus weiterentwickelte DIN bzw. DIN-EN-Norm.

Märkte durch EU-Recht erweitern³

Ausgangslage

Recyclingdünger sind ein wichtiger Baustein des Aktionsplans für Kreislaufwirtschaft der EU-Kommission (COM) 2020/98, um eine kreislauforientierte, klimaneutrale und wettbewerbsfähige Wirtschaft zu etablieren. Unterschiedliche Ausprägungen des Düngerechts in einzelnen Ländern hemmen jedoch die Entwicklung und verhindern die Vermarktung neuartiger Recyclingdünger. Das EU-Recht lässt sich aber nutzen, um neue Recyclingdünger legal auf den Markt zu bringen und so Ressourcen zu schonen.

Lösungsweg

Eine der vier Grundfreiheiten der Europäischen Union ist der freie Warenverkehr. Für den Fall, dass ein noch nicht harmonisierter nationaler Rechtsrahmen ihn hemmt oder verhindert, gibt es ein formales Werkzeug, den Warenverkehr doch zu ermöglichen: das Verfahren der gegenseitigen Anerkennung.

Herstellende von Recyclingdüngern könnten die „Erklärung zur gegenseitigen Anerkennung“ gemäß Verordnung (EU) 2019/515

3) www.zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/positionspapier-2/

zur Produktanerkennung nutzen. Das erfordert, dass sie bereits eine Zulassung für ein Recyclingdüngerprodukt in einem anderen EU-Mitgliedsstaat haben. Die Hersteller:innen könnten die Produktanerkennung dann einsetzen, um auch in Deutschland Marktzugang zu erhalten. Voraussetzung ist das „rechtmäßige Inverkehrbringen“ eines Düngers im erstzulassenden EU-Mitgliedstaat. Dies gilt unter zwei Bedingungen als erfüllt:

- (1) Waren müssen im erstzulassenden Mitgliedstaat („Basisstaat“) für Endnutzende bereitgestellt werden und
- (2.a) entweder den im Ursprungsstaat geltenden einschlägigen technischen Vorschriften entsprechen (Art. 3 Nr. 1, 1. Alt.)
- (2.b) oder keiner nationalen technischen Vorschrift unterliegen (Art. 3 Nr. 1, 2. Alt.).

Handlungsempfehlungen

Herstellende von Recyclingdünger könnten versuchen, das Verfahren der gegenseitigen Anerkennung in Anspruch zu nehmen, um Marktzugang in Deutschland zu erhalten. Das Düngerecht wird in Deutschland ohnehin gerade überarbeitet. In diesem Zuge wäre es ebenso ressourcenschonend wie zielführend,

- auch die Düngemittelverordnung (DüMV) zu novellieren,
- die Positivliste der DüMV direkt um getrennt erfassten Urin und Kot zu erweitern und
- ein leichtes und transparentes Verfahren zur Erweiterung der Positivliste zu schaffen.

So ließe sich mit einfachen Mitteln ein wichtiger Beitrag dazu leisten, Deutschlands Wirtschaft kreislauforientiert, klimaneutral und – auch in Zukunft – wettbewerbsfähig zu machen.

Auswahl und Vereinheitlichung eines Abfallschlüssels für Trockentoiletteninhalte⁴

Ausgangslage

Es ist wichtig, eine Orientierung und Vereinheitlichung im Abfallumgang zu schaffen, wo Trocken- und Trenntoiletten bereits überall im Einsatz sind. Denn aktuell ordnen unterschiedliche Entsorgende (bzw. deren Träger:innen) den Inhalten von Trockentoiletten unterschiedliche Abfallschlüsselnummern zu.

Lösungsweg

Ausgehend von den Ergebnissen einer Umfrage unter Praktiker:innen sowie den Erfahrungen aus dem zirkulierBAR-Reallabor in Eberswalde listet das vom Konsortium entwickelte 3. Positionspapier praxisübliche Abfallschlüsselnummern auf und prüft deren Sachmäßigkeit. Das Ergebnis: Abfallschlüsselnummern mit Bezug zur Abwasserentsorgung oder zur Land- und Forstwirtschaft sowie Nahrungsmittelproduktion sind unsachgemäß.

Handlungsempfehlungen

Das zirkulierBAR-Konsortium empfiehlt Entsorgenden und deren Träger:innen, den Abfallschlüssel 20 03 99 "Siedlungsabfälle a. n. g." zu verwenden. Um den Aufbau ressourcenorientierter, zirkulärer Wertschöpfung im Sinne der Kreislaufwirtschafts- und Reallabor-Strategien der Bundesregierung zu beschleunigen, empfiehlt das Konsortium auch die Abstimmung und Schaffung eines bundeseinheitlichen Abfallschlüssels für Trockentoiletteninhalte. In diesem Rahmen ließen sich auf Basis der Abfallherkunft aus Hotspot- und Nicht-Hotspotregionen auch zwei Gefährlichkeitsstufen unterscheiden. Trockentoiletteninhalte aus Hotspotregionen sollten dabei entweder nicht gesammelt oder gesondert gesammelt, behandelt und entsorgt werden. Mit dieser Maßnahme könnten Gesetzgebende auch den Erregereintrag aus bekannten Hotspotregionen in die herkömmliche zentrale Abwasserentsorgung stark reduzieren oder sogar komplett unterbinden.

4) www.zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/positionspapier-3/

(Weiter-)Entwicklung von Produktstandards

Autor:innen: Claudia Kirsten, Jana Mühlenberg

Für die Erzeugung eines qualitätsgesicherten Recyclingdüngers aus Fäzes und Urin zur Nutzung als Düngemittel im Gartenbau legt die DIN SPEC 91421 (Deutsches Institut für Normung, 2020) Anforderungen an die Qualität fest⁵. Solange die Gesetzgebung ihre Anwendung nicht vorschreibt, sind Normen zwar freiwillig, doch lassen sich Produkte und Verfahren leichter auf den Markt bringen, wenn sie berücksichtigt werden. Die DIN SPEC orientiert sich an der bestehenden Gesetzgebung für andere Recyclingressourcen wie Bioabfall, Klärschlamm oder Gülle. In Anlehnung an die DüMV wurden Qualitätskriterien für insgesamt vier Kategorien definiert: (1) Seuchenhygiene bzw. Infektionsschutz, (2) Phytohygiene, (3) Schadstoffarmut und (4) gartenbauliche Eignung. Neben Standardparametern, Mindestgehalten für Nährstoffe, Grenzwerten für Fremd- und Schadstoffe sowie Hygieneparametern konnten nicht für alle Stoffgruppen im geltenden Recht Grenzwerte identifiziert werden. Dies gilt es im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen zu eruieren. Für die Bestimmung der verschiedenen Qualitätsparameter sind im normativen Anhang A der DIN SPEC 91421 neben den Grenzwerten und Mindestgehalten auch die anzuwendenden Analysemethoden angegeben. Die Qualitätssicherung beginnt bereits bei der Probenahme, welche im Anhang B beschrieben ist.

Mit dem Ziel Daten zu generieren, wird die DIN SPEC 91421 seit 2020 in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (P2Green, 2024; zirkulierBAR, 2024) angewendet. Neben der Überprüfung von Grenzwerten lassen sich dadurch auch Methoden zur Qualitätssicherung testen und weiterentwickeln. Änderungs- und Anpassungsvorschläge aus der Praxis können direkt in die DIN SPEC einfließen oder Grundlage für die Erarbeitung einer DIN sein. Vor diesem Hintergrund hat der DIN-Ausschuss „NA 051 BR-05 SO ‚Autarke Sanitäranlagen‘“ (aus dem die DIN SPEC 91421 hervorgegangen ist) im Jahr 2023 zunächst die einmalige Verlängerung der DIN SPEC um weitere fünf Jahre beantragt. Ab Mitte 2024 wird sich der Ausschuss mit der Grundlage für die Überführung in eine DIN bzw. eine CEN, also eine Norm auf europäischer Ebene befassen⁶.

5) Für mehr Infos zur DIN SPEC 91421 siehe auch: www.naehrstoffwende.org/das-din-spec-projekt/

6) Erfahrungen aus der Anwendung der DIN SPEC in zirkulierBAR sowie gesammelte Argumente, Abwägungen und Erkenntnisse aus dem Fachaustausch mit anderen Wissenschaftler:innen, Laboren und Behörden werden von zirkulierBAR noch aufgearbeitet, gebündelt und als Anhang zum Handbuch veröffentlicht (www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch/). Die Erfahrungen aus dem Projekt richten sich als Empfehlungen an die Gremien-Mitarbeitenden bei DIN und CEN und können bei der Weiterentwicklung und Anpassung der DIN SPEC beachtet werden.

2.3

Erfolgreiche Innovation

Das Innovationsökosystem Eberswalde

Autor:innen: Hannah Bergmann, Felix Bickert, Ariane Krause, Theresa Pausch



Wie ist das Innovationsökosystem Eberswalde entstanden?

In der Diskussion um Ressourcenknappheit und Wassermangel wird deutlich, dass umfassende Nachhaltigkeitstransformationen vor allem in Zusammenarbeit verschiedener Akteur:innen und Institutionen umgesetzt werden müssen. Das Konzept des Innovationsökosystems beschreibt ein solches kollaboratives Zusammenarbeiten von Organisationen und Akteur:innen (Granstrand & Holgersson, 2019). Darin werden typischerweise Informationen, Ressourcen, Aktivitäten und Fähigkeiten geteilt und verbunden, um eine gemeinsame Innovationsleistung zu schaffen (Bryson et al., 2006).

In Eberswalde im Landkreis Barnim wird seit 2019 an einem solchen Innovationsökosystem gearbeitet. Es dient der Umsetzung der kreislauforientierten Sanitär- und Nährstoffwende. In sektorübergreifender Zusammenarbeit entwickeln Akteur:innen aus Wissenschaft, Verwaltung, Landwirtschaft, Wasserwirtschaft und der Start-up-Szene ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS) sowie innovative Aufbereitungstechnologien für Recyclingdünger aus menschlichen Fäkalien. Rund um die Eberswalder Recyclinganlage entstehen zukunftsweisende Ideen und Innovationen im Bereich der zirkulären Sanitär- und Nährstoffversorgung.

Die Entstehungsphase war geprägt von rechtlichen Hürden und einer erfolgreichen Standortwahl

Die Anfänge des Innovationsökosystems in Barnim lassen sich zurückführen auf eine Zusammenarbeit zwischen dem Gründer der Finizio Future Sanitation GmbH (Finizio) und den Geschäftsführern der beiden kommunalen Unternehmen Barnimer Energiegesellschaft (BEG) und Kreiswerke Barnim (KWB).

Der Gründer von Finizio, Florian Augustin, der sich schon seit 2012 intensiv mit der Entwicklung von ROSS und insbesondere der Wertschöpfung und Veredelung menschlicher Ausscheidungen beschäftigt, leistete hierfür wichtige Vorarbeiten. Bereits 2016 versuchte er in Süddeutschland eine Verwertungsanlage für Inhalte aus Trockentrenntoiletten aufzubauen. Mit seinem Vorhaben stieß er jedoch schon bald auf bürokratische Hürden. Das angestrebte Pilotprojekt scheiterte letztlich auf Landesebene. Schnell war klar, dass die existierenden rechtlichen Rahmenbedingungen in Form der Düngemittelverordnung dem Vorhaben im Weg stehen. Es brauchte Sonder- und Ausnahmeregelungen, um die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten voranzutreiben.

Die Kreisstadt Eberswalde im Norden Brandenburgs bot deutlich bessere Ausgangsbedingungen. Hier gab es bereits einen regionalen Fokus auf Nachhaltigkeit, welcher sich unter anderem in der seit 2008 verfolgten Null-Emissionsstrategie des Landkreises Barnim und dem seit 2013 geltenden Klimaschutzkonzept der Stadt Eberswalde widerspiegelt. Mit dem Ziel, eine Energiewende anzutreiben, zeigten auch die beiden kommunalen Unternehmen BEG und KWB großes Interesse daran, eine Recyclinganlage aufzubauen. Damit waren nicht nur zwei zentrale Treiber gefunden, sondern konnten auch weitere Kontakte zur Stadt und zum Landkreis vermittelt werden. Das Interesse war geweckt. Durch den regionalen Nachhaltigkeitsfokus sowie die gute Vernetzung vor Ort waren ideale Voraussetzungen für eine Kollaboration geschaffen. Der Zugang zu und persönliche Austausch mit den wichtigen Ansprechpartner:innen vor Ort bildete vor dem Hintergrund der gemeinsamen Mission die Basis einer guten Zusammenarbeit.

Aus dem anfänglichen Interesse erwuchs das konkrete Projektvorhaben: Auf dem Recyclinghof der KWB (am Stadtrand von Eberswalde) sollte eine Pilotanlage zur recyclingorientierten Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten entstehen. Gemeinsam mit der KWB konnte Finizio bei der Stadt die offizielle Genehmigung für die Anlage einholen. Im Mai 2019 gab auch das Landesamt für Umwelt dem Antrag auf Sondergenehmigung der Pilotanlage statt. Die einstige Zukunftsvision nahm immer mehr Gestalt an.

Auch die Netzwerkarbeit zeigte erste Erfolge und das Ökosystem wuchs: Die Stadt Eberswalde interessierte sich selbst für die

Nutzung von Trockentoiletten und beauftragte Finizio mit der Errichtung öffentlicher Toilettenanlagen. Dadurch erhielt Finizio vom Bauhof der Stadt Eberswalde eine finanzielle Unterstützung, womit gleich mehrere städtische Organisationen zur direkten Nutzerin bzw. Betreiberin der Innovation wurden. Durch den Austausch mit Bürger:innen floss auch die Perspektive der potenziellen Nutzenden in die Entwicklung mit ein. Wieder spielten die örtliche Nähe, das gefestigte Beziehungsnetzwerk zwischen den Akteur:innen und der gemeinsame, sektorübergreifende Wille zur Umsetzung eine entscheidende Rolle.

Das Innovationsökosystem erweiterte sich über die regionalen Erfolge hinaus im gesamten deutschsprachigen Raum und die Aktivitäten wurden in einem gemeinsamen Verband gebündelt. Zum Welttoilettag 2018 gründete sich in Berlin das Netzwerk für nachhaltige Sanitärsysteme e. V. (NetSan), in dem sich seitdem Akteur:innen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft für die Sanitär- und Nährstoffwende engagieren. Insbesondere das Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) und die Trockentoilettenanbieter Finizio und Goldeimer setzen sich dabei in einer gemeinsamen Arbeitsgruppe mit der Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten auseinander. Bereits 2018 bewarben sie sich erfolgreich bei der DIN Connect⁷ für eine Innovationsförderung zur Erarbeitung einer „Norm light“ – eines Produktstandards (DIN SPEC) zur Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau. Die entsprechende DIN SPEC wurde Ende 2020 unter der Nummer 91421 veröffentlicht (DIN Media, 2020).

zirkulierBAR formierte sich und forschte an der Umsetzung einer Sanitär- und Nährstoffwende

Der nächste große Meilenstein war der Start des Wissenschaftskonsortiums zirkulierBAR im Jahr 2021 mit dem Leibniz IGZ als Projektkoordination sowie zehn weiteren Konsortialpartner:innen. Die beteiligten Akteur:innen erarbeiteten gemeinsam ein überregionales Leuchtturm-Forschungsprojekt für ressourcenorientierte Sanitärsysteme bzw. die kreislauforientierte Nutzung von Inhalten aus Trockentoiletten. Ihre gemeinsame Vision: Nährstoffe aus verzehrten Lebensmitteln zurückgewinnen und wieder der Landwirtschaft zuführen. Das interdisziplinäre Forschungskonsortium wurde so zusammengestellt, dass das gesamte Spektrum an Fragestellungen für die Verbreitung von

7) DIN-Connect, ein Förderprogramm von DIN und DKE, unterstützt innovative Projektideen mit Potenzial für Normung und Standardisierung und richtet sich an Start-ups und KMU.

Trockentoiletten sowie die Anpassung des Rechtsrahmens in Bezug auf Recyclingdünger bearbeitet werden konnte. Dementsprechend wurde und wird im Rahmen des Projekts der gesamte Kreislauf von ROSS beforscht: von der Sammlung der Ressourcen in Trockentoiletten (inklusive Betrieb, Wartung und Reinigung) über Transport und Logistik der gesammelten Inhalte, deren Behandlung bzw. Verwertung bis hin zur Vermarktung bzw. zum Inverkehrbringen der Dünger sowie deren Einsatz in der Landwirtschaft (siehe Abbildung Key Visual auf den Seiten 2 und 3).

Die breite Aufstellung von Akteur:innen mit verschiedenen Expertisen ist von zentraler Bedeutung für den umfassenden Ausbau des Innovationsökosystems. In insgesamt vier Teilvorhaben werden technische Voraussetzungen für die breite Anwendung der Innovation erarbeitet und weiterentwickelt sowie agrар- und ressourcenökonomische Voraussetzungen für den praktischen Einsatz. Erforscht werden darüber hinaus auch Voraussetzungen für Akzeptanz und Kollaboration im Innovationsökosystem und Transferaktivitäten in gesellschaftlichen Zielgruppen.

Ressourcenorientierte Sanitärsysteme sollen so unter Berücksichtigung der verschiedenen Voraussetzungen bei Sammlung, Verwertung und Nutzung in die Alltagspraxis überführt und skaliert werden.

Welche Erfolgsfaktoren lassen sich aus der Entstehungsgeschichte des Innovationsökosystems in Eberswalde ableiten?

Basierend auf einer im Jahr 2022 durchgeführten Interviewstudie sowie einer ergänzenden Literaturrecherche lassen sich folgende förderliche Faktoren aus der Entstehungsgeschichte des Innovationsökosystems in Eberswalde ableiten:

- **Missionsorientierung:** Ein geteiltes Problembewusstsein und eine gemeinsame Werteorientierung im Hinblick auf die Umsetzung einer Sanitär- und Nährstoffwende steigern die

Innovationsbereitschaft und Offenheit für Veränderung. In Eberswalde bildet das gemeinsame Bewusstsein für Ressourcenschonung sowie der Fokus auf nachhaltige und kreislauforientierte Lösungen die Basis für das Innovationsökosystem.

- **Zusammenarbeit:** Auf Grundlage einer gemeinsamen Mission entsteht eine enge Zusammenarbeit von Akteur:innen. Wie das Beispiel Eberswalde zeigt, wirken eine für alle Seiten verständliche Kommunikation, gegenseitiges Vertrauen, örtliche Nähe sowie persönlicher Kontakt begünstigend und fördern die Zusammenarbeit. Zusätzlich erwies sich die Geschäftsform GmbH der Kreiswerke als förderlich für die Innovationsentwicklung. Als zu 100 Prozent kreiseigene Gesellschaft verfolgt die KWB das Ziel, die Entwicklung von Innovationen für erneuerbare Energien sowie die Kreislaufwirtschaft in der Region mitzugestalten und gemeinsam mit Kommunen Maßnahmen zur Etablierung umzusetzen⁸. Die KWB kann in diesem Zusammenhang als Wirtschaftsakteurin wesentlich agiler auftreten, wobei die entwickelten Innovationen in öffentlicher Hand verbleiben.
- **Vernetzung:** Der Aufbau eines umfassenden Netzwerks ermöglicht es, Expertisen zu bündeln, Unterstützende zu gewinnen sowie die Sichtbarkeit und Bekanntheit zu steigern. In Eberswalde gab es ein bereits gut ausgebildetes Innovationsökosystem, in dem Akteur:innen aus Stadt, Kreiswerken, Landkreis und Gemeinden rund um die Hochschule vernetzt sind. Schlüsselpersonen wie der Geschäftsführer der KWB und die Projektkoordinatorin des Forschungsprojekts zirkulierBAR am Leibniz IGZ, die über ein weitreichendes persönliches Netzwerk verfügen, fungieren darüber hinaus als Treibende.
- **Ressourcen:** An der Ermittlung und langfristigen Sicherung der für das Innovationsvorhaben benötigten Ressourcen waren unterschiedliche Akteur:innen beteiligt. Zu den Ressourcen für die Recyclinganlage gehörten beispielsweise Personal in der Stadtverwaltung, wissenschaftliche Begleitung sowie finanzielle Mittel und Arbeitsflächen.

8) www.kreiswerke-barnim.de/wir/unsere-unternehmen

Parallel: Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen: Die rechtlichen Blockaden ließen sich durch Sondergenehmigungen umgehen. Langfristig braucht es jedoch eine Zulassung, Zertifizierung und Anpassung der Gesetzgebung. Dass eine Novellierung des Rechtsrahmens notwendig ist, wurde im Kontext der Recyclinganlage auch durch die Bündelung der unterschiedlichen Interessen deutlich. Auch die im Forschungsprojekt zirkulierBAR veröffentlichten Positionspapiere geben einen Anstoß für rechtliche Anpassungen (z. B. Adam et al., 2023).

Missionsorientierung



Probleme und Anforderungen erkennen, Mission definieren

Zusammenarbeit



Kollaboration mit Politik und Verwaltung sicherstellen

Vernetzung



Akteur:innen mit gemeinsamer Mission ansprechen und versammeln

Ressourcen



Ressourcen sicherstellen und Fürsprecher:innen gewinnen



Abbildung 1

Förderliche Faktoren für erfolgreiche Innovationsnetzwerke

Fazit und Ausblick: Strategische Innovationsökosysteme in der Region aufbauen, breit aufstellen und die Partner:innenwahl nicht dem Zufall überlassen

Das Innovationsökosystem rund um die Recyclinganlage in Eberswalde zeigt, dass es viele unterschiedliche Akteur:innen braucht, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Innovative Ideen in der Kreislaufwirtschaft umsetzen zu wollen, bedarf einer breiten, transdisziplinären und gebündelten Expertise. In Eberswalde waren und sind es u. a. Akteur:innen aus Wissenschaft, Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Architektur, Start-up-Szene und Politik, die zum Erfolg beitragen. Eine Mission wie die Umsetzung der Sanitär- und Nährstoffwende gelingt nur in Kooperation.

2.4 Rollen und Erfolgsfaktoren in Kommunen



Erfahrungen aus dem zirkulierBAR Netzwerk für beobachtende Kommunen

Welche Rollen müssen besetzt werden, um eine nachhaltige Sanitärversorgung in einer Kommune zu realisieren?

Autorinnen: Anastasia Bondar, Anna Calmet, Annika Grebener

Um eine nachhaltige Sanitärversorgung in einer Kommune realisieren zu können, gilt es zunächst, bestimmte Rollen zu besetzen. Anhand der Entwicklungen in den Städten Eberswalde und Köln konnten acht zentrale Rollen identifiziert werden. Sie werden nachfolgend mit ihren jeweiligen Funktionen beschrieben. Eine Rolle kann von mehreren Akteur:innen übernommen werden und eine Akteur:in kann auch mehrere Rollen gleichzeitig einnehmen. Die Beschreibung des Innovationsökosystems mit den darin auftretenden Rollen sind inspiriert vom [Innovation Ecosystem Strategie Tool](#) des Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI) des Fraunhofer IAO.



Projektinitiator:in

- hat Interesse und Motivation, eine nachhaltige Sanitärversorgung umzusetzen
- identifiziert, motiviert und mobilisiert Akteur:innen zur Umsetzung des Vorhabens
- verfügt über Fachexpertise im Bereich der nachhaltigen Sanitärversorgung



Trockentoiletten anbietende

- bietet Trockentoiletten und ggf. auch Service und Recyclingdienstleistungen an (bei der Wahl der Anbietenden sollte stets die Frage nach der Verwertungsmöglichkeit der Trockentoiletteninhalte gestellt werden – siehe auch Kapitel 3.1 „Ressourcen aus der Schüssel“)



Verwertungsdienstleister:in

- verfügt über Expertise zur Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten
- verfügt über Infrastruktur und Maschinen für die Verwertung
- beschäftigt Personal für die Verwertung der Trockentoiletteninhalte



Investierende

- stellt die finanziellen Mittel für die öffentlichen Trockentoiletten und den Aufbau einer Recyclinganlage zur Verfügung

Die Mittel können aus verschiedenen Quellen stammen wie

- Förderprogrammen (auf EU-, Bundes-, Landes- oder Kommunalebene)
- Investitionen von KMUs
- Stiftungen
- Investitionen der Kommune



Fürsprecher:in

- lässt sich durch Projektinitiator:in/Treiber:in von der Idee überzeugen
- fungiert als Multiplikator:in der Idee
- bringt durch eigene Kontakte weitere Akteur:innen in das Ökosystem mit ein (z. B. kommunale Entscheidungsträger:innen, Investor:innen, Kund:innen, Forscher:innen)



Kund:in

- mietet Trockentoiletten
- nimmt Verwertungsdienstleistung in Anspruch



Forschende

- ist für die Qualitätssicherung zuständig
- begleitet das Projekt wissenschaftlich
- kann ein Verbund aus verschiedenen Forschungseinrichtungen, Institutionen und Laboren sein, die ggf. im Rahmen eines Forschungsprojekts zusammenarbeiten



Treibende

- moderiert den Prozess und treibt eine zeitnahe Umsetzung an
- fungiert als Koordinator:in des Prozesses
- sorgt für regelmäßigen Austausch der relevanten Akteur:innen
- erkennt und managt Risiken

Welche Akteur:innen sind in Ihrer Kommune für die Umsetzung einer Sanitär- und Nährstoffwende relevant und welche Rolle(n) nehmen sie ein? Im [digitalen Anhang](#) finden Sie eine Arbeitshilfe, um Ihr eigenes Innovations-ökosystem zu strukturieren und aufzubauen.

Welche Akteur:innen besetzen die Rollen des Innovationsökosystems im Landkreis Barnim?

Autorinnen: Anastasia Bondar, Anna Calmet und Annika Grebener

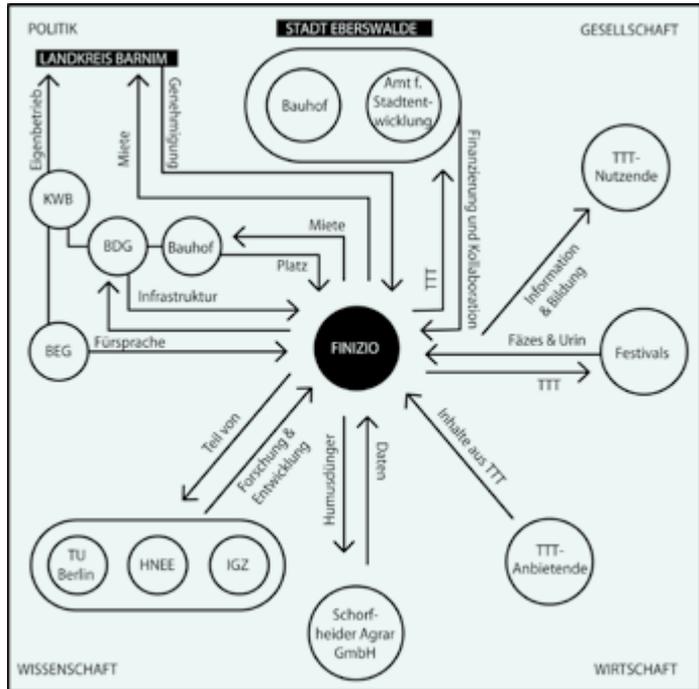


Abbildung 2
Das Innovations-
ökosystem in
Eberswalde

BDG – Barnimer Dienstleistungsgesellschaft mbH
 BEG – Barnimer Energiegesellschaft mbH
 HNEE – Hochschule nachhaltige Entwicklung Eberswalde
 IGZ – Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau e. V.
 KWB – Kreiswerke Barnim GmbH
 TU Berlin – Technische Universität Berlin

Im Innovationsökosystem in Eberswalde sind mehrere Schlüsselakteur:innen daran beteiligt, eine nachhaltige Sanitärversorgung zu entwickeln und zu implementieren (siehe Abbildung 2). Im Mittelpunkt steht die **Finizio Future Sanitation GmbH**, die im April 2019 von Florian Augustin gegründet wurde. Finizio ist eine Pionierin im Bereich der nachhaltigen Sanitärversorgung. Mithilfe verschiedener Akteur:innen hat das Unternehmen Deutschlands erste Recyclinganlage zur Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten aufgebaut.



Toiletten-
anbieter:in



Verwertungs-
dienstleister:in



Treibende



Investor:in



Projektinitiator:in



Verwertungs-
dienstleister:in



Fürsprecher:in



Treibende



Investor:in



Kund:in



Fürsprecher:in

Die **Finizio Future Sanitation GmbH** nimmt neben ihren Rollen der Toilettenanbieterin und Verwertungsdienstleisterin verschiedene Funktionen im Innovationsökosystem Eberswalde ein. Als Projektinitiatorin hat sie die Transformation in Eberswalde durch intensive Vernetzungsarbeit angestoßen und fungiert seitdem auch als Treiberin des Prozesses. Als Investorin entwickelt sie die Trockentrenntoiletten und Verwertungstechnik für Inhalte aus Trockentoiletten kontinuierlich weiter.

Die beiden Geschäftsführer der kreiseigenen Unternehmen **Barnimer Energiegesellschaft mbH (BEG)** und der **Kreiswerke Barnim GmbH (KWB)** begeisterten sich bereits in der frühen Entstehungsphase des Innovationsökosystems für Finizios Vision. Thomas Simon und Christian Mehnert waren einflussreiche Fürsprecher. Sie stellten die Verbindung zum **Landkreis Barnim** und der **Stadt Eberswalde** her, den beiden entscheidenden Akteur:innen für die Genehmigung der Pilot- und Recyclinganlage in Eberswalde. Die KWB beteiligten sich auch als Verwertungs- dienstleister und waren als Bauherrin der Fläche und der Anlage maßgebliche Investoren. Zum Netzwerk gehört auch die **Barnimer Dienstleistungsgesellschaft mbH (BDG)**, die Finizio sowohl Infrastruktur bereitstellte als auch einen Radlader vermietete.

In der Kommunalverwaltung der **Stadt Eberswalde** konnten ebenfalls Fürsprecher:innen für das Vorhaben gewonnen werden. So wurde die Stadt 2019 eine der ersten kommunalen Kundinnen der Finizio GmbH. Die Perspektive der Stadt als Kundin war im Weiteren relevant für die Forschung und Entwicklung der öffentlichen Trockentrenntoiletten der Firma Finizio.



Treibende



Forschende

Seit 2021 ist das **Forschungsprojekt zirkulierBAR** ein weiterer zentraler Bestandteil des Innovationsökosystems. Die Mitglieder des Forschungskonsortiums nehmen die Rolle der Forschenden ein. Die 10 **Konsortialpartner:innen** fungieren darüber hinaus als Treibende. Das Innovationsökosystem und die Wissenschaftskommunikation wurden dadurch bedeutend erweitert. Verschiedene Zielgruppen, die für den langfristigen Erfolg der Innovation entscheidend sind, wurden identifiziert und gezielt angesprochen (z. B. Kommunen, Politiker:innen, Landwirt:innen und Gesellschaft – siehe auch Kapitel 2)



Investor:in

Das **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)** ist der Fördermittelgeber für das Forschungsprojekt zirkulierBAR und fungiert somit als Investor. Ergänzend wurden zusätzliche Forschungsmaßnahmen durch die **Wissenschaftsstiftung der Sparkasse Barnim** gefördert. Das macht diese zu einer weiteren Investorin.



Fürsprecher:in

Die **Schorfheider Agrar GmbH** im Landkreis Barnim konnte von Finizio und zirkulierBAR als Partnerin gewonnen werden, um die Recyclingdünger für Forschungszwecke im landwirtschaftlichen Kontext zu erproben. Zusätzlich hat sie bei verschiedenen Veranstaltungen des gesellschaftspolitischen Dialogs von zirkulierBAR eine Rolle als Fürsprecherin.

Welche institutionellen und individuellen Stärken wurden bei der Systeminnovation im Landkreis Barnim identifiziert und sollten in anderen Kommunen gefördert werden?

Autor:innen: Katja Searles, Hannah Di Terlizzi, Markus Ulrich

Die Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) analysierte auf Basis qualitativer Interviews mit kommunalen Akteur:innen, welche Erfolgsfaktoren wesentliche Meilensteine der Systeminnovation (SI) ermöglichten.

Landkreis und Kommune

Die im Landkreis Barnim verabschiedete „Null-Emissionen-Strategie“ (2008) sowie das „Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzept“ (2013) der Stadt Eberswalde zeugen von einer grundsätzlichen Offenheit gegenüber nachhaltigkeitsbezogenen Systeminnovationen. Sie bildeten eine gute Grundlage für den Aufbau einer Recyclinganlage für Dünger aus menschlichen Ausscheidungen und damit auch für das Projekt zirkulierBAR. Das Vorhaben konnte an bereits existierende Strategien andocken.

In der Innovationsregion galt es, das Vorhaben zunächst in unterschiedlichen politischen Gremien vorzustellen (bspw. im Ausschuss für Landwirtschaft, Umweltschutz und Abfallwirtschaft des Landkreises Barnim sowie in der Stadtverordnetenversammlung der Stadt Eberswalde). Eine verantwortliche Führungsperson ließ sich trotz noch offener Fragestellungen insbesondere im Hinblick auf die rechtlichen Rahmenbedingungen überzeugen und erteilte die Genehmigung zur Inbetriebnahme der ersten Recyclinganlage für Inhalte aus Trockentoiletten. Erfolgreiche Überzeugungsarbeit in den oberen Hierarchieebenen ist also ein wesentlicher Faktor für das Gelingen von Systeminnovationen.

Ein weiterer Erfolgsfaktor war die Einbindung der Kreiswerke Barnim – einem kommunalen Unternehmen. Als besonders fruchtbar erwies sich die Begegnung zwischen dem Gründer des Start-ups Finizio – Future Sanitation und einer Führungsperson der Kreiswerke Barnim. Finizio fand in den Kreiswerken einen Verbündeten, der in der Gesellschaftsform einer GmbH agiler handeln konnte als eine Kommunalverwaltung. Im Innovationsprozess zeigte sich somit, wie wichtig einzelne Personen an relevanten Positionen waren und dass auch die Rechts- bzw. Gesellschaftsformen der beteiligten Organisationen eine Rolle spielen.

Organisationen und Menschen

Aus den Interviews ließen sich für die Ebenen Organisationen und Menschen je zwölf Stärken mit jeweils drei Unterkategorien ableiten (siehe Abbildung 3 und 4).⁹

9) Eine ausführliche Beschreibung der Kategorien und Stärken finden sich im Stärken-Booklet, welches im Rahmen des Projekts veröffentlicht wurde. Dieses findet sich unter: www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch

Abbildung 3

Die erste Ebene im Stärkenmodell: Organisationen bringen in den drei Unterkategorien Vision, Strategie und Ressource Merkmale mit, die zum Gelingen der Systeminnovation beitragen



Abbildung 4

Die zweite Ebene im Stärkenmodell: Menschen bringen in den drei Unterkategorien Wissen, Fähigkeiten und Haltung Stärken mit, die zum Gelingen der Systeminnovation beitragen



Auf der Ebene der *Organisationen* erwiesen sich die Unterkategorien Vision, Strategie und Ressource als relevant. Auf der Ebene des *Menschen* teilten sich die Stärken in die Unterkategorien Wissen, Fähigkeiten und Haltung ein. Exemplarisch werden an dieser Stelle die beiden Stärken „Wissen – die Rechtslage kennen“ und „Vision – Sehnsucht wecken“ skizziert (in der Abbildung blau eingefärbt).

„Wissen – die Rechtslage kennen“: Die am Innovationsprozess beteiligten Menschen beschäftigten sich intensiv mit der Rechtslage, um die rechtlich möglichen Erprobungsräume identifizieren und ausschöpfen zu können. „Vision – Sehnsucht wecken“: Es erwies sich als wertvoll, dass die Vision für die Systeminnovation auf organisationaler Ebene mitreißend ausgestaltet und kommuniziert wurde. So wurden neue Akteur:innen motiviert, die SI mitzugestalten.

Mit dem Stärkenmodell wurde deutlich, dass nicht jeder Mensch und jede Organisation sämtliche Stärken in sich vereinen muss. Entscheidend ist ein starkes Netzwerk aus Akteur:innen mit breit verteilten Stärken rund um die geplante Systeminnovation.

Ergebnisse dieser Auswertung flossen auch in die Entwicklung des Planspiels komm:loop ein. Das Spiel greift die hier dargestellten Wirkweisen auf und befähigt kommunale Akteur:innen, die Veränderungen an tief verankerten Systemen und Verhaltensweisen voranbringen möchten, ebenso wie deren Partner:innen. Mehr dazu finden Sie unter www.zirkulierbar.de/planspiel-kommloop.

Welche Gründe haben Kommunen für eine Sanitär- und Nährstoffwende? Was sind die zentralen Entwicklungsstufen und -hemmnisse?

Autorinnen: Anna Calmet und Annika Grebener

Die Erfahrungen aus dem zirkulierBAR-Netzwerk für beobachtenden Kommunen zeigen: Kommunen kommen auf zweierlei Arten mit ressourcenorientierten Sanitärsystemen (ROSS) in Kontakt. Zum einen erreichen sie vermehrt Anträge für den Einbau solcher Sanitärösungen in Gebäuden. Hier sind Kommunen aufgrund des Baurechts und der Daseinsvorsorge¹⁰ in der Verantwortung. Zum anderen steigt in der Bevölkerung die Nachfrage nach kostenfreier und nachhaltiger öffentlicher Sanitärversorgung. Obwohl diese bislang nicht zur Daseinsvorsorge¹ gehört, wächst der politische Druck auf Verwaltungen, auf eine entsprechende Nachfrage einzugehen.

Bei ihrer Recherche zu nachhaltigen Infrastrukturlösungen stoßen Kommunen vermehrt auf Trockentrenntoiletten (TTT). Diese bieten zahlreiche Vorteile und leisten einen Beitrag zur Erreichung global-, EU-, bundes- und kommunalpolitischer Ziele. Trockentrenntoiletten benötigen keinen Medienanschluss¹¹. Damit sind auch Standorte wie Parkanlagen oder Friedhöfe möglich. Zudem lassen sich im Vergleich zu Wasserspültoiletten Installations- und Rückbaukosten sparen. Betreiber:innen sind außerdem flexibler in der Standortauswahl sowie der Dauer der Installation, sodass auch eine saisonale oder testweise Aufstellung möglich ist (z. B. in touristischen Gebieten). TTT helfen darüber hinaus, Wasser zu sparen. Durch die getrennte Sammlung von Urin und Fäzes können Schadstoffe gezielt behandelt werden, was in Folge die Kläranlagen entlastet¹².

In den beobachtenden Kommunen des Netzwerks ließen sich auf dem Weg zur Sanitär- und Nährstoffwende (unter Einsatz öffentlicher TTT) fünf Entwicklungsstufen identifizieren (siehe Abbildung 5).

10) Die Daseinsvorsorge verpflichtet Kommunen u. a. zur Entsorgung von Abwässern und Abfällen. Die Bereitstellung einer öffentlichen Sanitärversorgung gehört nicht dazu.

11) Als Medienanschluss bezeichnet man die im Zusammenhang mit der Erschließung eines Geländes notwendige Anbindung an die Wasserver- und -entsorgung, Strom, ggf. Gas und Datenkapazitäten. Relevant für öffentliche Toiletten sind die Wasserver- und -entsorgung sowie die Stromversorgung.

12) Vorbehaltlich der noch ausstehenden Bestätigungen im EU-Parlament und im Ministerrat schreibt die novellierte Kommunalabwasserrichtlinie eine Einführung der 4. Reinigungsstufe zur Entfernung von Spurenstoffen in kommunalen Kläranlagen bis 2045 vor.

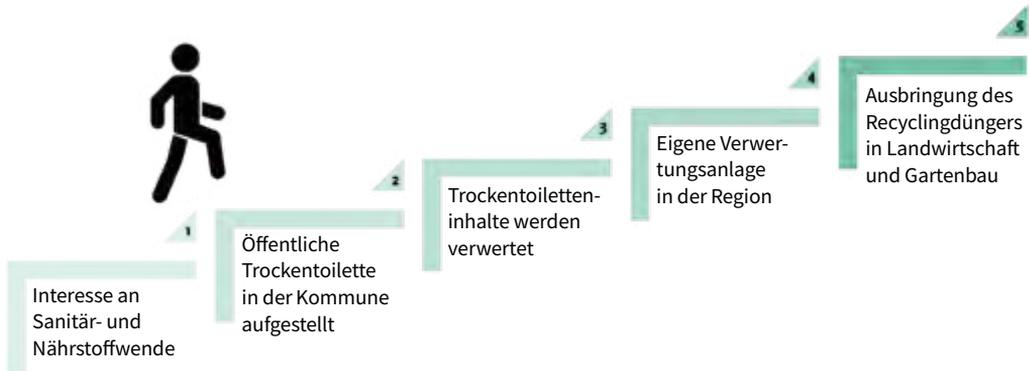


Abbildung 5

Entwicklungsstufen von Kommunen auf dem Weg zur Sanitär- und Nährstoffwende unter Einsatz öffentlicher Trockentrenntoiletten

Auf der ersten Entwicklungsstufe zeigt die Kommune Interesse an der Sanitär- und Nährstoffwende, informiert sich über Vor- und Nachteile von öffentlichen ROSS und holt Erfahrungswerte aus anderen Kommunen ein. Hier konnte das Netzwerk maßgeblich zum Wissensaufbau und zur Vernetzung zwischen Kommunen beitragen. Auf der zweiten Entwicklungsstufe stellt die Kommune öffentliche Trockentrenntoiletten auf. Um die dritte Entwicklungsstufe zu erreichen, gilt es, die Entsorgung der Toiletteninhalte zu klären. Aktuell können Kommunen die Entsorgung¹³ entweder der örtlichen Kläranlage überlassen, einem Faulturm für Klärschlamm zuführen oder die Inhalte zu qualitätsgesicherten Recyclingdüngern aufbereiten lassen (bei räumlicher Nähe zur Recyclinganlage in Eberswalde). Auf der vierten Entwicklungsstufe plant und errichtet die Kommune eine Recyclinganlage für Inhalte aus Trockentoiletten. Auf der fünften Entwicklungsstufe kommen die hergestellten Recyclingdünger in der Landwirtschaft oder im Gartenbau zum Einsatz. Aktuell ist das rechtlich nur im Rahmen von Sondergenehmigungen zur Umsetzung von Forschungsvorhaben möglich. Beim Übergang von einer zur nächsten Entwicklungsstufe müssen Kommunen verschiedene Hemmnisse überwinden, die im Folgenden beschrieben werden.

13) Der Entsorgungsbegriff umfasst sowohl die Verwertung als auch die Beseitigung von Abfällen.

14) Im zirkulierBAR-Netzwerk für beobachtende Kommunen sind u. a. folgende Ämter und Positionen mit dem Thema betraut: Klimaschutzmanagement, Tourismusmanagement, Bauhof, Untere Abfallbehörde, Stoffstrommanagement, Umweltamt und Gebäudereinigung. Ein „Good Practice“-Beispiel ist die Stadt Leipzig: Sie hat eine Position geschaffen, die sich insbesondere mit der öffentlichen Toiletteninfrastruktur befasst. Die Position wurde als Stabstelle unter dem Oberbürgermeister verankert und nennt sich „Referent:in für öffentliche Sanitäranlagen“.

Rechtlich steht der Aufstellung öffentlicher TTT (Entwicklungsstufe 2) nichts im Weg. In einigen Bundesländern muss dafür ein Bauantrag gestellt werden. Beim Einbau von ROSS in Gebäuden sind die jeweiligen kommunalen Abwassersatzungen zu berücksichtigen. In den Satzungen wird häufig ein Anschluss- und Benutzungszwang definiert, der sich negativ auf einen entsprechenden Antrag auswirken kann. Was das Recycling von Inhalten aus Trockentoiletten betrifft, gibt es hingegen rechtliche Unsicherheiten bezüglich der Abfalldefinition und der Anwendbarkeit des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Das kann den Übergang zur Entwicklungsstufe 3 und 4 hemmen. Weiterhin dürfen die hergestellten Recyclingdünger nur mit einer Ausnahmegenehmigung zu Forschungs- und Versuchszwecken in der Landwirtschaft eingesetzt werden (Entwicklungsstufe 5), da Inhalte aus Trockentoiletten nicht als Ausgangsstoff für Düngemittel in Anhang 2 der Düngemittelverordnung gelistet sind. Die unsichere Rechtslage im Abfall- und Düngerecht wirkt sich entsprechend hemmend auf die Investitions- und Innovationsbereitschaft der Kommunen aus.

Detailliertere Informationen zur rechtlichen Situation finden sich in unserem [Positionspapier](#) „*Recyclingdünger: warum wir eine Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen brauchen, um Wasser zu sparen, Schadstoffe zu reduzieren und Ressourcen zu schonen*“.

Da die Bereitstellung öffentlicher Toiletten nicht zu den Pflichtaufgaben einer Kommune gehört (vgl. Daseinsvorsorge), ist das Thema in der deutschen Verwaltungsstruktur bis jetzt weder personell noch finanziell berücksichtigt. Kommunalverwaltungen sehen sich jedoch zunehmend dazu gezwungen, verantwortliche Personen zu benennen. Die personelle Verankerung variiert damit von Kommune zu Kommune¹⁴. Oft erfolgt die Bearbeitung zunächst durch Schlüsselakteur:innen mit persönlichem Interesse oder verfügbaren Kapazitäten. Neben den



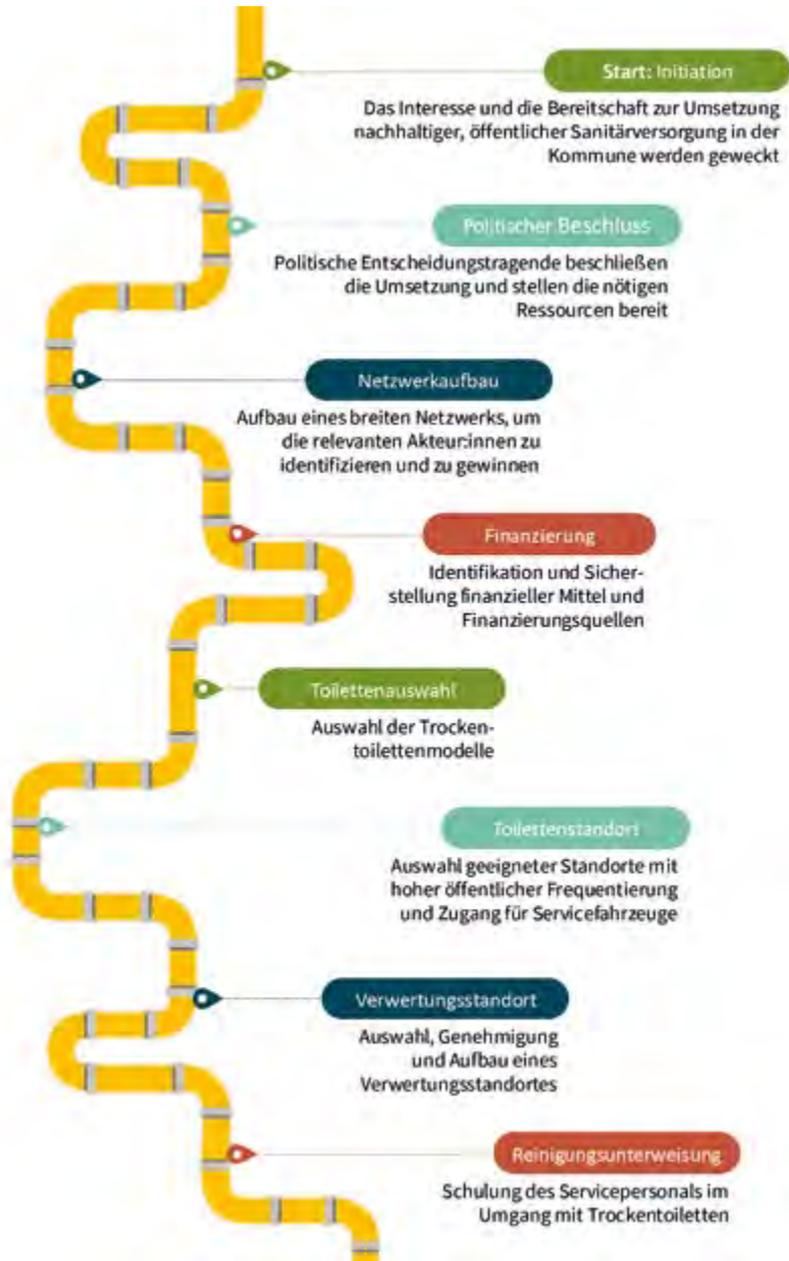
Abbildung 6
Außen- und
Innenansicht der
barrierearmen und
genderneutralen
öffentlichen Toilette
„Libre“ der
Finizio GmbH“

© Finizio GmbH

Personalkosten in der Verwaltung müssen Kommunen auch finanzielle Mittel für die Installation, Wartung, den Betrieb und ggf. auch Rückbau öffentlicher TTT im Haushalt einplanen und/oder Fördermittel akquirieren. Insgesamt mangelt es im Bereich ressourcenorientierter Sanitärsysteme noch an ausreichenden Finanzierungs- und Fördermaßnahmen.

Roadmap – Meilensteine einer kommunalen Sanitär- und Nährstoffwende

Autorinnen: Anastasia Bondar, Anna Calmet, Annika Grebener



Inbetriebnahme Toilette

Aufstellung der Trockentrenntoilette,
Ausstattung mit Verbrauchsmaterialien,
ggf. feierliche Eröffnung

Schulung Verwertung

Schulung und Unterweisung von
Mitarbeiter:innen in die
Verwertungstechnik

Servicekontrolle

Qualitätskontrolle des Service-Systems
(Reinigung der Toiletten und Transport
der Inhalte)

Wissenschaftsnetzwerk

Aufsetzen eines Forschungsprojekts
zur wissenschaftlichen Begleitung
des Verwertungsprozesses

Qualitätskontrolle

Qualitätskontrolle der
Recyclingdünger durch
unabhängige Labore (ggf. Teil des
Forschungskonsortiums)

Feldversuche

Kooperation mit Landwirtschaft,
Genehmigung von Feldversuchen,
Ausbringung des Recyclingdüngers,
Beprobung und Analyse

Ergebniskommunikation

Publikation der Forschungsergebnisse,
gesellschaftlicher und politischer Dialog

Ziel: Zulassung als Dünger

Düngemittelrechtliche Zulassung

Transfer der Systeminnovation in die Stadt Köln

Autorinnen: Anastasia Bondar, Anna Calmet, Annika Grebener

Ein Ziel des Forschungsprojekts zirkulierBAR war der Wissens- und Technologietransfer in andere Kommunen. Die Stadt Köln trat frühzeitig dem Netzwerk für beobachtende Kommunen bei und profitierte von den Transferangeboten. So entstand in Köln ein ähnliches Innovationsökosystem wie in Eberswalde. Die beobachtende Kommune ist ein gutes Beispiel dafür, wie sich die in Eberswalde entstandene Systeminnovation (auch teilweise) in andere Kommunen transferieren lässt.

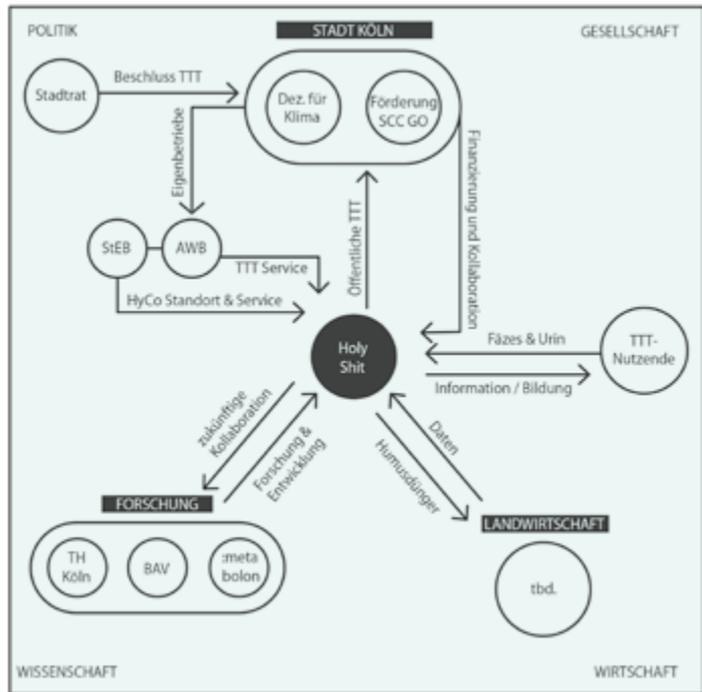


Abbildung 7
Das Innovations-
ökosystem in Köln

AWB – Abfallwirtschaftsbetriebe Köln GmbH
 BAV – Bergischer Abfallwirtschaftsverband
 Dez. für Klima – Dezernat für Klima, Umwelt, Grün und Liegenschaften
 StEB – Stadtentwässerungsbetriebe Köln
 TH Köln – Technische Hochschule Köln



Toiletten-
anbietende



Investor:in



Projektinitiator:in



Treibende

In Köln gewann das Thema nachhaltige Sanitärversorgung im Jahr 2022 an Aufmerksamkeit, als die im Rahmen von zirkulierBAR entstandene Masterarbeit von **Anastasia Bondar** mit dem Kölner Designpreis ausgezeichnet wurde. Aufbauend auf ihrer Masterarbeit initiierte die Absolventin das Projekt **Holy Shit**, welches öffentliche Trockentrenntoiletten entwickelt und in den Aufbau eines Hygienisierungsstandorts investiert. Anastasia Bondar wurde damit nicht nur zur Treiberin und Projektinitiatorin, sondern auch regionale Toilettenanbieterin und Investorin im Innovationsökosystem Köln.



Fürsprecher:in

Angeregt durch die Masterarbeit ließ sich der Kölner **Stadtrat** als Fürsprecher einer nachhaltigen Sanitärversorgung gewinnen. So wurde das städtische Toilettenkonzept um das Pilotieren nachhaltiger Sanitärsysteme erweitert.



Kund:in



Investor:in

Im November 2023 eröffnete Bürgermeister Andreas Wolter die erste öffentliche Holy-Shit-Trockentoilette im Kölner Volksgarten. Diese wurde vom **Dezernat für Klima, Umwelt, Grün und Liegenschaften** in Auftrag gegeben und durch das **Förderprogramm Smart City Cologne GO** der Stadt Köln gefördert. Die Stadt Köln ist somit zugleich Kundin und Investorin für eine nachhaltige öffentliche Sanitärinfrastruktur.



Verwertungs-
dienstleister:in

Service und Reinigung der Kölner Trockentoilette werden von den **Abfallwirtschaftsbetrieben (AWB)** übernommen. Die AWB sind für die Reinigung aller öffentlichen Toiletten in Köln zuständig. Die gesammelten Feststoffe werden zum Klärwerk Standort Langel transportiert und durch die **Stadtentwässerungsbetriebe Köln (StEB)** in einem Hygienisierungscontainer gesammelt und hygienisiert. AWB und StEB agieren demnach als Verwertungsdienstleister:innen.



Forschende

Die weitere Verwertungsinfrastruktur (u. a. Kompostierung) befindet sich im Aufbau und soll im Rahmen eines Forschungsprojekts realisiert werden. Mögliche Forschungspartner:innen sind die **Technische Hochschule Köln (TH Köln)** und der **Bergische Abfallwirtschaftsverband (BAV)**. Am Innovationsstandort „:metabolon“ des BAV und der TH Köln herrschen ideale Rahmenbedingungen zum Aufbau einer Recyclinganlage für hygienisierte Trockentoiletteninhalte. Das Projekt Holy Shit bewirbt sich um Förderungen, um ein solches Reallabor für nachhaltige Sanitärversorgung aufzubauen.



Fürsprecher:in

Künftig sollen in Kooperation mit **landwirtschaftlichen Betrieben** im Kölner Raum Feldversuche mit Humusdünger aus Inhalten von Trockentoiletten durchgeführt werden. Dafür gilt es, Fürsprecher:innen zu finden.

2.5 Fachliche Vielfalt

Weitere Akteur:innen der Sanitär- und Nährstoffwende

Autor:innen: Felix Bickert und Theresa Pausch

Welche Erfahrungen und Perspektiven sollten bei der Umsetzung der Sanitär- und Nährstoffwende mit einbezogen werden?

Die Umsetzung der Sanitär- und Nährstoffwende erfordert die Mitwirkung von Akteur:innen aus unterschiedlichsten Branchen und Professionen entlang des gesamten Stoffstromkreislaufs (siehe Key Visual S. 2–3). Die Bereiche Architektur, Regionalplanung, Wasserwirtschaft und Kommunalverwaltung leisten zum Beispiel einen wichtigen Beitrag, wenn es darum geht, die Ausscheidungen zu sammeln, zu transportieren oder zu



verwerten. Die landwirtschaftlichen Akteur:innen sind bedeutend für die Bereiche Düngung, Anbau, Verarbeitung und Handel. Auch die Gesellschaft als Ganzes ist als Akteur:in gefragt. Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft für Recyclingdünger und den daraus hergestellten Lebensmitteln sind entscheidend für den Erfolg ressourcenorientierter Sanitärsysteme. Ein Dialog mit den verschiedenen Akteur:innen im Rahmen von zirkulierBAR erlaubte es, erste Stellschrauben zur Transformation des Sanitärsystems zu identifizieren.

Um ihre Erfahrungen und Perspektiven in den Prozess einzubringen, fanden unter Anleitung des Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI) am Fraunhofer IAO von April 2023 bis März 2024 mehrere Workshops statt. Diskutiert wurden die möglichen Anforderungen, Hürden und Lösungswege bei der Umsetzung ressourcenorientierter Sanitärsysteme. Architekt:innen und Planende lieferten entscheidende Beiträge dazu, welche Handlungsbedarfe und Möglichkeiten es bei Sammlung, Verwertung, Düngung und Anbau gibt. Mit Blick auf die Zukunft der regionalen Kreislaufwirtschaft wurde in den Workshops ermittelt, was heute schon getan werden kann bzw. noch getan werden muss. Die Teilnehmenden waren sehr interessiert daran, mehr über den gesamten Stoffstromkreislauf zu erfahren. Neben dem fachlichen Austausch trug auch eine Führung auf der Verwertungsanlage in Eberswalde zu einem besseren Verständnis bei. Die Workshops führten damit zu einer gemeinsamen Wissensgrundlage als Basis für die Planung und Umsetzung ressourcenorientierter Sanitärösungen. Darüber hinaus waren sie ein ideales Forum, um Best-Practice-Beispiele zu teilen, sich zu vernetzen und gemeinsame Projekte anzugehen.

Welche Probleme, Anforderungen, Potenziale, Hürden und Lösungswege sind für Akteur:innen aus Architektur und Planung entscheidend?

Während der Veranstaltungen diskutierten die Akteur:innen die Probleme, Anforderungen, Potenziale, Hürden und Lösungswege zur Realisierung der Sanitär- und Nährstoffwende. Dabei wurden insbesondere folgende Aspekte eingebracht:

Baurecht anpassen

Mit der fachlichen Ausrichtung der Teilnehmenden im Bereich Architektur standen vor allem baurechtliche Hürden im Fokus der Diskussion. Aktuell bestehen noch zu viele Lücken im Baurecht, um Trockentrenntoiletten in Wohnhäusern installieren und nutzen zu können (z. B. Schall- und Brandschutz). Hier bedarf es noch rechtlicher Anpassungen, um für Planenden und Architekt:innen Rechtssicherheit zu schaffen. Ein weiterer Lösungsansatz sind Anpassungen im Bebauungsplan bezüglich der Vorgaben zu Sanitäreanlagen. Zudem sollten Anreize für Bauherr:innen geschaffen werden, um mehr Bauprojekte mit modernen Sanitärlösungen zu realisieren. Derzeit führen die höheren Kosten und der Mehraufwand dazu, dass sich Bauherr:innen zumeist gegen diese Lösungen entscheiden. Insbesondere die zusätzlich benötigten Technikflächen sind ein großer Kostenfaktor. Hier wären spezielle Förderprogramme und eine finanzielle Kompensation für Wassereinsparung und Nährstoffsammlung wünschenswert.

Experimentierräume schaffen

Ein vielversprechender Ansatz für die weitere Erprobung der Technologien liegt darin, in Reallaboren bzw. Experimentierräumen aktiv zu werden. Grundlage dafür können das Reallaborgesetz und weitere Sondergenehmigungen sein. Sie ermöglichen Pilotprojekte zu Forschungszwecken, um innovative Lösungen in einem geschützten Raum zu erproben. Bei der Skalierung dieses Ansatzes ist es deshalb wichtig, die Erkenntnisse aus den vielfältigen Pilotprojekten zu sammeln und für den Aufbau weiterer Reallabore verfügbar zu machen. Ein Beispiel dafür bietet das Reallabor rund um die Verwertungsanlage von Inhalten aus Trockentoiletten in Eberswalde. Vernetzung und Austausch bieten ein großes Potenzial, um von Präzedenzfällen zu lernen und Ausnahmeregelungen in der Breite zu schaffen.

Flexible Lösungen ermöglichen

Die Teilnehmenden der Workshops betonten, dass neue Sanitärlösungen flexibel sein müssen. Eine Unterteilung von ROSS in Subsysteme kann dabei helfen, individuelle Lösungen in Gebäudeprojekten umzusetzen. Es bestehen z. B. andere Anforderungen zur Installation von Trockentrenntoiletten in einem Neubau als bei der nachträglichen Umrüstung von Sanitärsystemen in Bestandsbauten. Der Gebäudetyp E

(„experimentell“) bietet in diesem Zusammenhang Spielraum, der sich für Neubauten nutzen lässt. Auch innerhalb eines Gebäudes oder Quartiers können verschiedene Lösungen für die unterschiedlichen Bedürfnisse einer diversifizierten Gesellschaft bereitgestellt werden. Es ist zum Beispiel denkbar, in einem mehrgeschossigen Haus auf verschiedenen Ebenen unterschiedliche Sanitärlösungen zu installieren. Darüber hinaus könnten Sanitärsysteme so flexibel gestaltet werden, dass sie sich später umrüsten lassen (indem man z. B. entsprechende Fallrohre und Schächte einzieht). Wichtig ist in jedem Fall eine hybride Infrastruktur, um die Stoffströme zu trennen. Architekt:innen und Planende wünschen sich hier eine grundsätzliche Offenheit für diverse Sanitärlösungen, um eine Vielzahl individualisierter Ansätze realisieren zu können.

Perspektivenvielfalt integrieren

Mit Blick auf die Sanitär- und Nährstoffwende schätzen die Workshop-Teilnehmenden einen ganzheitlichen Ansatz als besonders effektiv und vielversprechend ein. Bei Umsetzung und Nutzung ressourcenorientierter Sanitärsysteme müssen von Anfang an verschiedene Perspektiven mitgedacht werden (z. B. mit Blick auf die Barrierefreiheit). Ein funktionierendes und belastbares System entsteht letztlich nur durch Transdisziplinarität und Kooperation. Inhaltlich ist vor allem die Frage der Entsorgung zu klären. Es braucht eine zuverlässige Infrastruktur, um die Inhalte von Trockentrenntoiletten nachhaltig sammeln und verwerten zu können. Architekt:innen müssen dafür in Einklang mit öffentlichen Betreibenden oder externen Dienstleister:innen handeln. Aktuell besteht jedoch eine große Hürde darin, die Wasserwirtschaft in den Prozess mit einzubinden. Es könnte beispielsweise ein Dialog darüber entstehen, inwieweit eine Stoffstromtrennung durch Trockentrenntoiletten nicht die Abwasserstruktur ersetzen, sondern vielmehr diese ergänzen möchte, also ein hybrides System angestrebt wird (Eawag, 2024). Dialogveranstaltungen und Stakeholder-Formate bieten für diesen Austausch einen ersten Ansatz. Als erfolgskritisch wird hier vor allem die Bildung starker lokaler Allianzen gesehen.

Gesellschaftliche Akzeptanz diskutieren

Auch Bürger:innen sollten in den Prozess eingebunden werden. Sie sind es, die die Toiletten letztlich nutzen. Das macht sie zu einer überaus relevanten Zielgruppe. Um zu klären, wie man sie

am besten für ein neues Toilettensystem gewinnt, gilt es, soziologische, psychologische und kulturelle Faktoren zu berücksichtigen. Die Teilnehmenden der Workshops schätzten dabei die Bedeutung positiver Narrative und greifbarer Erfahrungen als besonders wirksam ein. So kam der Vorschlag, Trockentrenntoiletten zunächst an halböffentlichen Plätzen zu installieren (z. B. in Raststätten, Parks oder auf Festivals). Die Bürger:innen können so erste Erfahrungen sammeln und erleben das neue Sanitärsystem als etwas zunehmend Normales. Für besonders wichtig erachteten die Teilnehmende in diesem Zusammenhang den Nutzungskomfort. Darüber hinaus sollten auch Aspekte der Inklusion und Barrierefreiheit beachtet werden.

Ein Schlüsselfaktor für den Erfolg neuer Sanitärsysteme ist die Sensibilisierung der Gesellschaft für Themen aus den Bereichen Ökologie, Nachhaltigkeit und Recycling. Besonders engagierte Gruppen könnten hier als Multiplikator:innen wirken (z. B. interessierte Studierende). Ziel sollte es sein, aus der Gesellschaft heraus ein Momentum zu schaffen („Bottom-up“), um ressourcenorientierte Sanitärsysteme am Markt zu etablieren.

Aus den Workshop-Diskussionen wurde deutlich, dass es für die Sanitär- und Nährstoffwende nicht nur veränderte rechtliche Gestaltungsmöglichkeiten braucht, sondern auch flexiblere Lösungen in der Umsetzung sowie eine breite Mitwirkung unterschiedlichster Akteur:innen. Dort, wo es an Wissen zur Planung und praktischen Umsetzung von Trockentrenntoiletten fehlt, können zielgruppenspezifische Anleitungen dabei helfen, Hürden abzubauen. Denkbar wären z. B. Handbücher oder Leitfäden für Bauherr:innen, Architekt:innen, Planende oder Bewohner:innen. Diese Maßnahmen sind nur erste Ansätze, tragen aber entscheidend dazu bei, die Sanitär- und Nährstoffwende voranzutreiben.

Bei der Umsetzung von Sanitärsystemen spielen diverse Standards und Regelwerke eine Rolle. Einen Überblick über relevante technische Regelwerke und Normen bietet die Wissensplattform des Netzwerks für nachhaltige Sanitärsysteme (NetSan) e. V.: www.naehrstoffwende.org/normen-und-standards/.

2.6 Forschendes Lernen

Wie vermittele ich Wissen und Methoden an Studierende?

Autorinnen: Ariane Krause, Corinna Schröder, Hannah Di Terlizzi

Um Studierende für das Thema der Sanitär- und Nährstoffwende zu begeistern und ihnen einen Einblick in die wissenschaftliche Praxis des zirkulierBAR-Projekts zu geben, wurde eine eigene Lehrveranstaltung nach dem Prinzip des „forschenden Lernens“ konzipiert und umgesetzt. Im Seminar „Micro Cycles für die Nährstoffwende“ entwickelten Studierende über ein Semester in multidisziplinären Teams eigene „Mikro-Forschungsprojekte“, die sie dann selbstständig durchführten und auswerteten. Dieser Beitrag stellt das Konzept „Forschendes Lernen“ vor, beschreibt das Vorgehen bei der Konzeptionierung der Lehrveranstaltung und berichtet von den Erfahrungen aus dem Seminar.

Was ist „forschendes Lernen“?

Fokus des „forschenden Lernens“ sind neben dem Erlernen von Methoden oder der Erarbeitung von Ergebnissen besonders das Erleben von Forschen als facettenreicher Prozess (Rueß et al., 2016). Studierende durchlaufen mit einer eigenen Forschungsfrage selbstständig, aktiv und in sozialem Austausch einen gesamten Forschungsprozess. Sie gewinnen wissenschaftliche Erkenntnisse und kommunizieren diese (Huber, 2014). Sonntag et al. (2018) beschreiben einen idealtypischen Forschungskreis mit neun Schritten (siehe Abbildung 8). Dieser Kreis verläuft beim forschenden Lernen nicht immer chronologisch, es gibt auch Variationen.

Im Idealfall wird eine gemeinsame übergeordnete Fragestellung verfolgt. Sie dient als inhaltliche „Klammer“ des Seminars. Die Fragestellung kann aus einem Forschungsvorhaben stammen, das für Dritte interessant ist und relevante Erkenntnisse gewinnen will (Huber, 2014). Die Lernenden verfolgen dann eine selbst gewählte Forschungsfrage. Das heißt, sie forschen selbstständig (allein oder in Kleingruppen) daran, diese zu beantworten.



Dabei erleben sie den Forschungsprozess in seinen wesentlichen Phasen (s. Abb. 8) – von der Entwicklung der Fragen und Hypothesen über die Wahl und Ausführung der Methoden bis hin zur Prüfung und Darstellung der Ergebnisse. Die Ergebnisse müssen dabei nicht zwangsläufig neu sein und sind (teilweise) auch den Lehrenden nicht bekannt. Sie sollten durch die Studierenden so aufbereitet werden, dass sie ein wissenschaftliches Fachpublikum ansprechen und interessieren.

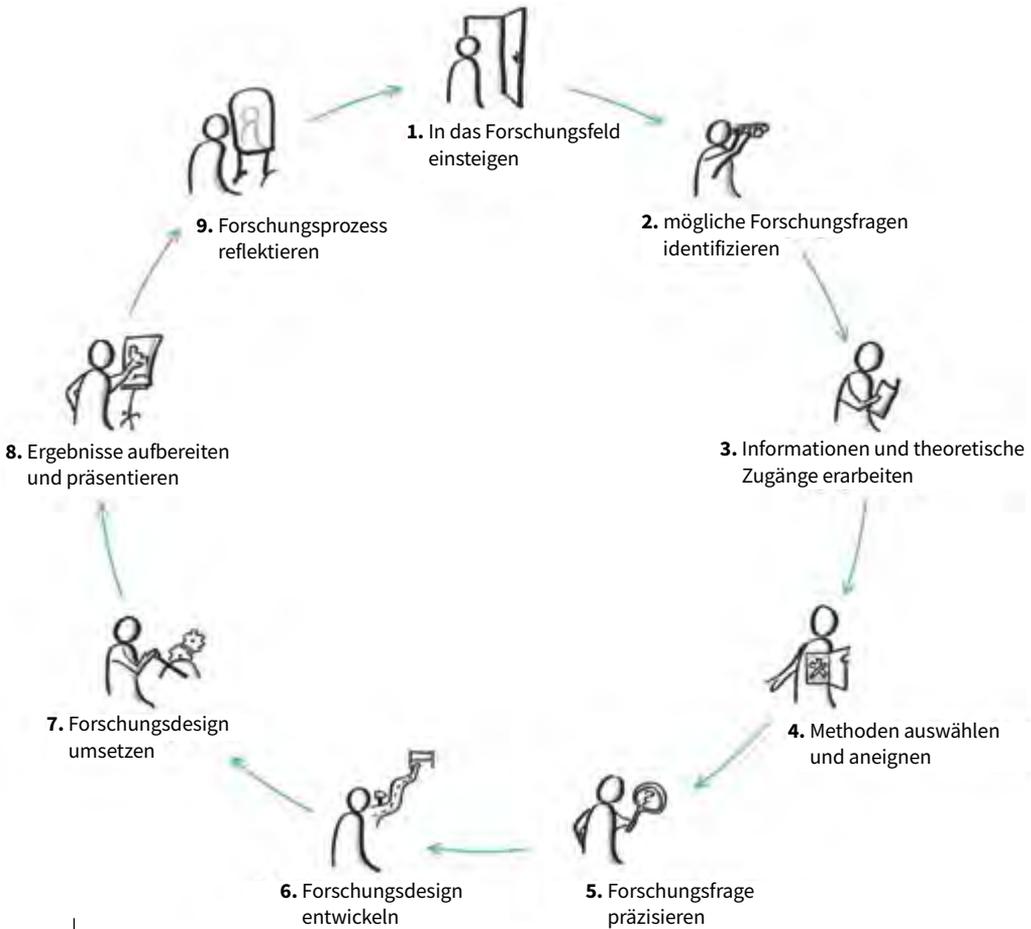


Abbildung 8

Idealtypischer Forschungsprozess in neun Schritten, die die Lernenden/Studierenden durchlaufen sollten (Sonntag et al., 2018)

Durch die Verbindung mit einem übergreifenden Projekt können die Lernenden das Projekt (mit)gestalten, Erfahrungen sammeln und diese reflektieren. Die Lernenden entwickeln beim forschenden Lernen Forschungskompetenz (Sach- und Methodenkompetenzen), erwerben forschungsbezogenes Wissen, lernen im Forschungskontext Neues über ein Thema und erweitern ihre Kompetenzen in den Bereichen Kooperation und Kommunikation.

Wie wurde forschendes Lernen im zirkulierBAR-Projekt umgesetzt?

Im Seminar „Micro Cycles für die Nährstoffwende“ konnten Studierende (1) die Freude am Forschen entdecken, (2) das Thema „Sanitär- und Nährstoffwende“ kennenlernen oder bereits vorhandenes Wissen vertiefen und (3) selbstständig einen Forschungsprozess durchlaufen. Das Seminar wurde für Bachelor- und Masterstudierende konzeptioniert und über die HNEE und die TU angeboten. Ein dreiköpfiges Seminarteam entwickelte das Lernkonzept und betreute das Seminar ebenso organisatorisch wie inhaltlich. Bei der fachlichen Betreuung der Studierenden unterstützten Mitarbeiter:innen der Technischen Universität, des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) und des Fraunhofer Center for Responsible Research and Innovation (CeRRI).

Die Konzeptentwicklung begann mit dem Workshop „*Einführung in das forschende Lernen – Definition und Hinweise zur praktischen Umsetzung*“ mit einer Expertin für forschendes Lernen. Nach dieser methodischen Schulung wurde das Seminar zeitlich geplant, methodisch konzeptioniert, inhaltlich vorbereitet, administrativ aufgesetzt und über diverse Kanäle (Social Media, E-Mail-Verteiler, Auftaktveranstaltungen) beworben.

Zur inhaltlichen Ausgestaltung diente die übergeordnete Forschungsfrage aus zirkulierBAR:

Wie kann die Herstellung von qualitätsgesicherten, sozial und rechtlich akzeptierten sowie vermarktungsfähigen Recyclingdüngern aus Inhalten aus Trockentoiletten als interkommunales, zirkuläres Stoffstrommanagement gelingen?

Um die Wahl der Forschungsfragen zu unterstützen, bekamen die Studierenden eine Auswahl an Themen angeboten. Diese umfassten verschiedene Forschungsbereiche aus zirkulierBAR: (1) Qualitätssicherung (z. B. Methodentest zur Bestimmung von Störstoffen, Humusgehalt, Keimfähigkeit), (2) Entwicklung von (Teil-)Stoffstrommodellen (z. B. für einen Veranstaltungsort oder eine Kommune im Landkreis Barnim), (3) Erhebung der Akzeptanz von z. B. Festivaltoiletten, (4) Entwicklung von Material für die Wissenschafts- bzw. Transferkommunikation (z. B. Infografiken, Bildungskonzept für einen Berliner Kiez). Auch die freie Wahl eines Themas war möglich. Die Forschungsfragen wurden schließlich von den Lernenden selbst im Seminar ausformuliert.

Der Seminar-Aufbau orientierte sich an den neun Forschungsschritten aus Sonntag et al. (2018) (vgl. Abb. 8) und war wie folgt aufgebaut:

- a) Zwei jeweils halbtägige Einführungsveranstaltungen zum inhaltlichen „Einstieg ins Forschungsfeld“ (Schritt 1 in Abb. 8), also der theoretischen wie praktischen Heranführung an das Thema „Sanitär- und Nährstoffwende“ mit spielerischem Kennenlernen der Gruppe und des Themas, mit einer Exkursion ins zirkulierBAR-Reallabor in Eberswalde sowie mit einer Vorlesung zum Nexus Siedlungswasserwirtschaft und Nahrungsmittelproduktion.
- b) Fünftägige Blockwoche zur Entwicklung der Forschungsfrage und des Forschungsdesigns (Schritte 2–6 in Abb. 8): Vorstellung und Auswahl der Forschungsthemen, Impulsvorträge von Expert:innen aus zirkulierBAR zu den verschiedenen Forschungsmethoden, Gruppenbildung, Formulierung der Forschungsfragen, Recherche zur eigenen Fragestellung, Entwicklung der Methodik und des Forschungsdesigns, Planung der Forschungsarbeit und nächsten Schritte.
- c) Freie Forschungsphase über ca. sechs Wochen mit dreimaligem Online-Check-in: Studierende setzen ihr Forschungsdesign um und bereiten Ergebnisse auf (Schritte 7–8 in Abb. 8), Möglichkeit für kollegialen Austausch unter den Studierenden sowie zur Klärung möglicher Fragen zum Forschungsprozess mit dem Seminarteam.

d) Halbtägige Abschlussveranstaltung: Präsentation der Ergebnisse als öffentliche Veranstaltung (Schritte 8–9 in Abb. 8), anschließend seminarinterne Reflexion des Forschungsprozesses, des Seminarablaufs und der individuellen Lernprozesse.

(Für ausführliche Moderationspläne zu jedem Tag, siehe Wissensplattform: www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch)

Als Prüfungsleistung wurde die Prüfungsform Portfolio gewählt. Sie setzte sich zusammen aus einer Abschlusspräsentation (als Gruppe, 70 Prozent der Endnote) und dem Forschungstagebuch (individuell, pro Person, 30 Prozent der Endnote). Das Forschungstagebuch konnte frei gestaltet werden und sollte auf 5–10 Seiten eine Reflexion des eigenen Forschungsprozesses¹⁵ und der Gruppenarbeit¹⁶ beinhalten. Zur Reflexion gehörte eine Beschreibung des Prozesses inklusive Highlights, Meilensteinen, Stolpersteinen, Richtungsänderungen und offener Fragen.

Good Practices – Was hat sich im Seminar besonders bewährt?

Der Seminarablauf wurde metaphorisch als gemeinsamer Weg gezeichnet, bei dem die Teilnehmenden und die Leitung gemeinsam in einen Fahrradbus steigen. Das Seminarteam definierte sich als Busfahrerinnen, die die Lernenden während der Einführungsveranstaltungen und der Blockwoche zu verschiedenen Stationen bringen. Hier sollen die Teilnehmenden möglichst viel Wissen und Methoden einsammeln, die ihnen als Landkarten und Werkzeuge zum Forschen dienen. Nach der Blockwoche begeben sich die Gruppen – gut ausgestattet – auf ihre eigene Forschungsreise. Sie setzen ihr Forschungsdesign um und treffen sich regelmäßig an den „Check-in“-Haltestellen wieder. Die Reise endet mit der Abschlusspräsentation.

Mit diesem Bild ließen sich sowohl der Seminarablauf als auch die Rolle der Leitung als Wechselspiel aus begleitetem und freiem Arbeiten klar kommunizieren. Die Teilnehmenden fühlten sich so nicht allein gelassen, sondern als Gruppe.

An der HNEE ist das Format „Blockwoche“ fester Bestandteil im Vorlesezeitraum. In dieser Woche gibt es ein vielfältiges

15) Leitfrage: Wie hat mich das Seminar dabei unterstützt, meine eigenen Fähigkeiten und Kompetenzen besser kennenzulernen und diese zu erweitern?

16) Leitfragen: Wie war die Gruppenarbeit für mich? Was ist besonders gut gelaufen? Warum? Wo gab es Herausforderungen? Was konnte ich beitragen, um diese zu überwinden?

hochschulweites Angebot an Seminaren. Reguläre Veranstaltungen wie Vorlesungen oder Übungen finden nicht statt. Die Eingliederung des Seminars in die Blockwoche ermöglichte es, eine Woche am Stück intensiv am Thema zu bleiben und die Studierenden Schritt für Schritt durch den Forschungszyklus zu begleiten – bis hin zur Erstellung des Forschungsdesigns. Anschließend waren die Gruppen bereit, selbstorganisiert und begleitet durch Treffen mit Expert:innen sowie regelmäßige Check-ins weiterzuforschen.

Mehr als eine Prüfungsleistung: das Forschungstagebuch: Während des gesamten Seminars gab es Zeit für Reflexion, in der die Studierenden Erkenntnisse, Fragen und Gedanken notierten. So wurden sie motiviert, ihren Forschungsprozess fortlaufend zu reflektieren und daraus zu lernen. Aus den Notizen entstand das Forschungstagebuch. Anhand des Buches konnte die Seminarleitung den Reflexionsprozess der Studierenden nachvollziehen und die Prüfungsleistung nicht nur ergebnisorientiert bewerten, sondern auch prozessorientiert. Darüber hinaus helfen die Forschungstagebücher dabei, das Seminar ständig weiterzuentwickeln und zu verbessern. Sie geben Aufschluss darüber, was die Teilnehmenden besonders schätzten und was ihnen vielleicht gefehlt hat.

Um die Gruppenbildung und den Kennenlernprozess der Studierenden zu unterstützen, reflektierten die Gruppen in einer frühen Seminareinheit zu folgenden Leitfragen: Was brauchst du, um gut arbeiten zu können? Was können wir als Gruppe tun, um den Bedürfnissen gerecht zu werden? Wie können wir die Einhaltung und Justierung dieser Maßnahmen sicherstellen? Die Gruppen erarbeiteten und definierten auf dieser Grundlage eigene Maßnahmen zur Gruppenarbeit. Diese Seminareinheit wurde von vielen Teilnehmenden als wichtig und sinnvoll empfunden.

Um in das Forschungsfeld „eintauchen“ zu können, wurden an vier verschiedenen Thematischen wissenschaftliche Artikel,

Fachbücher und Infografiken bereitgelegt. Während einer Stunde konnten die Studierenden von Tisch zu Tisch gehen, sich zu allen Themen einen Überblick verschaffen oder in ein Thema vertiefend einsteigen. Das geschah entweder still, für sich lesend oder im Austausch mit anderen. Darüber hinaus gab es Impulsvorträge, in denen Forschende aus zirkulierBAR Fachinhalte vermittelten. Hier wurden vor allem Forschungsmethoden vorgestellt, um die Forschungsfragen beantworten zu können. Neben der Vermittlung interdisziplinärer Inhalte und Methoden gaben die Impulsvorträge den Lernenden auch einen Einblick in das Arbeitsfeld der forschenden Projektmitarbeitenden und schafften so eine Verbundenheit mit dem Forschungsprojekt.

Vor jeder Einleitung eines neuen Forschungsschrittes bietet es sich an, kurz und knapp mit den Studierenden darüber zu reflektieren, weshalb dieser Forschungsschritt relevant ist. Beim Forschungsschritt 4 „Methoden aneignen und auswählen“ wurde beispielsweise die Frage gestellt „Wozu brauchen wir Methoden?“ Die Diskussion der Studierenden wurde stichpunktartig an einem Flipchart mitdokumentiert. Es wurden konkrete Methoden vorgestellt (wie Laboranalyse oder Interviews) und die übergeordnete Zwecke der Methoden erläutert (wie Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit).

Zum Abschluss der Blockwoche gab es eine Zwischenpräsentation. Mittels eines Forschungsposters veranschaulichten die Studierenden ihre Forschungsdesigns. Die Poster waren händisch gezeichnet und sollten den geplanten Forschungsprozess strukturiert zusammenzufassen. Im Entstehungsprozess konnten die forschenden Kleingruppen noch offene Punkte identifizieren und klären. Die Poster dienten auch der Präsentation gegenüber anderen Kleingruppen. So konnte die Blockwoche mit einem Poster-Walk beendet werden und alle Teilnehmenden waren darüber informiert, woran die einzelnen Gruppen in der selbstorganisierten Forschungsphase arbeiten.

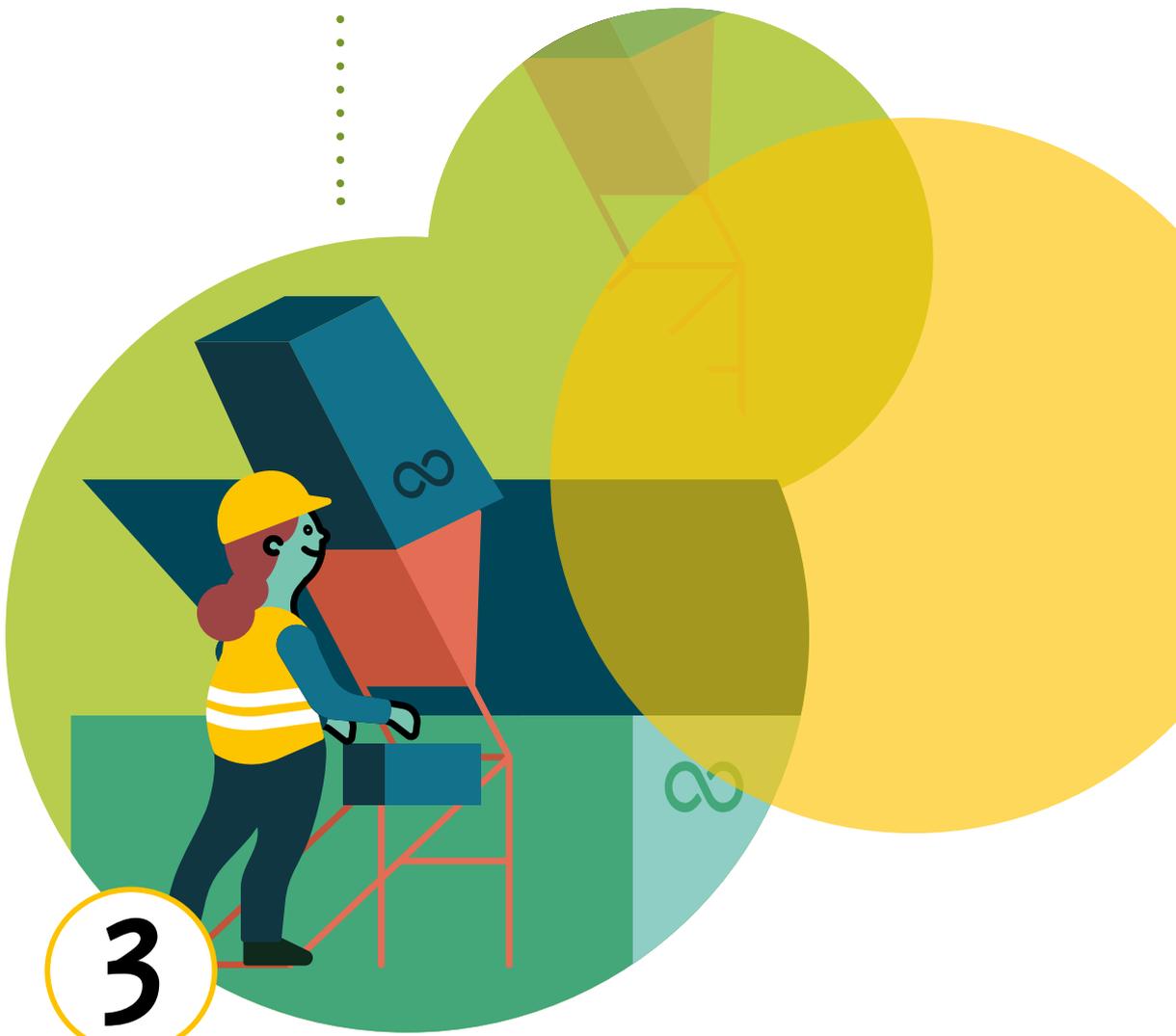
Durch die Integration des „forschenden Lernens“ in einem Forschungsprojekt konnten Studierende vielfältige Kompetenzen entwickeln, die für die akademische Bildung relevant sind.

Komplexe Sachverhalte werden so verständlich und greifbar. Studierende können nicht nur die Relevanz von aktuellen Konzepten (z. B. *Planetary Boundaries*) inklusive technischer, ökologischer und sozialer Herausforderungen benennen, sondern auch Ansatzpunkte für die Transformation aufzeigen. Darüber hinaus erleben die Teilnehmenden die Besonderheiten, Chancen und Herausforderungen der inter- und transdisziplinären Zusammenarbeit und erwerben neue Fertigkeiten (u. a. ein breites Spektrum an fachspezifischen Methoden). Sie lernen, Strategien zu entwickeln, um wissenschaftliche Inhalte zu verstehen, Informationen systematisch zu erfassen und in die eigene Forschungsarbeit zu transferieren. Nicht zuletzt entwickeln die Studierenden auch ihre Sozialkompetenz, indem sie Gruppenarbeiten so aufsetzen, dass die Ziele des Seminars erreicht werden und gleichzeitig die Fähigkeiten und Bedürfnisse der einzelnen Teammitglieder berücksichtigt sind.

Aus diesen Erfahrungen heraus empfehlen wir es, Studierende durch ein „Forschendes-Lernen-Seminar“ an Forschungsprojekten mitwirken zu lassen und ihnen so auch einen Einblick in die Arbeit von Wissenschaftler:innen zu geben.



Abbildung 9
 Metaphorische Beschreibung des Seminarablaufs
 durch eine gemeinsame Reise als Fahrradbus



3

Kapitel

Sanitär- und Nährstoffwende in der Praxis

Von der Sammlung über die Verwertung bis hin zur Düngung

69

Sanitär- und Nährstoffwende
in der Praxis

3.1

Ressourcen aus der Schüssel als Schlüssel?

Trockentrenntoiletten auf dem Prüfstand

Welche Umweltwirkungen hat eine Trockentrenntoilette im Vergleich zur Wasserspültoilette?

Autor: Gero Scheck

Neben technischen und ökonomischen Unterschieden haben Trockentrenntoiletten (TTT) einen besseren ökologischen Fußabdruck als Wasserspültoiletten (WST). Um Erkenntnisse über den ökologischen Fußabdruck von TTT-Systemen gewinnen und diese mit den Umwelteffekten des WST-Systems vergleichen zu können, wurden im Projekt zirkulierBAR verschiedene Studien in einer Metaanalyse¹⁷ analysiert. Bei den Studien handelt es sich um sogenannte Lebenszyklusanalysen. Ziel solcher Studien ist es, die ökologischen Effekte zu erfassen, die ein Produkt während seines gesamten Lebenszyklus erzeugt. Die Grenzen des Systems sind dabei so zu wählen, dass alle ökologischen Effekte berücksichtigt werden, die spezifisch für das betrachtete Produkt sind.

Die Wertschöpfungskette von TTT-Systemen unterscheidet sich stark vom aktuell vorherrschenden System der Wasserspültoiletten. Die Unterschiede reichen von der Art der Toilette über den Transport und die Handhabung der Fäkalien bis hin zur Ausbringung des Düngers, dessen Ausgangsstoffe im TTT-System gewonnen werden. Um sämtliche Umwelteffekte eines alternativen Sanitärsystems zu betrachten, wurden für die Metaanalyse nur Studien ausgewählt, die das komplette System analysieren – von der Toilette bis zur Düngung.

In der Metaanalyse wurden die Studien mit Blick auf sechs Umweltkategorien untersucht: Erderwärmungspotenzial, Eutrophierungspotenzial, Versauerungspotenzial, Energieverbrauch, Wasserverbrauch und Ökotoxizität.

Das Erderwärmungspotenzial eines Prozesses ergibt sich aus den freigesetzten Treibhausgasen. Die einzelnen Treibhausgase



17) Gero Scheck (2023) „Meta-Analyse von Life-Cycle-Assessments zu Toiletten mit Stoffstromtrennung“. Die Studie findet sich hier: www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch

haben unterschiedlich starke Treibhauseffekte. Um sie in ihrer Klimawirkung trotzdem miteinander vergleichen zu können, wird ihre Masse in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Ausschlaggebend für das Erderwärmungspotenzial von Toiletten-Systemen sind die Treibhausgase Kohlendioxid und Methan. Während CO₂ vor allem bei energieintensiven Prozessen durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen freigesetzt wird, entstehen Methan-Emissionen, wenn Fäkalien oder Klärschlamm ausgasen. Methan hat in der Atmosphäre eine vielfach stärkere Treibhauswirkung als Kohlendioxid und stellt ein Risiko des TTT-Systems dar. In den Fäkalien ablaufende mikrobielle Prozesse führen zur Ausgasung von Methan. Dieser Gasverlust lässt sich jedoch durch eine sachgemäße Behandlung minimieren – z. B. durch Zuführen von ausreichend Sauerstoff bei der Kompostierung.

Da TTT-Systeme Kläranlagen entlasten, können der Energieverbrauch in den Anlagen gesenkt und damit verbundene CO₂-Emissionen eingespart werden. CO₂-Emissionen lassen sich auch durch den gewonnenen Dünger einsparen, da weniger synthetischer Dünger produziert werden muss. In der Summe besitzen TTT ein um 30 bis 50 Prozent geringeres Erderwärmungspotenzial als WST.

Das Eutrophierungspotenzial eines Prozesses ergibt sich aus dem ungewollten, schädlichen Eintrag von Nährstoffen in ein Ökosystem. Beim System der Wasserspültoiletten gelangen Nährstoffe aus den Fäkalien ins Abwasser. Selbst nach der Aufbereitung in der Kläranlage verbleiben noch Rückstände davon im Wasser und gelangen über den Kläranlagenablauf in die Vorfluter. Dieses Eutrophierungspotenzial lässt sich reduzieren, indem man die Fäkalien vom Abwasser trennt. Wie die untersuchten Studien zeigen, lassen sich die Nährstoffe so um 50 bis 85 Prozent reduzieren – je nachdem, wie effektiv die Kläranlage Nährstoffrückstände entfernt.

Das Versauerungspotenzial eines Prozesses ergibt sich aus der Einleitung von Stoffen mit niedrigem pH-Wert in die Umwelt. Das Versauerungspotenzial von WST-Systemen ist im Allgemeinen sehr gering. Der Einsatz von Chemikalien zur Urinaufbereitung – wie bspw. Natriumphosphat bei der Struvitfällung oder Schwefelsäure bei der Gewinnung von Ammoniumsulfat – kann dazu führen, dass sich das Versauerungspotenzial von TTT-Systemen

erhöht. Berücksichtigt man bei der Wahl des Aufbereitungsverfahrens das Versauerungspotenzial, ist aber auch ein TTT-System mit sehr geringem Versauerungspotenzial möglich.

Ökotoxizität beschreibt die Einbringung von giftigen Stoffen in ein Ökosystem. Dazu zählt auch der Eintrag von Arzneimitteln, die bei Wasserspültoiletten über den Urin ins Abwasser gelangen. Durch die separate Urinbehandlung im TTT-System lässt sich dieser Eintrag um bis zu 90 Prozent senken. Ersetzt man schließlich synthetisch produzierten Dünger durch organischen, lässt sich auch der Eintrag von Schwermetallen in den Boden um bis zu 85 Prozent senken.

Der Energieverbrauch von TTT-Systemen verhält sich analog zum Erderwärmungspotenzial. Das mögliche Einsparpotenzial beläuft sich auf 30 bis 70 Prozent.

Der Wasserverbrauch wurde nur in wenigen Studien quantifiziert. Diese kommen jedoch einheitlich zu dem Ergebnis, dass ein TTT-System den Wasserverbrauch erheblich senken kann. Im Reallabor wurden diese Verbräuche im Pilotversuch näher betrachtet und werden im Folgenden konkretisiert.

Wie viel Wasser und Energie sparen Trockentrenntoiletten im Vergleich zur Wasserspültoilette?

Autorin: Elsa Jung

Der größte Unterschied zwischen beiden Sanitärsystemen liegt im Wasserverbrauch. So erfordert die Sammlung menschlicher Ausscheidungen in Trockentoiletten keine Wasserspülung. Für die Bewässerung der Kompostmieten im nachfolgenden Rotteprozess wird dann wiederum Wasser benötigt. Aus der letzten Stufe der Urinaufbereitung können ca. 90 Prozent des Wassers im nitrifizierten Urin durch Destillation zurückgewonnen und für die Kompostbewässerung genutzt werden. Mit der Herstellung von Recyclingdüngern aus Trockentoiletteninhalten lassen sich gegenüber der wassergebundenen Entsorgung theoretisch mehr als 12.000 Liter Trinkwasser pro Einwohner:in und Jahr einsparen.



Auch der Energieverbrauch unterscheidet sich in beiden Sanitärsystemen. Die Aufbereitung der Inhalte aus Trockentoiletten benötigt im Schnitt ca. 65 kWh pro Einwohner:in und Jahr. Den größten Anteil daran (etwa 40 kWh/E*a) hat die Verdampferstufe am Ende der Urinaufbereitung (Bahrs, 2022). Diese Daten beziehen sich auf den zirkulierBAR-Prototypen mit Technologiereifegrad 7 (siehe Kapitel 3.2). Das heißt, bei weiteren Optimierungsschritten der Anlagenauslegung und -skalierung sind noch Skalierungseffekte durch höhere Behandlungsmengen zu erwarten. Zudem lässt sich der Strombezug (je nach Standort) senken, indem die Container zur Urinaufbereitung mit einer autarken Photovoltaik-Anlage auf dem Dach ausgestattet werden. Das gewährleistet (neben der Beschattung) eine regenerative Stromversorgung. Im Vergleich zur Aufbereitung der Trockentoiletteninhalte verbraucht die synthetische Herstellung einer äquivalenten Menge an Stickstoff und Kaliumoxid in Verbindung mit einer Phosphatrückgewinnung aus Klärschlamm-Asche mithilfe des sogenannten Ash-Dec-Verfahrens 14 kWh/E*a im Mittel. Hinzu kommt der Energieverbrauch der Wasseraufbereitung selbst, der bei modernen Kläranlagen mindestens 20 kWh/E*a beträgt und vor allem durch die energieintensive Stickstoffentfernung in Kläranlagen getrieben wird.

Eine für die Region Paris durchgeführte Lebenszyklusbetrachtung ergab ebenfalls, dass die Düngemittelproduktion mit dem Vuna-Prozess verglichen zum konventionellen Verfahren mit zentraler Abwasserreinigung und Kunstdüngerproduktion derzeit noch mehr Energie bedarf, je nach Stromerzeugungsart trotzdem zu weniger CO₂-Emissionen führen kann (Martin et al., 2023).

Was sind die institutionellen Fragen und Lösungen zu öffentlichen Trockentrenntoiletten?

Autor:innen: Nils Bieschke, Kai Lennart Feskorn, Christian von Hirschhausen, Gero Scheck, Greta Sundermann

Ressourcenorientierte Sanitärsysteme (ROSS) sind ein innovativer und umweltfreundlicher Ansatz, da sie menschliche Ausscheidungen als wertvolle Ressource betrachten. Verarbeitet zu Recyclingdünger lassen sich mit den Ausscheidungen regionale Nährstoffkreisläufe (zumindest teilweise) schließen. Vor diesem Hintergrund ist es ebenso zukunfts- wie richtungweisend,

öffentliche Sanitäranlagen ressourcenorientiert zu gestalten. Dem Nutzungspotenzial von ROSS stehen jedoch einige Hindernisse gegenüber. Neben regulatorischen Hürden mangelt es an Wissen über institutionelle Lösungen zum Aufbau öffentlicher Trockentrenntoiletten (TTT). Der folgende Beitrag soll Abhilfe schaffen und einen ersten Einblick in institutionelle Fragen beim Aufbau öffentlicher TTT geben. Juristische Überlegungen zur rechtlichen Umsetzbarkeit sind dabei nicht mit eingeflossen.

Für die Betrachtungen wird ein vereinfachtes technisches System mit drei Teilsystemen angenommen: „Angebot von TTT im öffentlichen Raum“, „Transport“ und „Aufbereitung bzw. Recycling und Vertrieb“.

Auch die Betrachtung aus institutioneller Sicht gründet auf einem vereinfachten System: Ihr Fokus liegt auf der öffentlichen Sanitärversorgung in einer einzelnen Kommune. Koordinationsfragen zwischen Kommunen und zuständigen Ebenen im föderalen System sind somit ausgeklammert. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass es innerhalb einer Kommune bereits eine politische Mehrheit für den Aufbau eines ressourcenorientierten öffentlichen Sanitärsystems in Form von Trockentrenntoiletten gibt. Der Beitrag illustriert verschiedene institutionelle Lösungsoptionen und zeigt deren zentrale Gestaltungsparameter auf. Im Kern geht es um eine effektive und effiziente Bereitstellung einer öffentlichen ROSS mittels TTT mit anschließender Aufbereitung von Urin und Fäzes und der Herstellung von Recyclingdünger.

Entsprechende institutionelle Lösungen müssen vor allem sicherstellen, dass das System die zu versorgende Fläche vollständig abdeckt und die Kapazität der Trockentrenntoiletten und Verwertungsanlagen für den Bedarf auch ausreicht. Darüber hinaus gibt es weitere Aspekte zu berücksichtigen wie Anforderungen im Bereich der Hygiene (Sauberkeit und Infektionsschutz), Barrierefreiheit und Sicherheit bei der Nutzung der Toiletten, diverse Umweltziele sowie die Notwendigkeit, die gesammelten Reststoffe auch zu verwerten. Die nachfolgenden Betrachtungen setzen voraus, dass neben einem umsetzbaren technischen System auch ein Absatzmarkt existiert, um den Recyclingdünger für landwirtschaftliche Zwecke zu nutzen. Dabei sollte weder der Verkauf des Recyclingdüngers die Kosten des Systems (re-)finanzieren müssen noch die Nutzungsgebühr der Toiletten.

ROSS als Beschaffungsaufgabe für Kommunen

Institutionelle Lösung „freier Markt“: Gerade mit Blick auf fehlende „marktliche“ Möglichkeiten zur Refinanzierung des Systems dürfte eine institutionelle Lösung „freier Markt“ nicht zu einem Aufbau von ROSS im öffentlichen Bereich führen. Selbst wenn ergänzend umfangreiche Subventionen an die Anbietenden fließen würden, dürfte diese Lösung nachteilige Fehlanreize bieten. So könnten Gebiete mit einer geringen Nachfragedichte gemieden und TTT überwiegend in Gebieten mit hoher Nachfragedichte betrieben werden. Die Anbietenden wären verleitet, Skaleneffekte durch hohe Nutzendenzahlen sowie Dichteeffekte im Betrieb und Transport zu realisieren. Trotz einer möglichen Subventionierung ließe sich so voraussichtlich kein flächendeckendes System aufbauen – was aber Ziel einer institutionellen Lösung sein sollte.

Institutionelle Lösung „kommunale Eigenerstellung“: Kommunen haben die Möglichkeit, ein ressourcenorientiertes Sanitärsystem auch völlig eigenständig zu etablieren. Diese Lösung setzt allerdings entsprechendes Wissen voraus. Da dieses (sehr umfangreiche) Wissen in der Regel nicht vorliegt, müssen es sich die zuständigen kommunalen Stellen entweder kurzfristig aneignen oder die Kommune muss sich – zumindest übergangsweise – Expertise von außen einkaufen (in Form von Fachkräften und Beratern).

Institutionelle Lösung „Bereitstellungsverantwortung“: Eine dritte Lösung sieht so aus, dass Kommunen die Bereitstellungsverantwortung für ein ROSS übernehmen. Der lokalen Kommune obliegt also die grundsätzliche Bereitstellungsentscheidung. Darüber hinaus entscheidet sie, welche (Teil-)Aufgaben sie selbst übernimmt und welche Aufgaben(-bündel) durch private oder öffentliche Akteur:innen erfolgen sollen. Eine solche institutionelle Lösung kann aus Sicht der lokalen Kommune auch als eine „Beschaffungsaufgabe“ (im Sinne der Umsetzung der Bereitstellungsentscheidung) eingeordnet werden.

Zentrale Gestaltungsoptionen bei der Beschaffungsaufgabe für Kommunen

Für die Beschaffung durch die Kommune gibt es verschiedene Gestaltungsgebiete und -optionen. Ein erstes Gestaltungsgebiet stellt die Governance-Form für (längerfristige) Transaktionen dar.

Abbildung 11
Gestaltungselemente



Hierzu zählt insbesondere die „Make-or-buy“-Frage. Die Kommune hat dabei zu entscheiden, welche (Teil-)Aufgaben in Eigenerstellung erfolgen sollen („make“) und welche (Teil-)Aufgaben durch Dritte übernommen werden sollen („buy“). Ein zweites Gestaltungsgebiet ist der Leistungsumfang und damit die Frage der (Output-)Ebene, auf der eine Transaktion stattfindet. Hier ist zu entscheiden, inwiefern die Aufgabe gebündelt erfolgen soll („Bundling“) oder ob und in welchem Umfang die Gesamtaufgabe in Teilaufgaben unterteilt wird, für die dann die entsprechende Leistung zu erbringen ist („Unbundling“). Das dritte Gestaltungsgebiet ist das Vertragsdesign zwischen der beschaffenden Kommune (als Prinzipal) und möglichen Anbietenden (als Agent:innen). Zwischen den genannten Gestaltungsgebieten bestehen diverse Interdependenzen, die bei der Ausgestaltung der Beschaffungsaufgabe zu beachten sind. Da in diesem Beitrag

keine umfassende Analyse erfolgen kann, wird nachfolgend eine Konstellation angenommen, bei der ein Unbundling zwischen den Aufgaben „Angebot von TTT im öffentlichen Raum“, „Transport“ und „Recycling/Aufbereitung und Vertrieb“ erfolgt, während innerhalb dieser Aufgaben jeweils alle Teilaufgaben gebündelt werden. Um mögliche Gestaltungsoptionen im Vertragsdesign betrachten zu können, wird außerdem ausgeschlossen, dass eine Aufgabe vollständig in Eigenerstellung durch die Kommune erfolgt. Die in dieser Konstellation bestehenden Gestaltungsoptionen werden nachfolgend exemplarisch für die Aufgabe „Angebot von TTT im öffentlichen Raum“ skizziert.

Zu den zentralen Gestaltungselementen (siehe Abbildung 11) bei langfristigen (Infrastruktur-)Verträgen gehören der Umfang und die spezifischen Leistungen (Outputs), die Vergütungsregel (V-Regel) und Risikoallokation (RA), das Nachverhandlungsdesigns (NV-Design), die Ausgestaltung von Finanz- und Vergütungsflüssen (FVF) und der Kapitalaufnahme (KA). Relevant ist darüber hinaus auch die Agenten-Auswahl (AA) und die Festlegung der Vergütungshöhe (VHF).

(I.a) Umfang: Im Mittelpunkt der Vertragsgestaltung steht zunächst die Zuweisung von Entscheidungsrechten. Hier geht es um die Frage, welche (Bereitstellungs-)Entscheidungen von der Kommune und welche von den Anbietenden getroffen werden sollen. Besonders bedeutsam sind Entscheidungen bezüglich Standortwahl, Kapazitäten, Qualität, Vergütung, Preisgestaltung, Planung und Genehmigungen. Der Vertragsumfang wird durch drei Dimensionen definiert: den *Aufgabenbereich*, die *Ausdehnung* und die *Laufzeit*.

Diese Dimensionen bestimmen den sachlichen, räumlichen und zeitlichen Rahmen des Vertrags. Der *Aufgabenbereich* bezieht sich auf Entscheidungen hinsichtlich Funktionalität, Design, Qualität und Genehmigung von Trockentrenntoiletten. Das beinhaltet auch Entscheidungen im Zusammenhang mit der Lagerung von Urin und Fäzes innerhalb der TTT. Die *Ausdehnung* bezieht sich auf die gewünschte Kapazitäts- und Flächenabdeckung der TTT, wobei die Standortwahl im Fokus steht.

(I.b) Output/Leistung: Eine adäquate Leistungs- bzw. Output-Beschreibung ist eine der zentralen Herausforderungen für die Kommune. Mit Blick auf das Vertragsdesign ist zu klären, inwiefern eine umfassende und ausreichend konkrete Leistungsbeschreibung überhaupt möglich ist. Dies wird maßgeblich bedingt durch die Fähigkeit, die Angebots-, Substanz- und Servicequalität des Leistungsgegenstands beschreiben und messen zu können (Kontrahierbarkeit). Zusätzlich sind Regelungen für den Umgang mit den für die Bereitstellung des Systems notwendigen Anlagegütern am Ende des Vertrages festzulegen und damit zu klären, ob und wie diese nach Vertragsende weiterverwendet oder rückgebaut bzw. entsorgt werden sollen. Bei einer Weiterverwendung ist im Vertrag eine Methodik für die Ermittlung des „Übergabewertes“ vorzusehen.

(I.c) Vergütungsregel und Risikoallokation: Grundsätzlich lassen sich zwei idealtypische Anreizsysteme zur Vergütung und Risikoallokation zwischen der Kommune und den Anbietenden unterscheiden: das festpreisbasierte Anreizregime (FP-AR) und das monitoringbasierte Anreizregime (FP-AR). Beim festpreisbasierten Anreizregime muss die Kommune vorab die Leistung (inkl. der Qualität) hinreichend genau und konkret beschreiben und anschließend auch messen können, um anschließend einen Festpreis für die zu erbringende Leistung festzulegen. Im Gegensatz dazu basiert das monitoringbasierte Anreizregime darauf, dass die Kommune die Aktivitäten der Unternehmen (begleitend oder nachträglich) prüft und anschließend entstandene (Selbst) Kosten des Unternehmens erstattet. Dafür muss die Kommune allerdings über das notwendige (Input-)Wissen verfügen, um die entstandenen Kosten adäquat prüfen zu können. Neben diesen idealtypischen Ansätzen existieren noch Mischformen. Die Gestaltung der Vergütungsstruktur ist eng mit der Zuordnung von Risiken verbunden. Dabei sind stets die Kosten, die bei einer Risikoübertragung an das Unternehmen entstehen und zu vergüten sind, mit den möglichen positiven Anreizwirkungen daraus abzuwägen.

(I.d) Nachverhandlungen: Das Vertragsdesign sollte berücksichtigen, dass es auch zu Nachverhandlungen kommen kann. Befinden sich technische Systeme z. B. noch in der Entwicklung, ändert sich mit ihnen auch der entsprechende Wissensstand, was in der Zukunft unter Umständen vorteilhaftere institutionelle Lösungen ermöglicht. Ein relevanter Punkt können daher sogenannte Call-Optionen sein, die es der Kommune ermöglichen, bestimmte Leistungen eines Unternehmens zu einem späteren Zeitpunkt doch selbst zu übernehmen.

(I.e) Finanz- und Vergütungsflüsse und Kapitalaufnahme: Im Rahmen des Vertragsdesigns stellt die Gestaltung der Finanz- und Vergütungsflüsse sowie der Kapitalaufnahme ein weiteres wesentliches Element dar. Eng damit verknüpft ist die Frage nach den Einnahmemöglichkeiten für die Unternehmen, was auch die mögliche Finanzierung durch eine Nutzungsgebühr für die Toiletten beinhaltet. Ebenso bedeutsam ist die Ausgestaltung der Vergütungsregel, der Risikoallokation sowie der Kapitalaufnahme. Mit Blick auf die Kapitalaufnahme ist z. B. zu klären, ob diese durch die Kommune oder das Unternehmen erfolgen soll. Zu beachten sind hierbei mögliche Unterschiede in den Kapitalkosten (im Sinne von „Cost of Capital“) der Akteur:innen sowie die Relevanz von Kapitalkosten an den Gesamtkosten der Aufgabe. Im Zusammenhang mit der Kapitalaufnahme stellt sich schließlich die Frage, wessen Eigentum die Assets sind.

(II) Auswahl der Anbietenden und Festlegung der Vergütungshöhe: Ergänzend zum Vertragsdesign steht die Kommune vor der Aufgabe, Unternehmen auszuwählen und deren Vergütung festzulegen. Im Rahmen eines FP-AR könnte die Auswahl über eine Ausschreibung erfolgen, die für eine bestimmte Dauer (bspw. mehrere Jahre) angelegt ist. Bei einem M-AR hingegen wäre die Vorlage eines umfassenden Konzepts inklusive der Höhe der erwarteten Selbstkosten der Unternehmen ausschlaggebend für die Auswahl durch die Kommune.

3.2

Aus „Pfui“ wird „Hui“

Verwertung von Inhalten aus Trockentoiletten

Planung der Recyclinganlage

Was sind die wichtigsten Planungsschritte vor Errichtung der Anlagen?

Autoren: Carsten Beneker und Christian Vahrson

Für den Aufbau der Forschungsanlage galt es zunächst eine geeignete Fläche zu identifizieren. Nach einer anschließenden, etwa 6-monatigen Ingenieurplanung wurde in Abstimmung mit den Behörden der Bauantrag gestellt.

Bei der Standortsuche fiel die Wahl auf eine ca. 1.000 Quadratmeter große Fläche auf dem Betriebsgelände der Kreiswerke Barnim (KWB). Das Areal befindet sich im Besitz des Landkreises Barnim. Der bestehende Bebauungsplan beinhaltet explizit „*Flächen zur Erprobung zukünftiger Technologien der regenerativen Energiegewinnung*“, worauf sich der Bauantrag dann bezog. Der Antrag wurde genehmigt, obwohl dem Satzungstext nicht spezifisch als Energieerzeugungsanlage, zumindest aber sinngemäß als Pilotanlage zukünftiger regenerativer Technologien entsprochen wurde. Auf eine Änderung des Bebauungsplans wurde aus Zeitgründen verzichtet.

Zuständige Behörden

Das Betreiben einer Behandlungs- und Verwertungsanlage für menschliche Ausscheidungen trifft in Deutschland auf einen lückenhaften und nicht eindeutigen Rechtsrahmen (siehe Kapitel 2.2). Für die kommunale Verwaltung ergibt sich daraus zunächst die Herausforderung, Zuständigkeiten zu klären. Da es sich im vorliegenden Projekt um einen Neubau handelt, wurde die untere Bauaufsichtsbehörde der Stadt Eberswalde als verfahrensführende Behörde identifiziert. Sie zog weitere Behörden für fachliche Stellungnahmen hinzu wie die untere Abfallwirtschaftsbehörde, die untere Bodenschutzbehörde, den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger, die untere Wasserbehörde und die brandenburgische Düngemittelverkehrskontrolle.



Eine Vor-Ort-Besichtigung aller Beteiligten trug sehr zum besseren Verständnis des Innovationsvorhabens bei.

Der Titel des Bauantrags lautete „*Neubau einer Forschungsanlage zur Erprobung und späteren Zulassung von Recyclingdünger aus Inhalten von Trockentoiletten inkl. Nebenanlagen befristet für 3 Jahre*“. Der Antrag wurde nach § 64 BbgBO bei der zuständigen Bauaufsichtsbehörde eingereicht. Die Befristung ergibt sich aus der unsicheren Perspektive, die erzeugten Produkte über die Projektlaufzeit hinaus in Verkehr bringen zu dürfen. In der Baugenehmigung wurde das Vorhaben als abfallrechtliche Anzeige gemäß § 35 Abs. 4 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) in Verbindung mit § 15 Abs. 1 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) eingestuft. Die Genehmigung wurde gemäß § 72 der Brandenburgischen Bauordnung (BbgBO) erteilt. Weitere Genehmigungen waren nicht erforderlich. Allerdings stellten die Behörden als besondere Anforderung die kontrollierte Flächenentwässerung mit mobiler Schmutzwasserbeseitigung über die kommunale Kläranlage.

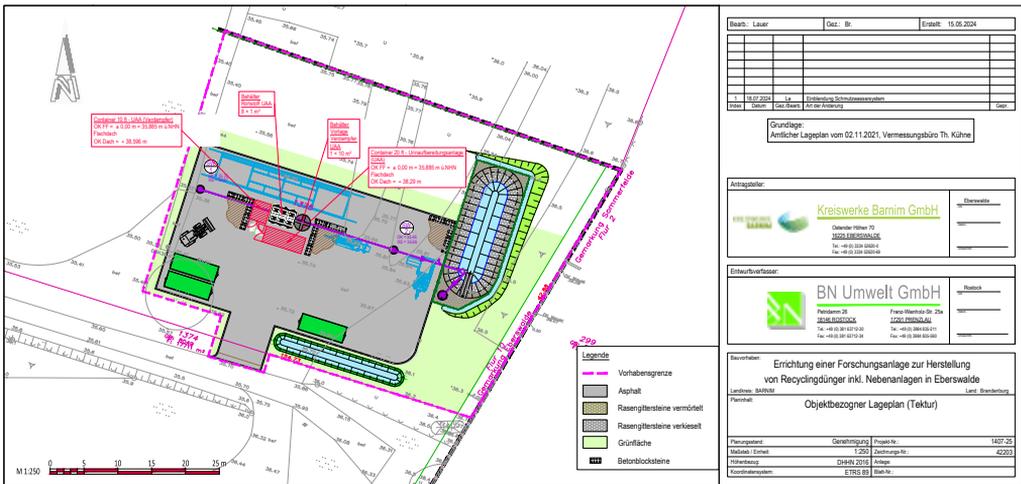


Abbildung 12
Objektbezogener Lageplan der zirkulierBAR
Forschungsanlagen (BN Umwelt)

Mit der Anzeige des Baubeginns waren Nachweise über Stand-
sicherheit, Brandschutz sowie Schall- und Erschütterungsschutz
vorzulegen. Das galt sowohl für das Humusregal als auch für
den Container der Urinaufbereitungsanlage.

Genehmigung

Um die auf den Flächen produzierten Erzeugnisse abnehmen und
den Bauantrag genehmigen zu können, war es für das Umwelt-
amt entscheidend, dass Bau und Betrieb der Anlage Teil eines
Forschungsvorhabens waren. In diesem Kontext ist es wichtig,
den Experimentalcharakter und die Befristung des Vorhabens
auch im Titel des Bauvorhabens deutlich darzustellen. Die Bear-
beitung des Bauantrags bis hin zur Genehmigung dauerte über
ein Jahr. Das war vor allem zurückzuführen auf den innovativen
Charakter des Reallabors, den dafür (noch) nicht ausgelegten
Rechtsrahmen sowie auf die Klärung von Zuständigkeiten.

Abfallschlüsselnummer

Es wurde keine Abfallschlüsselnummer (ASN) für die Inhalte von
Trockentoiletten (TT) durch die untere Abfallwirtschaftsbehörde
festgesetzt (zirkulierBAR empfiehlt AVV 20 03 99, vgl. Kapitel 2.2).
Allerdings wurde der produzierte Kompost als „*nicht spezifika-
tionsgerechter Kompost*“ mit ASN 19 05 03 als Abfall klassifiziert.
Weiterhin gab es durch die untere Abfallwirtschaftsbehörde
Vorgaben zu den Stoffstrommengen sowie zu den Dokumenta-
tionspflichten über Ein- und Ausgangsstoffe (Abfallbilanzierung).
Von ihr auf der Forschungsfläche genehmigt sind maximale
Eingangs-Stoffströme von 300 m³/a Flüssigstoffe und 200 m³/a
Feststoffe aus Trockentoiletten.

Genehmigung für Recyclingdünger

Während der Anlagenbetreiber VunaNexus kontinuierlich alle
Prozesse überwachte, kümmerte sich die wissenschaftliche
Begleitforschung des zirkulierBAR-Projekts um die Qualitäts-
sicherung der Düngeprodukte. Dazu wurden die Recyclingdünger
chargenweise gemäß dem Produktstandard DIN SPEC 91421
durch Forschungspartner:innen und akkreditierte Labore
analysiert. Der Standard basiert auf Vorgaben für Parameter
und Methoden aus dem Abfall-, Abwasser- und Düngerecht
(siehe auch Kapitel 2.2).

Die landwirtschaftliche Nutzung der TTT-Recyclingdünger ist bisher nur für Forschungszwecke möglich. Gemäß Düngemittelverordnung (DüMV) sind unverdünnt und getrennt von Abwasser gesammelte menschliche Ausscheidungen nicht als Ausgangsstoffe zur Düngemittelherstellung zugelassen (vgl. Positivliste in Tab. 7, Anlage 2, DüMV). Die im Projekt geplanten Feldversuche wurden daher gemäß § 4 (5) DüMV schriftlich bei der Düngemittelverkehrskontrolle angezeigt.

Checkliste

Nachfolgend eine Auflistung der zentralen Schritte bei Planung und Bau einer Recyclinganlage für Trockentoiletten. Die Schritte bauen aufeinander auf und basieren auf den Erfahrungen im Projekt zirkulierBAR.

Pos.	Beschreibung	Check
1	Klärung eines legalen Verwertungspfads für Recyclingdünger	
2	Standortwahl – Analyse der örtlichen Randbedingungen	
2.1	Bedrohte Schutzgüter / Emissions- und Immissionsschutz (Grundwasser, Luft, Lärm)	
2.2	Bebauungsplan/Ausgliederung von Flächen o. ä.	
2.3	Ver- und Entsorgung	
2.3.1	Stromanschlüsse Punkt A <input type="checkbox"/> 1 x 63 A <input type="checkbox"/> 1 x 32 A <input type="checkbox"/> 1 x 16 A <input type="checkbox"/> 4 x Schuko	Stromanschlüsse Punkt B <input type="checkbox"/> 1 x 32 A <input type="checkbox"/> 1 x 16 A <input type="checkbox"/> 4 x Schuko
	2.3.2	Frischwasserversorgung (optional)
2.3.2	Erschließung Schmutzwasser	
3	Angeboteinholung für Ingenieursplanung LP 1 – 4 (LOD 100 – 200)	
4	Beauftragung Ingenieurbüro LP 1 – 4 (LOD 100 – 200)	
5	Vorentwurfsplanung durch Ingenieurbüro (LP 1 und 2, LOD 100)	
6	Vorklärungen mit Lieferanten	
6.1	Einholung Budget-Angebote	
6.2	Vertragsmodell (Kauf, Miete, Contracting)	
6.3	Aktuelle Lieferzeiten (min. 6 Monate)	
7	Vorklärungen mit Behörden	
7.1	Besichtigung Bestandsanlage mit Entscheidungsträger:innen	

Tabelle 1
Checkliste Bauplanung und Anlagenerrichtung

Pos.	Beschreibung	Check
7.2	Zuständigkeiten	
7.3	Titel des Bauantrags	
8	Genehmigungsrechtliche Unterlagen (Ingenieurbüro LP 3 und 4, LOD 200)	
8.1	Erläuterungsbericht	
8.2	Baugrundgutachten	
8.3	Betriebsbeschreibung	
8.4	Gutachterliche Stellungnahme zu Risiken für Schutzgüter	
8.5	Brandschutznachweise	
8.6	Standsicherheitsnachweise	
9	Konkrete Darstellung des Verwertungspfads für Recyclingdünger	
9.1	Anzeige eines Feldversuches zu Forschungszwecken (§4 Abs. 4 DüMV)	
10	Einreichung des Bauantrags	
11	Angebotseinholung für Ingenieursplanung LP 5–8 (LOD 300–400)	
12	Erhalt der Baugenehmigung	
13	Beauftragung des Ingenieurbüros LP 5–8 (LOD 300–400)	
14	Ausführungsplanung und Vergabevorbereitung unter Berücksichtigung der Auflagen aus Baugenehmigung (LP 5 und 6, LOD 300)	
15	Vergabevorbereitung und Angebotseinholung	
15.1	Vergaberechtliche Klärungen	
15.2	Flächenerschließung inkl. Ver- und Entsorgung	
15.3	Bau und Inbetriebnahme Humusregal	
15.4	Bau und Inbetriebnahme Urinaufbereitungsanlage	
15.5	Lieferverträge für TT-Inhalte	
15.6	Wartungsverträge	
15.7	Mietverträge	
15.8	Ver- und Entsorgung (Wasser, Strom)	
15.9	Versicherungen	
15.10	Vergabe und Bauausführung (LP 7 und 8, LOD 400)	
15.11	Betreiberverträge/Betriebsmodelle	
16	Vergaben und Bauausführung (LP 7 und 8, LOD 400)	
17	Risikoanalyse und Gefährdungsbeurteilung	
18	Wartungsprotokoll	
19	Anzeige der Nutzungsaufnahme	
20	Feierliche Eröffnung	
21	Inbetriebnahme der Anlagen	

Betrieb der Recyclinganlage

Autoren: Florian Augustin, Carsten Beneker, Christian Vahrson

Dieses Kapitel informiert über die betrieblichen und technischen Abläufe in der Verwertungsanlage. Sie reichen von der Anlieferung der Fest- und Flüssigstoffe über deren Lagerung und Aufbereitung bis hin zur Umwandlung in die gewünschten Düngeprodukte. Beinhaltet sind auch die eingesetzten Geräte, Verbrauchsmaterialien und Methoden. Hinweise zum Immissionsschutz und zur Betriebssicherheit zeigen auf, wie die Anlage sowohl immissionsarm als auch sicher betrieben wird.

Die Forschungsanlage von zirkulierBAR besteht aus drei Modulen:

1. einer entwässerten Fläche für die Annahme von Inhalten aus Trockentoiletten und Grünschnitt sowie für Anlagen zur Verwertung dieser Stoffe,
2. einem Humusregal zur flächen- und arbeitseffizienten Kompostierung von Feststoffen aus Trockentoiletten (Kot, Toilettenpapier, Strohmehl) und
3. einer Urinaufbereitungsanlage zur Verwertung von flüssigen Stoffen aus Trockentoiletten.

Die Anlagen auf dem Verwertungshof in Eberswalde-Ostend wurden auf einer ca. 1.000 m² großen Fläche errichtet (zzgl. Entwässerungsanlagen). Sie befinden sich innerhalb der Zone 3 des Wasserschutzgebietes Wasserwerk I Eberswalde Finow. Das Grundstück liegt nicht in einem Risikobereich für Hochwasser und außerhalb von nationalen und internationalen Schutzgebieten. In direkter Nähe befinden sich jedoch ein Fauna-Flora-Schutzgebiet und ein Landschaftsschutzgebiet. Das Deponiegelände ist im Übergang zur Nachsorgephase.

Wie funktionieren die Anlagen? Wo liegen die Herausforderungen und Risiken?

Autor:innen: Florian Augustin, Carsten Beneker,
Elsa Madleen Jung

Dieses Unterkapitel wird in der zweiten Auflage des zirkulierBAR-Handbuchs um weitere Betriebserfahrungen aus dem Betrieb der Forschungsanlage ergänzt, insbesondere mit Blick auf den Testbetrieb des Humusregals sowie die Urinaufbereitung unter Einfluss einer Klimatisierung. Die zweite Auflage steht ab Dezember 2024 unter folgendem Link zur Verfügung: www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch

Flächenanforderungen

Die Niederschlagsentwässerung der Gesamtfläche erfolgt über zwei Bereiche á ca. 500 m². Sie sind über eine Wasserscheide mit je einem Prozent Gefälle hydraulisch voneinander getrennt. Da kein Schmutzwasseranschluss vorhanden ist, wird die Teilfläche mit den Aufbereitungsanlagen für Urin und Feststoffe über Sammler und Grundleitungen entwässert. Sie führen das Schmutzwasser in ein 30 m³ großes, gedichtetes Speicherbecken. Die anschließende Entsorgung in eine Kläranlage übernimmt ein Fachunternehmen. Das restliche Niederschlagswasser wird in einer angrenzenden Mulde gemäß DWA A 138 versickert.

Annahme und Aufbereitung wasserlos gesammelter Fäkalien

Das Sanitärunternehmen Finizio GmbH sichert die Sammlung, Lagerung und den Transport von Urin und Kot (bis zu deren Hygienisierung) seuchenhygienisch über geschlossene, luftdichte und standardisierte Behälter ab.

Die festen Inhalte der Trockentoiletten (Ausscheidungen, Stroh-mehl) werden in mobilen Feststoffbehältern (FSB) aufgefangen. Die Behälter haben ein Volumen von 30 bis 240 Litern und sind auswechselbarer Teil der Toilette. Nach ihrem Transport in die Recyclinganlage werden die FSB auf einer Hebebühne angenommen und mittels einer hydraulischen Hub-Kipp-Vorrichtung in den Hygienisierungscontainer (HyCo) entleert. Es folgt die Reinigung auf einem mobilen Waschstand, wobei das Waschwasser in einer Auffangwanne gesammelt wird.

Der menschliche Urin wird am Ort der Sammlung kontinuierlich in Tanks mit einem Kubikmeter Fassungsvermögen gepumpt und bei erreichtem Füllstand verschlossen. Im luftdichten Zustand ist der Urin langfristig emissions- und geruchsfrei ohne Nährstoffverluste lagerfähig, bis er dann dem geschlossenen System der Aufbereitungsanlage zugeführt wird.

Feststoffaufbereitung

Die Behandlung von Feststoffen erfolgt in einem dreistufigen Verfahren mittels (1.) Warmbehandlung im Hygienisierungscontainer, (2.) kontrolliert sauerstoffversorgter Kompostierung (KSK) der Toiletteninhalte mit Zuschlagstoffen in offenen Mieten bzw. im Humusregal und (3.) anschließender Siebung. Das Verfahren wurde von Finizio auf Basis österreichischer Standards (vgl. Amlinger, Peyr, Hildebrandt, et al., 2005) und von Expert:innen (URS Landmanagement) entwickelt.

(1) Wärmebehandlung im Hygienisierungscontainer:

Die Hygienisierung der Feststoffe erfolgt durch Warmbehandlung in kommerziell erhältlichen, gedämmten und aktiv belüfteten Abrollcontainern gemäß DIN 30722 mit einem Füllvolumen von 30 m³. Die Container entsprechen den Anforderungen der Bioabfallverordnung (BioAbfV) und werden mittels Hakenlift-LKW bewegt. Eine Membran-Dachabdeckung ermöglicht den geruchslosen Gasaustausch ohne Ammoniak-Verlust. Nach der hygienisierenden Warmbehandlung von mindestens 7 Tagen bei 65 °C werden die Container entleert. Das Material wird mit dem Schallengreifer eines Portalkrans in das Humusregal eingetragen.

(2) Kontrolliert sauerstoffversorgte Kompostierung: Auf dem 25 Meter langen Humusregal (Module á 5 m) werden die vorbehandelten Feststoffe kompostiert. Die modulare Konstruktion lässt sich dreidimensional erweitern. Ein Dach, seitliche Rollos sowie Abläufe in den Betonböden schützen vor Vernässung. Neben den hygienisierten Feststoffen werden noch weitere Zuschlagstoffe (vgl. Tabelle 2) aufgegeben und mit dem integrierten Greifer verteilt. So lässt sich das Kohlenstoff-Stickstoff-Verhältnis der Feststoffe aus den Trockentoiletten (C/N-Verhältnis ≈ 7) in Richtung eines Zielwertes von 25–35 erhöhen und die Qualität des Humus durch den Aufbau von Ton-Humuskomplexen optimieren. Die eingesetzte Wendemaschine (Lieferant: Gujer Innotec AG) wirft Dreiecksmieten mit einer Breite von ca. 2,3 m und einer Höhe von 1,2 m auf. Der verhältnismäßig kleine Querschnitt der Dreiecksmieten verhindert anaerobe Zonen und Kompaktion durch Eigengewicht. Falls erforderlich, lassen sich die Mieten über Vorrichtungen im Betonboden zwangsbelüften.

Abhängig von Temperatur und Sauerstoffzehrung wird der Kompost über eine Zeit von 6 bis 8 Wochen automatisiert umgewälzt. In den ersten drei Wochen muss er fast täglich gewendet werden. Die Geschwindigkeiten der Überfahrten sowie des Umsetzens hängen von den Betriebsparametern ab und werden automatisch angepasst. Die Kompostierung sollte mit einem minimalen Sauerstoffgehalt von 5 Prozent, einer Feuchtigkeit von 55 bis 65 Prozent sowie einer maximalen Temperatur von 65 °C erfolgen. Durch den hohen Feuchtegehalt und die Einhausung der Maschine entwickelt sich beim Wenden kaum Staub. Sobald an verschiedenen Messpunkten kein CO₂ mehr messbar ist und die Mietentemperatur max. 10 Grad über der Außentemperatur liegt, ist die Kompostierung abgeschlossen.

Stoff	Anteil Volumen [%]	Anteil Massen [%]	Bemerkung
Tonminerale ASN 01 04 09	10	31	toniger Lehm (Herkunft regionale Kiesgruben, Tongruben u.ä.)
Überkorn ASN 20 02 01 / fertiger Humusdünger aus Inhalten von Trockentoiletten (H.I.T.) ASN 19 05 03 [*]	10	18	fertiger Kompost als mikrobiologische „Impfung“; Überkorn darf nicht zu holzig oder reich an nicht-kompostierbaren Feststoffen sein
Feststoffe aus Trockentoiletten ASN 20 03 99 ^{**}	35	27	bestehend aus ca. 50 % Kot, 50 % Strohmehl und Papier; Zugabe nach Wärmebehandlung im Hygiene-Container.
frische Wiesenmahd ASN 02 01 03	10	3	leicht verfügbare Biomasse
Gehäckselter Grünschnitt / Ast- und Strauchschnitt ASN 20 01 38	35	22	kommunaler Abfall, (möglichst wenig Lignin)

* ASN 19 05 03 bedeutet "nicht spezifikationsgerechter Kompost" und wird deswegen so deklariert, weil der Humusdünger aus Inhalten aus Trockentoiletten noch nicht zugelassen und spezifiziert ist

** vergleiche zirkulierBAR-Positionspapier „Auswahl und Vereinheitlichung eines Abfallschlüssels für Trockentoiletteninhalte

Tabelle 2

Volumen- und massenanteilige Zusammensetzung einer frischen Miete zur kontrolliert sauerstoffversorgten Kompostierung von Feststoffen aus Trockentoiletten, mit Zuschlagsstoffen und den jeweilig zugeordneten Abfallschlüsselnummern (ASN)

Die Behandlungskapazität des derzeit 25 m langen Humusregals beträgt ca. 30 Tonnen ($\approx 45 \text{ m}^3/\text{a}$) TT-Inhalte, inkl. Zuschlagstoffen etwa 125 Tonnen Biomasse, mit einem Produktionsergebnis von ca. 90 Tonnen Humusdünger aus Inhalten von Trockentoiletten (H.I.T) pro Jahr (bei 6 Durchläufen jährlich).

Das veredelte Recyclingprodukt hat nährstoffseitig das Potenzial, als organo-mineralisches NPK-Düngemittel zugelassen zu werden.

(3) Siebung des Komposts: Um mögliche Fremdstoffe zu entfernen, wird der Kompost abschließend gesiebt (Doppeldeck Rüttelsieb, Maschenweite 40x40 mm Oberdeck, 16x16 mm Unterdeck). Das verbleibende Überkorn wird genutzt, um neue Kompostchargen anzupflanzen.

Urinaufbereitung

Urin wird vom Lager zur Aufbereitungsanlage transportiert und zumeist in Tanks mit einem Fassungsvermögen von einem Kubikmeter geliefert.

Die für zirkulierBAR gewählte Urinaufbereitungstechnologie wurde am Schweizer Wasserforschungsinstitut Eawag entwickelt und durch das Spin-off VunaNexus AG kommerzialisiert. Das Verfahren nutzt etablierte Abwasserfahrenstechnik und verläuft in drei Schritten: (1.) Stabilisierung des flüchtigen und riechenden Ammoniak in einem Belebtschlamm-Verfahren (Ammonium → Nitrat), (2.) Adsorption der Arzneimittelrückstände mittels Aktivkohle und (3.) Hitzebehandlung in einem Verdampfer, um Krankheitserreger abzutöten und die enthaltenen Nährstoffe aufzukonzentrieren. Das flüssige Endprodukt ist in der Schweiz, Liechtenstein und Österreich bereits unter dem Namen Aurin® zertifiziert und als organisch-mineralisches NPK-Düngemittel zugelassen.

Die Urinaufbereitungsanlage (UAA) von VunaNexus wurde für zirkulierBAR erstmalig in einen Überseecontainer (20 Fuß) eingebaut und auf dem Außengelände betrieben. Die Tanks für Ausgangsstoff und Produkt befinden sich außerhalb des Containers und sind hydraulisch mit den Anlagenkomponenten im Überseecontainer verbunden. VunaNexus betreibt und überwacht die Anlage ferngesteuert. Für manuelle Eingriffe ist das Personal der Kreiswerke Barnim zuständig.

Die Anlage ist auf eine maximale Aufbereitungskapazität von 500 l Urin pro Tag ausgelegt. Das Ziel, in einem Jahr 100 m³ Urin aufzubereiten, wurde noch nicht erreicht. Schwankende Außentemperaturen stellten sich im bisherigen Betrieb als Herausforderung dar – trotz des isolierten Überseecontainers. Die Außentemperaturen beeinflussen die biologische Aufbereitungskapazität des Verfahrens deutlich. Zum einen erhöhen sie den Steuerungsbedarf und zum anderen müssen Klimatisierung und

Betriebsprogramm projektspezifisch optimiert werden. Im freistehenden Container wurden tolerierbare Temperaturbereiche im Sommer über- und im Winter unterschritten. Als kühlende Gegenmaßnahme wurde eine Klimaanlage (mit Heizfunktion) nachgerüstet. Für die Übergangsmomente wurde zum Heizen außerdem ein getauchter Heizstab genutzt, um die Reaktortemperatur auf mindestens 10 °C zu halten. Bei anhaltenden Außentemperaturen von unter 5 °C kann die containerbasierte Anlage unter den gegebenen Umständen nicht effektiv betrieben werden. Bei der Urinaufbereitung entsteht kein Überschussschlamm, wodurch die Anlage ohne einen Abwasseranschluss auskommt.

Chemische Grundlagen der Urinaufbereitung: Die Herausforderung der Urinaufbereitung liegt im Zusammenspiel von zwei Bakteriengruppen, welche jeweils einen Schritt der zweistufigen Nitrifikation durchführen: Im ersten Schritt übernehmen Ammonium-oxidierende Bakterien (AOB) der Gruppe *Nitrosomas* die Oxidation von Ammonium NH_4^+ zu Nitrit (NO_2^-). Im zweiten Schritt setzen Nitrit-oxidierende Bakterien (NOB) der Gruppe *Nitrobacter* dieses Zwischenprodukt zum Zielprodukt Nitrat (NO_3^-) um. Beide Schritte sollten idealerweise mit gleicher Rate stattfinden. AOB und NOB haben jedoch unterschiedliche Anforderungen an Temperatur, pH-Wert und chemische Zusammensetzung der Lösung. Im ersten Schritt der Ammonium-Oxidation werden Protonen freigesetzt und der pH-Wert sinkt. Dieser Effekt ist durch die Zugabe von alkalischem Roh-Urin kontrollierbar und wird über eine kontinuierliche pH-Wert-Messung geregelt. Eine daraus resultierende erhöhte Ammonium-Konzentration führt gleichzeitig zu einem überproportionalen Wachstum der AOB und in Folge zu einer Akkumulation des Zwischenprodukts Nitrit. Nitrit disproportioniert anteilig zu salpetriger Säure (HNO_2), welches wiederum wachstumshemmend auf NOB wirkt. Diesen sich negativ rückkoppelnden Effekt beherrscht das VunaNexus-Verfahren in einem Temperaturspektrum von etwa 10–30 °C durch eine eng überwachte Mess- und Regelsteuerung.

Verbrauchsmaterial der Urinaufbereitung: Als Verbrauchsmaterial werden 200 ml Aktivkohle pro m^3 Urin verbraucht. Die beladene Aktivkohle mit einem Volumen von 100 l wird etwa halbjährlich (nach 50 m^3 Filtrat) ausgetauscht und thermisch verwertet.

Aufbereitungsprodukte der Urinaufbereitung: Das Aufbereitungsprodukt ist ein Recyclingdünger mit Nährstoffgehalten, die in etwa jenen von menschlichem Urin entsprechend. Das enthaltene Ammonium ist zu etwa 50 Prozent zu Nitrat oxidiert. Dadurch verflüchtigt sich kein geruchsintensiver Ammoniak, der Recyclingdünger ist stabilisiert und die Pflanzenverfügbarkeit ist verbessert. Medikamentenrückstände sind durch die Aktivkohlefiltration zu über 95 Prozent entfernt (Köpping et al., 2020). Der dritte Prozessschritt des VunaNexus-Verfahrens konnte innerhalb von zirkulierBAR nicht realisiert werden: Mittels Verdampfer soll in Folgeprojekten der nitrifizierte, filtrierte Urin mit einem noch zu bestimmenden Faktor von etwa 1:15 eingedickt werden. Dabei entstehen das Flüssigdüngerprodukt Aurin® (5,25 t/a) mit einem Gesamtstickstoffgehalt von etwa 4,2 Prozent, und destilliertes Wasser. Das destillierte Wasser wird dem Speicherbecken zugeführt, das Produkt in einem Tank gesammelt.

Aspekte der Lagerlogistik und des Stoffstrommanagements: Die Ausgangsstoffe und Produkte müssen auf wasserrechtlich unbedenklichen Flächen gelagert werden. Die jahreszeitlich stark schwankenden Substrat-Lieferungen sowie auch Düngebedarfe erfordern sowohl edukt- als auch produktseitig größere Lagerkapazitäten (bspw. 50 d x 500 l/d Urinaufbereitung = 25 m³).

Ein HyCo nimmt ca. 16 t frische TT-Inhalte auf. Nach der Warmbehandlung und Drainage ist diese Masse auf ca. 11 t reduziert und es bedarf dafür zur weiteren Behandlung im Humusregal etwa 10 m Länge und Lagerkapazitäten für ca. 30 t H.I.T.

Recycling-Rechner für die kommunale Praxis

Wie viel Trockentoiletteninhalte fallen in einem Jahr in Ihrer Kommune an? Wie viele Zuschlagstoffe benötigen Sie für die Verwertung? Antworten auf diese und andere Fragen gibt Ihnen der Recycling-Rechner von zirkulierBAR. In nur wenigen Minuten erfahren Sie, wie viel Kompost und Urindünger ihre Anlage liefert, welche Mengen an Trinkwasser Sie einsparen können und wie viele Nährstoffe (Stickstoff, Phosphor etc.) durch den Prozess recycelt werden.

Der Recycling-Rechner ist unter www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch abzurufen

Immissionsschutz

Aus schalltechnischer Sicht lässt sich ein Immissionskonflikt ausschließen. Die lautesten Geräusche entstehen beim Häckseln von Grünschnitt, beim Handling der Behälter/Container (Anlieferung und Abholung) sowie beim Betreiben der Wendemaschine und der Siebanlage.

Die Forschungsanlage lässt sich gemäß technischer Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) als Anlage zur Erzeugung von Kompost aus organischen Abfällen (Nr. 5.4.8.5) einstufen. Im Betrieb als Kleinanlage sollten die Geruchsstoffe im behandelten Abgas aus der Hygienisierung den Grenzwert nach TA Luft von 500 GE/m³ nicht überschreiten.

Auch die Grenzwerte für die Emission organischer Stoffe werden eingehalten. Anlieferung und Abfrachtung in geschlossenen Behältern bzw. Containern gewährleisten den Schutz des Grundwassers. Die Verkehrs- und Behandlungsfläche ist in Asphaltbauweise flächendeckend hergestellt und mittels Hochbordsteinen eingefasst.

Keime werden in der Regel staubgebunden verbreitet. Staub entsteht z. B. beim Umsetzen des Kompostes. Dieser wird bedarfsgerecht manuell mit Prozesswasser befeuchtet, was den Staub niederhält. Ein Transport durch Wind wird ausgeschlossen, da der Kompost bei trockener Witterung häufiger befeuchtet wird als bei feuchtem Wetter. Der Abtransport des Fertigkompostes in geschlossenen Behältern, das Fahren auf befestigten Wegen sowie eine kontinuierliche Reinigung der Betriebs- und Verkehrsflächen stellen weitere Maßnahmen zur Emissionsminimierung dar.

Zu den Geruchsquellen zählen im Wesentlichen die Fest- und Flüssigstoffe. Die Feststoffe werden zu Beginn der Behandlung in einem geschlossenen, aber belüfteten Container hygienisiert. Die Reinigung der Abluft erfolgt mittels einer semipermeablen Membran. Diese bildet das Dach des Containers und verhindert, dass Niederschlagswasser eindringt. Unterhalb der Membran entsteht ein Wasserfilm, in dem die Inhaltsstoffe aus den Abbauprozessen oxidieren. Das geschieht aufgrund des Sauerstoffüberschusses im Container, der durch die Belüftung aufrechterhalten wird. Dieses Verfahren stellt eine etablierte

Reinigung bzw. Desodorierung von Abluft dar. Für Kompostierungsanlagen ist gemäß Hygiene-Baumusterprüfsystem (HBPS) der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. als „Baumusterkategorie 7 – Miete eingehaust (Membranabdeckungen)“ zugelassen.

Nach Abschluss der Hygienisierung ist das Material weitestgehend biologisch stabil und in seiner Geruchsbelastung deutlich reduziert. Während der Kompostierung und Humifizierung durch aerobe Mikroorganismen wird das Rottegut weiter abgebaut. In dieser Phase ist nur mit geringen Geruchsexpositionen zu rechnen.

Welche peripheren Infrastrukturen sind im Betrieb notwendig oder hilfreich?

Autoren: Florian Augustin, Carsten Beneker, Christian Vahrson

Sicherheitsrelevante Betriebshinweise

Für den Betrieb der Anlage bestehen verschiedene Anforderungen hinsichtlich des Schutzes der Beschäftigten. Sie umfassen technische, organisatorische und personengebundene Maßnahmen, die sich aus einer Gefährdungsbeurteilung ergeben. Für die Umsetzung dieser Maßnahmen ist die Geschäftsführung des Unternehmens verantwortlich, das die Mitarbeiter:innen stellt.

Schutzkleidung: Für den Umgang mit den Feststoffbehältern (FSB) bis zur Endreinigung ist grundsätzlich ein wasserfester Vollschutzanzug inkl. Atemschutzmaske ratsam. Die Arbeitskleidung sollte vor und nach der Schicht in einer Schmutzschleuse verbleiben. Dem Personal sind Duschen und Spinte bereitzustellen.

Technische Sicherheit: Zu den technischen Sicherheitsmaßnahmen im Rahmen der Unfallverhütungsvorschriften gehört die jährliche Prüfung aller Maschinen und mobilen elektrischen Geräte durch sachkundiges Personal.

Brandschutz: ABC-Feuerlöscher sind Teil der spezifischen Brandschutzmaßnahmen und gehören in direkte Nähe aller elektrischen Installationen.

Technische Betriebshinweise

Lagerung und Transport: Durch den saisonalen Betrieb der Trockentoiletten ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Lagerkapazitäten. Bei den Festival-Toiletten der Firma Finizio (Modell *Humussphäre*) sorgt das kleine Packmaß für ein geringes Lagervolumen von ca. 15 m³ bei einem Flächenbedarf von 7,5 m² pro 80 Toiletten. Das barrierefreie Modell *Libre* benötigt ein Lagervolumen von 10m³ und eine Aufstellfläche von 4 m² pro Toilette. Für die Lagerung und in Einzelfällen für den Transport der Feststoffbehälter nutzt Finizio Wechselbrücken mit Stützbeinen (C-Behälter gemäß EN 284). In einer Wechselbrücke können bis zu 82 gefüllte Behälter vom Typ FSB180 gelagert und transportiert werden. Für den Einsatz vorbereitete (= gereinigt, mit Langstroh ausgestattet, ineinandergesteckt) FSB180 können in einer Wechselbrücke in einer Stückzahl von ca. 200 Stk/WB transportiert werden. Die Wahl der Fahrzeuge für den Transport von Humusphären und Libre richtet sich nach Stückzahlbedarf und der Entfernung zum Einsatzort. Bis zu 35 Humusphären können mit einem Kleintransporter (3,5 t) plus Anhänger (3,5 t) erfolgen. Bei größeren Stückzahlen und Entfernungen bietet sich der Einsatz von Wechselbrücken mittels Lastkraftwagen (40 Tonner) an, während für die öffentlichen Toilettenmodelle *Libre* und *Humero* lediglich ein Pritschenwagen mit Ladekran benötigt wird.

Die für Urin verwendeten IBC (Intermediate Bulk Container) haben einen Lagerflächenbedarf von 3 m³/m². Produktseitig wurde ein Lagertank mit einem Volumen von 10 m³ und einer Grundfläche von 5 m² verwendet. Bei der Wahl des Produktlager-tanks sollte die weitergehende Logistik berücksichtigt werden (bspw. haben Güllelaster i. d. R. ein Volumen von 11,5 oder 18,5 m³).

Für die wetterfeste Lagerung von Werkzeugen, Pumpen, Mess-Equipment usw. sollten passende Räumlichkeiten vorgehalten werden.

Hard- und Software: Zur Dokumentation und Prozessüberwachung der Humusmieten sowie der Verwaltung eines Kompostplatzes empfehlen wir die Software KMQS (Kompost-Management-Qualitäts-Sicherung) von URS Landmanagement. Auch hinsichtlich der Messtechnik zur manuellen Bestimmung und Dokumentation von Temperatur und Sauerstoffgehalt

wurden im Projekt gute Erfahrungen mit den Materialien dieses Anbieters gemacht. Für eine Fernüberwachung und automatisierte Speicherung der Temperaturdaten empfiehlt sich der Zulieferer JUMO.

Frisch- und Abwasser: Auf der Forschungsfläche sind weder ein Wasser- noch ein Schmutzwasseranschluss vorhanden. Frischwasser wird auf einem anderen Teil des Betriebsgeländes zu Spülzwecken in Intermediate Bulk Container (IBC) abgefüllt und per Radlader bereitgestellt. Aus keiner der Anlagen gibt es unkontrolliert austretendes Abwasser. Die Abläufe aus der FSB-Spülstation, den Hygienisierungs-Containern und dem Humusregal können kontrolliert gesammelt und anschließend ordnungsgemäß entsorgt werden. Dafür sind entsprechende Behälter und ggf. Pumpen notwendig. Aus der Urinaufbereitungsanlage kann geringfügig Schaum austreten, der dann über die Grundleitungen entsorgt wird. Das destillierte Wasser aus einem Verdampfer (in zirkulierBAR nicht realisiert) lässt sich aus qualitativer Sicht als Prozesswasser wiederverwenden.

Was kosten Bau und Betrieb einer Recyclinganlage?

Autor:innen: Florian Augustin, Carsten Beneker, Lydia Illge, Christian Vahrson

Überblick

Für Kommunen, aber auch Planungs- und Ingenieurbüros, die sich mit der praktischen Umsetzung des Recyclings von Inhalten aus Trockentoiletten auseinandersetzen, sind besonders die Kosten ein zentraler Punkt. Basierend auf unseren Erfahrungen wollen wir deshalb nachfolgend darstellen,

- mit welchen Kosten zu rechnen ist (generell sowie fallspezifisch),
- welche Kosten mit Blick auf ihren Umfang dominieren und
- wovon ihr Umfang im Wesentlichen abhängt.

Getrennt nach den beiden Komponenten Humusregal und Urinaufbereitungsanlage zeigen wir, wie sich die Errichtung größerer (oder mehrerer) Recyclinganlagen auf die Kosten auswirkt. Wir blicken auf mögliche Skaleneffekte und schauen, ob es noch weiteres Potenzial zur Kostenoptimierung gibt. Dabei ist zu beachten, dass sich die in Eberswalde angefallenen Kosten nicht eins zu eins auf andere Kommunen übertragen lassen. Vielmehr hängen die Kosten wesentlich von den unmittelbaren Gegebenheiten und Bedarfen vor Ort ab.

Zur besseren Einordnung der Kostendarstellungen und Schlussfolgerungen wollen wir zunächst kurz klären, in welchem Innovationstadium sich die Recyclinganlage Ende 2024 befand.

Innovationsstadium der Recyclinganlage

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Humusregals waren Erfahrungen mit dem Betrieb einer bereits existierenden Pilotanlage. Diese verfügte über eine dieselbetriebene Wendemaschine. Sie wurde durch den zirkulierBAR-Projektpartner Finizio zu einer schienengeführten, elektrifizierten Krananlage weiterentwickelt. Das erlaubte eine hochautomatisierte Kompostierung, durch die sich die Personalkosten (für das Umwälzen des organischen Materials) deutlich reduzieren ließen.

Nach unserer Einschätzung besitzt das Humusregal einen Technologiereifegrad (Technology Readiness Level – TRL) von 6 („Prototyp in Einsatzumgebung“). Das bedeutet, dass die Anlage im Jahr 2024 – und voraussichtlich auch in den folgenden Jahren – im realen Betrieb arbeitet. Die dabei gesammelten praktischen Erfahrungen und Erkenntnisse werden in die Errichtung weiterer Recyclinganlagen einfließen und dabei helfen, Prozesse zu optimieren.

Die Urinaufbereitungsanlage wurde vom Anbieter VunaNexus errichtet, der auch ihren sachgemäßen Betrieb überwacht. Das erprobte Verfahren wird seit vier Jahren für die Herstellung von Urindünger kommerziell angeboten und genutzt. Entsprechende Toiletten und Anlagen sind bereits in mehreren Bürogebäuden in der Schweiz und in Frankreich in Betrieb (TRL 8–9). In Deutschland wurde das Verfahren erstmals als containerbasierte Anlage im Außenbereich realisiert und besitzt dadurch den Technologiereifegrad 7 („Prototyp im Einsatz während 1 bis 5 Jahren“).

Welche Kosten fallen an?

Wir unterscheiden bei den Kostenarten generell zwischen einmaligen Baukosten (bzw. Errichtungskosten) und kontinuierlichen Betriebskosten. Die Baukosten unterteilen wir wiederum in Kosten für den Erwerb von Anlagen oder Komponenten und sonstige Baukosten (insbesondere Personalkosten für die Errichtung der Anlage). Die in den einzelnen Bereichen anfallenden Kosten sind (zumindest teilweise) fallspezifisch für die Anlage in Eberswalde.

Die Errichtung des Humusregals

Die Kosten für den Erwerb der technischen Komponenten des Humusregals umfassen:

- die Wendemaschine (inklusive Antrieb und Steuerung),
- die Greifer (inklusive Fahrwerk, Portalkran, Kettenzug und Steuerung) sowie
- die Gesamtanlage (Programmierung, Fernsteuerung, Schleifleitung und Ständerwerk).

Die Höhe der Erwerbskosten hängt vor allem von der Größe des Humusregals ab. Größer dimensionierte Recyclinganlagen könnten mit dem in der Forschungsanlage verwendeten Greifer, der Wendemaschine und der Steuerung eine größere Menge an Humus produzieren. Eine größere Anlage würde also maßgeblich zur kostengünstigeren Herstellung von Recyclingdünger beitragen.

Zu den Erwerbskosten kamen beim Humusregal noch die Personalkosten für ungefähr 100 Personentage. Diese beinhalteten Montage- und Betonarbeiten sowie in geringem Umfang auch Schweißarbeiten und Transporte. Beim Bau mehrerer Recyclinganlagen (Humusregalen) ließen sich vor allem die (Personal-)Kosten für die Produktion der Betonböden deutlich reduzieren. So wäre denkbar, dass die Böden in einem Betonwerk mittel- bis langfristig in Serie produziert, angeliefert und (bei einmaliger Bereitstellung eines Krans) montiert werden. Zudem gehen wir davon aus, dass der künftige Aufwand für Montagearbeiten etwas geringer ausfallen wird, weil die erstmalige Errichtung des Humusregals auch technologische Entwicklungsarbeiten beinhaltete. Diese würden in Zukunft nicht mehr anfallen.

Der Betrieb des Humusregals

Der Betrieb des Humusregals erfordert eine qualifizierte Fachkraft (Humuswirt:in), die die Anlage bedient. Auf Basis der bisherigen Erfahrungen rechnen wir mit einem jährlichen Aufwand von insgesamt 50 Personentagen. Das ist allerdings nur eine vorläufige Abschätzung. Erst der langfristige Betrieb wird zeigen, bei wieviel Tagen der durchschnittliche Aufwand liegt. Zu den laufenden Betriebskosten gehören weiterhin Zuschlagstoffe wie Grünschnitt und Tonminerale. Sie werden den Inhalten aus Trockentoiletten im Recyclingprozess beigefügt. Die entsprechenden Mengenangaben werden im Kapitel 3.2 genauer aufgeführt („Betrieb der Recyclinganlage: Wie funktionieren die Anlagen? Wo liegen die Herausforderungen und Risiken?“).

Der Stromverbrauch des Humusregals beträgt ca. 100 Kilowattstunden pro Kubikmeter Inputmaterial. Dazu addieren sich im laufenden Betrieb noch Wartungsarbeiten und ggf. auch Reparaturen. Ihre Höhe lässt sich (noch) nicht genau beziffern. Wir gehen aber von ungefähr einem Prozent der Errichtungskosten aus.

Die Errichtung der Urinaufbereitungsanlage

Die Kosten für den Erwerb der Urinaufbereitungsanlage umfassen:

- das Urinlager (Tanks, Pegelsensor, Transferpumpe),
- Komponenten für die Nitrifikation (Reaktor inklusive Dosierpumpe, Sensorik und Einbauten),
- Aktivkohlefilter (inklusive Komponenten für Programmierung und Fernsteuerung sowie Schleifleitung),
- den Produkttank (inklusive Sensor),
- den Verdampfer sowie
- Komponenten für die Gesamtanlage (Steuerung, Software, Kühlcontainer, elektrische Installation sowie Kleinteile bzw. Fittings).

Der mit Abstand größte Teil der Errichtungskosten (ca. 60 Prozent) entfiel auf den Verdampfer (errichtet im Rahmen des Projektes P2GreeN mit EU-Fördermitteln). Hinzu kam ein Personalaufwand in Höhe von ca. 40 Personentagen. Er umfasste die Zusammenstellung der Komponenten, ihre Montage sowie die Inbetriebnahme der Anlage. Da es sich um die erstmalige Montage in einem Überseecontainer handelte, könnte dieser Aufwand in Zukunft geringer ausfallen.

Wie beim Humusregal, so ist auch bei der Urinaufbereitung die Anlagengröße ein entscheidender Faktor für die Produktionskosten des Recyclingdüngers. Bei einer größeren Anlage als in Eberswalde würde sich das Gesamtvolumen der Tanks erhöhen, der Aufwand für Zusammenstellung, Montage und Inbetriebnahme hingegen kaum.

Der Betrieb der Urinaufbereitungsanlage

Für den Betrieb der Urinaufbereitungsanlage ist der Abschluss eines Wartungsvertrags mit dem Technologielieferanten erforderlich, der eine Remote-Steuerung der Anlage einschließt. Die Betreiber:innen sind damit weitgehend von der Bedienung der Anlage befreit. Sie benötigen lediglich Grundkenntnisse zur Behebung mechanischer Probleme, was sich aber im Rahmen eines Trainings vermitteln lässt. Wie bei den Errichtungskosten entfällt der größte Teil der Betriebskosten auf den strombasierten Betrieb des Verdampfers. Der gesamte Stromverbrauch der Urinaufbereitungsanlage beträgt etwa 95 Kilowattstunden pro Kubikmeter behandeltem Urin/Perkurin.

Fazit und Kostenschätzung

Die Errichtung von Recyclinganlagen nach Vorbild des zirkulierBAR-Prototypens erfordert individuelle Systemlösungen, die mit den Technologielieferanten an die Gegebenheiten und Bedarfe vor Ort angepasst werden müssen. Entscheidend ist vor allem die Größe der Anlage. Die modulare Gestaltung der Anlage ermöglicht Kosteneinschätzungen, die auf die jeweiligen Bedingungen vor Ort ausgerichtet sind.

Basierend auf dem aktuellen Wissensstand (Ende 2024) schätzen wir die Gesamtkosten für die Errichtung einer Recyclinganlage auf mindestens 360 Tsd. bis maximal 550 Tsd. Euro. Dabei gehen wir von einer kombinierten Anlage aus, bestehend aus

Humusregal und Urinaufbereitungsanlage (ohne Flächenerschließung) mit einer jährlichen Produktionskapazität von 50 Tonnen Humusdünger und 6 Kubikmetern Flüssigdünger. Hinzu kommen Kosten für die erforderliche Betriebsfläche (inklusive Rohstofflogistik). Deren Höhe kann je nach Standortgegebenheiten sehr unterschiedlich ausfallen. Beide Anlagen lassen sich durch die semi-stationäre Bauweise mit kontrollierter Entwässerung prinzipiell ohne neue Flächenerschließung aufstellen und betreiben. Die Flächenkosten könnten sogar komplett entfallen, wenn die Anlagen auf bisher ungenutzten Freiflächen mit Strom- und Internetanschluss oder auch auf nicht mehr genutzten Klärschlammkompostierflächen betrieben werden. Allerdings können sie die Errichtungskosten auch maßgeblich erhöhen, wenn (wie in Eberswalde) genehmigungsrechtliche Aspekte bauliche Maßnahmen erfordern. Inwieweit Flächenkosten zu erwarten sind, sollte daher in einer Gesamtkostenschätzung unbedingt berücksichtigt werden.

Für Reparaturen der Recyclinganlage ist es unserer Erfahrung nach realistisch, einen jährlichen Betrag in Höhe von ungefähr einem Prozent der Errichtungskosten anzusetzen. Für den laufenden Betrieb der Recyclinganlage (mit einer Kapazität wie in Eberswalde) ist schließlich von einem jährlichen Personalaufwand von insgesamt 80 Personentagen auszugehen. Das beinhaltet eine:n Humuswirt:in und in geringem Umfang die Betreuung der Urinaufbereitungsanlage. Für Strom, Zuschlagsstoffe sowie einen Wartungsvertrag mit dem Technologielieferanten für die Urinaufbereitungsanlage ist mit Betriebskosten von jährlich mindestens 25 Tsd. Euro für das Humusregal und mindestens 10 Tsd. Euro für die Urinaufbereitungsanlage zu rechnen.

Den dargestellten Errichtungs- und Betriebskosten einer Recyclinganlage steht ein deutlicher Nutzen gegenüber. Dieser umfasst – neben der Einsparung von Wasser sowie bisherigen Entsorgungskosten für die Inhalte von Trockentoiletten – vor allem das Recycling von Ressourcen, vermiedene Kosten bei Abwasseraufbereitung und Gewässerschutz sowie die Bindung von Klimagasen (siehe auch Beitrag „Welche Umweltwirkungen hat eine Trockentrenntoilette im Vergleich zur Wasserspültoilette?“ in Kapitel 3.1 und „Recycling-Rechner für die kommunale Praxis“ in Kapitel 3.2).

Wie viel und welche Düngemittel sind zu erwarten?
Wie viel konventionellen Dünger können sie ersetzen?

Autorin: Elsa Jung

Nach Umwandlung der Trockentoiletteninhalte entsteht in der kontrolliert sauerstoffversorgten Kompostierung ein fester organischer NPK- bzw. PK-Recyclingdünger. Auch in der Urinaufbereitungsanlage werden die Nährstoffe aus dem Urin in Form eines Mehrnährstoffkonzentrats pflanzenverfügbar aufbereitet. Dieser flüssige mineralische Recyclingdünger ist in der Wirkung vergleichbar mit synthetischen Mineräldüngern (siehe Kapitel 3.3 „Ab aufs Feld“).

Den Analysen nach ist die Pilotanlage Eberswalde imstande, 93 Prozent des Stickstoffs aus den Trockentoiletteninhalten zurückzugewinnen und pflanzenverfügbar zu machen. Im Projektzeitraum (2022–2024) entsprach das einer Menge von etwa 4 Tonnen Stickstoff aus 240 Tonnen Humusdünger und 75 Tonnen Urindünger. Führt man die ermittelten Nährstoffgehalte aus den Qualitätsanalysen mit den durchschnittlichen Ausscheidungen pro Einwohner:in und Jahr zusammen, ergibt das Produktionsmengen von ca. 290 kg Humusdünger und 30 kg kondensierten Flüssigdünger pro Einwohner:in und Jahr. Die kombinierten Endprodukte enthalten im Schnitt ca. 2,6 kg Gesamtstickstoff pro Einwohner:in und Jahr.

Vergleiche von frischem zu gelagertem Urin bzw. Perkurin haben gezeigt, dass durch die lange Lagerung der Ausgangsstoffe auf der Pilotanlage (durch Verzögerungen im Projektablauf von bis zu 2 Jahren) hohe Stickstoffverluste von etwa 75 Prozent auftraten. Das ist vor allem der Feststoffausfällung in Form von Struvit durch lange Standzeiten zuzurechnen. Eigene Versuche zeigen, dass sich diese Verluste bei einer zeitnahen Verwertung des gelagerten Urins voraussichtlich auf bis zu 5 Prozent reduzieren ließen (Schürhoff, 2023). Hierdurch ergäbe sich im idealen Prozess eine Stickstofffracht von ca. 5,4 kg Gesamtstickstoff pro Einwohner:in und Jahr in den Endprodukten.



Durch eine Modellierung für die Region konnte weiterhin ermittelt werden, dass eine flächendeckende, trockene Sammlung und Aufbereitung von menschlichen Fäkalien im Barnim zur Rückgewinnung von 845 t Stickstoff pro Jahr führen würden. Damit ließen sich 51 Prozent der in der Region ausgebrachten Mineraldünger einsparen. Das Recycling von Urin und Fäkalien birgt somit ein erhebliches Potenzial, um die Abhängigkeit von synthetischen Düngemitteln zu verringern.

Die genannten Zahlen sind Ergebnisse der im Projekt von der TU Berlin durchgeführten umwelttechnischen Modellierungen mit der Methode der Stoffstromanalyse. Dabei wurden Materialbewegungen auf der Pilotanlage sowie weitere relevante Stoffstromflüsse beim Recycling von Trockentoiletteninhalten identifiziert und systematisch in Zusammenhang gebracht. Die Ergebnisse wurden in Stoffstrom-Fließbildern dargestellt. Ab Februar 2025 sind die Stoffstrom-Fließbilder für die Pilotanlage sowie das Modell für die Region Barnim im digitalen Anhang unter www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch verfügbar.

Qualitätssicherung von Recyclingdüngern

**Autorinnen: Elsa Madleen Jung,
Claudia Kirsten, Jana Mühlenberg**

Auf welche Schadstoffe und Krankheitserreger wird der Recyclingdünger aus Inhalten von Trockentoiletten untersucht?

Um Inhalte von Trockentoiletten als Dünger verwenden zu können, müssen diese den Anforderungen der Düngemittelverordnung (DüMV, 2019) entsprechen. Hierbei gilt es, verschiedene Risiko-Kategorien zu betrachten. Tabelle 3 gibt dazu einen Überblick inklusive der jeweiligen Untersuchungsparameter und möglichen Eintragspfade.



Risiko-Kategorie	Untersuchungsparameter	Eintragspfad
Seuchenhygiene/ Infektionsschutz	<i>E. coli</i> , Enterokokken, Salmonellen, <i>C. perfringens</i> , somatische Coliphagen ^a	menschliche Ausscheidungen
Phytohygiene	keimfähige Samen- und Pflanzenteile	Grünschnitt, Silage
Schadstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ○ Schwermetalle z. B. Quecksilber, Blei, Cadmium ○ organische Schadstoffe (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), perfluorierte Tenside (PFT), polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/PCDF), dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB)) ○ pharmazeutische Rückstände^a (z. B. Diclofenac, Estradiol, Ciprofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin) 	menschliche Ausscheidungen, Grünschnitt, Biokohle, Tonmineral, Strohschnitt, Silage, Fremdstoffe

^a nicht im Rahmen der DüMV gefordert, aber in die DINSPEC 91421:2020-12 (Deutsches Institut für Normung, 2020) aufgenommen

Tabelle 3

Übersicht zu Risiko-Kategorien,
Untersuchungsparametern und Eintragspfaden

Wo können die Untersuchungen durchgeführt werden?

Untersuchungen auf Schadstoffe oder Krankheitserreger werden von qualifizierten Laboren durchgeführt. Eine Zusammenstellung deutscher Labore, die u. a. Kompost untersuchen, findet sich auf dem Internetauftritt der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (www.kompost.de/service/labore/karte-labore). Die im Rahmen des Projekts zirkulierBAR angefragten bzw. eingebundenen Labore sind in Tabelle 4 aufgeführt. Sie bestimmen neben den Schadstoffen auch die Standardparameter¹⁸, Nährstoffgehalte¹⁹ und Spurenelemente²⁰.

Von den angefragten Laboren hat sich keines bereit erklärt, den Kompost auf somatische Coliphagen zu untersuchen. Die entsprechende Analyse gehört zur Standardanalytik von Abwasserlaboren. Diese möchten jedoch keine Kompostproben analysieren. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es verschiedene Herangehensweisen an die Extraktion der somatischen Coliphagen aus dem Kompost. Allerdings sind sie nicht in einer Norm verankert. Das DBFZ forscht hierzu noch an einer geeigneten Methode.

18) Trockenmasse (TS), organische Trockensubstanz (oTS), pH-Wert, Salzgehalt/Leitfähigkeit, basisch wirksame Bestandteile

19) Stickstoff, Phosphor, Kalium, Stickstoff (löslich), weitere N-Formen (Ammonium-Stickstoff, Nitrat-Stickstoff), Phosphatlöslichkeiten, Calcium (wasserlöslich), Magnesium, Natrium, Selen, Schwefel, Chlorid

20) Bor, Cobalt, Kupfer, Eisen, Mangan, Molybdän, Zink

Labor/Kontakt Daten	Probenart	Analysen
Eurofins Umwelt Ost GmbH Niederlassung Jena Löbstedter Straße 78 07749 Jena www.eurofins-umwelt-ost.de info_jena@eurofins.de Tel: 03641 46490	Kompost, Gärprodukt, NawaRo-Gärprodukt	Standardparameter, Nährstoffe, Spurenelemente, organische Schadstoffe, Schwermetalle, seuchen- und phyto- hygienische Untersuchungen
LUFA Nord-West Finkenborner Weg 1a 31787 Hameln www.lufa-nord-west.de nils.frerichs@LUFA-nord-west.de Tel: 05151 9871-53	Kompost, Gärprodukt, NawaRo-Gärprodukt	Standardparameter, Nährstoffe, Spurenelemente, organische Schadstoffe, Schwermetalle, seuchen- und phyto- hygienische Untersuchungen
AGROLAB Agrar GmbH Breslauer Str. 60 31157 Sarstedt www.agrolab.de sarstedt@agrolab.de Tel: 05066 90193-0	Kompost, Gärprodukt, NawaRo-Gärprodukt	Standardparameter, Nährstoffe, Spurenelemente, organische Schadstoffe, Schwermetalle, seuchen- und phyto- hygienische Untersuchungen
JenaBios GmbH Löbstedter Str. 80 07749 Jena www.jenabios.de matthias.funke@jenabios.de Tel: 03641 2423458	Kompost, Gärprodukt, NawaRo-Gärprodukt	Standardparameter, Nährstoffe, Spurenelemente, organische Schadstoffe, Schwermetalle, seuchen- und phyto- hygienische Untersuchungen, Screening auf pharmazeutische Rückstände

Labore wissenschaftlicher Einrichtungen, die am Projekt zirkulierBAR beteiligt sind

Technische Universität Berlin
 Institut für Technischen Umweltschutz
 FG Kreislaufwirtschaft und Recyclingtechnologie, Sekretariat Z2
 Straße des 17. Juni 135
 10623 Berlin
www.tu.berlin/circulareconomy
 Elsa Madleen Jung (e.jung@tu-berlin.de)

DBFZ
 Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
 Torgauer Straße 116
 04347 Leipzig
www.dbfz.de
 Jana Mühlenberg (jana.muehlenberg@dbfz.de)

Tabelle 4

Übersicht zu ausgewählten Laboren

Mit welchen Methoden wird der Kompost untersucht?

Die Untersuchung des Komposts beginnt bereits mit der Probenahme. Der fertige Kompost lässt sich am besten während des Siebprozesses beproben. Dabei wurde im Projekt zirkulierBAR über den gesamten Siebprozess in regelmäßigen Abständen zwölfmal jeweils 1 kg Probe genommen.

Abbildung 13
Fertige Kompostmiete (links) und Siebprozess mit Probenahme (rechts)



© Finizio GmbH

Die 12 Proben wurden vereint, gut vermischt und bis zur notwendigen Probengröße verjüngt. Die Anzahl und Einzelprobenmenge richtet sich hierbei nach der Größe der Kompostmiete. Vorgaben dazu finden sich in der Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA PN98) (LAGA, 2019) sowie dem Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. (BGK, 2006).



Abbildung 14
Schematische Darstellung der Probenahme

Nach der Probenahme müssen die Proben gekühlt (bei 4–8 °C) aufbewahrt werden und zeitnah (innerhalb von 24 h) den Analysen zugeführt werden. Zeitkritische Parameter sind insbesondere der Wassergehalt, der Stickstoffgehalt (N-NH₄, N-NO₃) und die seuchen- und phytohygienischen Untersuchungen. Können die Untersuchungen nicht zeitnah erfolgen, müssen die Proben bei mindestens -20 °C eingefroren werden.

Die Untersuchungen erfolgen nach vorgegebenen Standards. Diese finden sich z. B. im Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft für Kompost e. V. (BGK, 2006), in den Methodenbüchern des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. (VDLUFA, 1995) sowie in den Standardvorschriften des Deutschen Instituts für Normung.



Abbildung 15

Methodenbuch BGK e. V., Methodenbuch VDLUFA,
DIN-Standardvorschriften (v. l. n. r.)

Wie hoch ist der Nährstoffgehalt des Recyclingdüngers?

Im Rahmen des Projektes zirkulierBAR wurden (Stand Sommer 2024) sieben Kompostmieten untersucht. Tabelle 5 liefert eine Übersicht ihrer Nährstoffgehalte. Die Werte zeigen, dass der Recyclingdünger aus Inhalten von Trockentoiletten nach DüMV als fester organisch-mineralischer NPK bzw. PK-Dünger einzuordnen ist.

	Schwellenwert* [% TS]	Mietenanzahl	Mittelwert [% TS]	Standardabweichung [% TS]	Min [% TS]	Median [% TS]	Max [% TS]
Hauptnährstoffe							
N	1,5	7	1,40	0,42	0,93	1,3	1,94
P ₂ O ₅	0,5	7	1,68	0,74	0,9	1,54	2,74
K ₂ O	0,75	7	1,33	0,32	1,05	1,24	1,81
Nebennährstoffe							
Ca ⁺⁺	5,7	7	3,16	0,50	2,49	3,07	3,78
MgO	–	7	1,11	0,16	0,87	1,08	1,39
Na	–	7	0,26	0,13	0,12	0,27	0,41
Se	0,0005	7	3,0E-5	9,0E-6	1,9E-5	3,1E-5	4,4E-5
S	–	7	0,32	0,15	0,17	0,31	0,5

* Schwellenwerte gemäß DIN SPEC 91421:2020-12 (Deutsches Institut für Normung, 2020) und DüMV

** Angaben für Calcium beziehen sich auf Gesamtcalcium, der Schwellenwert ist für wasserlösliches Calcium festgelegt.

Tabelle 5

Übersicht zu den Haupt- und Nebennährstoffen der bisher untersuchten Mieten im Projekt zirkulierBAR

Die Ergebnisse der Qualitätssicherung von Recyclingdüngern werden als Open-Access-Daten zur Verfügung gestellt (Mühlenberg et al. 2024). Der Datensatz ist auf Mendeley Data verfügbar und wird weiter ergänzt, so lange noch neue Ergebnisse hinzukommen: data.mendeley.com/datasets/fjv2bf6mh2/2

Was kostet die Qualitätskontrolle des Recyclingdüngers?

Die Kosten für eine umfassende Analyse nach DIN-SPEC91421:2020-12 (Deutsches Institut für Normung, 2020) sind abhängig vom ausgewählten Analyselabor. Die in Tabelle 6 angegebenen Kosten sind nur Richtwerte, da sich die Preise mit der Zeit ändern können. Durch die Ausstellung von Düngedeklarationen, akkreditierte Probenahmen und den Versand von Proben können zusätzliche Kosten anfallen.

Parametergruppe	Kosten
Standardparameter und Hauptnährstoffe (Rohdichte, Trockensubstanz (105 °C), organische Substanz, P, C/N-Verhältnis, N gesamt, Nitrat-N, Ammonium-N K, Mg, S, pH-Wert, Leitfähigkeit/Salzgehalt, basisch wirksame Stoffe)	120 – 200 Euro
Spurenelemente (Zn, Cu, Mo, Ni, Co, Mn, Se, Fe, B, Na, Ca) Schwermetalle (Pb, Cr, Ni, Hg, Tl, Cd, As)	40 – 210 Euro 30 – 140 Euro
Seuchen- und phytohygienische Parameter	215 – 320 Euro
Organische Schadstoffe (PAK, PFT, PCDD/PCDF, dl-PCB)	540 – 580 Euro
Pharmazeutische Rückstände inkl. Screening (Absprache mit Labor notwendig, da es bisher keine allgemeingültige Zusammenstellung der zu untersuchenden Pharmazeutika gibt, die rechtlich eingefordert wird)	355 – 380 Euro

Tabelle 6

Kostenübersicht zur Orientierung
(netto, Stand 3. Quartal 2023)

3.3

Ab aufs Feld

Den Kreislauf schließen

Wie wirken die neuen Recyclingdünger aus Inhalten von Trockentoiletten?

Autor:innen: Jan-Ole Boness, Ariane Krause, Katharina Müller

Warum wollen wir Nährstoffe recyceln?

Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) sind wichtige Nähr Elemente, die Pflanzen für ihr Wachstum benötigen. Sie erhalten diese Elemente in der Landwirtschafts- oder Gartenbau-Praxis häufig durch den Einsatz von Düngemitteln. Düngung ist essenziell, um den Ernteertrag langfristig zu sichern und die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Während mineralische Dünger hauptsächlich der Bereitstellung von Nährstoffen dienen, führen organische Dünger dem Boden neben Nährstoffen auch organische Substanz zu und unterstützen dort die Humusbildung.

Die Nutzung von Nährstoffen aus menschlichen Fäkalien spielt im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft eine wichtige Rolle. Viele Nährstoffe, die in Landwirtschaft, Gartenbau und im häuslichen Garten zum Einsatz kommen, werden unter hohem Einsatz von Energie hergestellt oder sind in ihrem Vorrat als Ressource endlich. Menschliche Fäkalien enthalten essenzielle Nährstoffe, die dem Nährstoffkreislauf wieder zurückgeführt werden können. Korrekt aufbereitet und qualitätsgesichert (z. B. nach DIN SPEC 91421:2020) können Recyclingdünger aus menschlichen Ausscheidungen schadlos das Pflanzenwachstum fördern und einen wichtigen Beitrag zur Humusreproduktion und Kohlenstoffspeicherung leisten.

Wie können wir Nährstoffe recyceln?

Das Recycling von Nährstoffen erfordert zunächst eine getrennte Erfassung der Stoffströme. Das ist z. B. mit Trenn- und Trockentoiletten möglich. Aus Urin lassen sich flüssige oder pulverige Mineraldünger mit recycelten Makro- und Mikronährstoffen herstellen, aus Fäzes kohlenstoffreiche organische Dünger und Bodenverbesserer (sogenannte „Humusdünger“).



Recyclingdünger aus den Inhalten von Trockentoiletten unterscheiden sich hinsichtlich ihres Ausgangsstoffes, was sich wiederum auf die Produkteigenschaft und mögliche Einsatzbereiche auswirken kann. Die Verwendungsmöglichkeiten richten sich vor allem nach dem Gehalt an Makronährstoffen (NPK) und deren Verhältnissen zueinander (siehe Kasten 1). Der Nährstoffgehalt in Urin und Fäzes hängt von der Ernährung ab und unterliegt deshalb Schwankungen (Jönsson und Vinnerås, 2004). Auch die Nährstoffgehalte in Gülle, Kompost oder Gärresten können schwanken, da sie stark von der Art und Menge des Inputmaterials abhängen. Der Großteil der Nährstoffe, die vom Menschen wieder ausgeschieden werden, befinden sich im Urin: etwa 90 Prozent des Stickstoffs, 50–65 Prozent des Phosphors und 50–80 Prozent des Kaliums. Fäzes enthält ebenfalls Phosphor und Kalium sowie organische Substanz mit Kohlenstoff (C) (Jönsson et al., 2004; Lapid, 2008; Viscari et al., 2018).

Recyclingdünger mit einem hohen Anteil an mineralischem Stickstoff zeigen in der Regel eine gute kurzfristige Düngewirkung. Dazu gehören z. B. tierische Gülle, frische Gärreste aus der Biogaserzeugung oder Recyclingdünger aus Urin. In der Schweiz, in Liechtenstein und in Österreich gibt es für den urinbasierten Recyclingdünger Aurin® bereits eine Zulassung für den Gemüsebau.

Fäzes enthalten im Vergleich zu Urin vor allem organisch gebundenen Stickstoff. Die Nährstoffe sind in der organischen Matrix eingebunden und mineralisierbar. Komposte aus Inhalten von Trockentoiletten (KIT) zeichnen sich daher eher durch eine langsame Freisetzung von organisch gebundenen Nährelementen aus und damit auch durch eine langfristige Nährstoffverfügbarkeit. Eine Düngung mit Humusdünger kann außerdem die organische Bodensubstanz erhöhen, was sich positiv auf Bodenstruktur, Wasserhaltekapazität sowie die Pufferkapazität des Bodens auswirkt.

Zur Vertiefung: In der Risikoanalyse von Krause et al. (2020) sind in Kapitel „(A.3) Gartenbauliche Eignung und Risiken von menschlichen Ausscheidungen“ (S. 18–23) weiterführende Informationen nachzulesen – z. B. zu Gehalten, Verhältnissen und Verfügbarkeiten spezifischer Nährstoffe in menschlichen Ausscheidungen und zu möglichen Risiken. Praktische Hinweise zur Ausbringungstechnik ergänzen die Analyse. Die Risikoanalyse

wurde auf Englisch auch in einem wissenschaftlichen Journal veröffentlicht (Krause et al., 2021).

Die DIN SPEC 91421:2020 enthält im Anhang E praktische Anwendungsempfehlungen wie Hinweise zur Ermittlung des Düngebedarfs oder zu Maßnahmen, um Auswaschungen oder Ausgasungen nach der Düngung zu vermeiden.

Dürfen Recyclingdünger aus Inhalten aus Trockentoiletten auf dem Feld genutzt werden?

Nach der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) bzw. der EU-Düngemittelprodukteverordnung (VO EU 2019/1009) sind Recyclingdünger aus getrennt von Abwasser erfasstem menschlichem Urin oder Fäzes/Kot noch nicht zugelassen (siehe Kapitel 2.2 „Alles, was Recht ist“). Der praktische Einsatz solcher Dünger ist daher in Deutschland bislang nicht gestattet. Eine Experimentierklausel im deutschen Düngerecht erlaubt jedoch das Inverkehrbringen und die Nutzung von Düngern und neuen Stoffen „zu Forschungs- und Versuchszwecken, die den Vorgaben des Düngegesetzes und dieser Verordnung (noch) nicht entsprechen“ (Vgl. §4, Abs. 4 DüMV). Auf dieser Basis wurden im zirkulierBAR-Projekt eine Reihe von Praxisversuchen durchgeführt. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen sind im Folgenden zusammengefasst.

Welche Versuche haben wir mit den Recyclingdüngern gemacht und was sind die Ergebnisse?

Ein Überblick über die Untersuchungen

Im Rahmen von zirkulierBAR untersuchte eine Arbeitsgruppe empirisch die ackerbauliche Wirkung von neuen Recyclingdüngern aus Inhalten von Trockentoiletten. In der Arbeitsgruppe kooperierte der Fachbereich Landschaftsnutzung und Naturschutz der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) mit den Fachgebieten Ackerbau/Pflanzenbau und Pflanzenernährung des Albrecht Daniel Thaer Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften der Humboldt Universität (HU) zu Berlin sowie der Schorfheider Agrar GmbH als regionaler Praxispartnerin.

Versuch	Ort	Partner:in	Untersuchungsziel	Bedingungen	Verwendete Recyclingdünger	Verwendete Referenzdünger	Versuchspflanze
Inkubationsversuche	Berlin Mitte	HNEE, HU	Ermittlung der mikrobiellen Atmung, Einschätzung der Humusreproduktionsleistung	Labor	KIT	Kompost (RAL-gütegesichert), Weizenstroh	keine
Gefäßversuch	Forstbotanischer Garten Eberswalde	HNEE, HU	Ermittlung der N-Düngewirkung	Kontrolliert, geschützter Anbau im Kalt-Gewächshaus	KIT	Keine Düngung	Mais
Gefäßversuch	Berlin Dahlem	HNEE, HU	Ermittlung der Dünge- & Schadwirkung (NP-Aufnahme und Seuchenhygiene)	Kontrolliert geschützter Anbau im Drahtgitterhaus	KIT	Keine Düngung, Mineraldünger	Mais
Parzellenversuche	Lehr- und Forschungsstation Thyrow	HU	Untersuchungen zur C-Dynamik, Verhalten bei unterschiedlichen Anwendungszeitpunkten (Herbst/Frühjahr), Überwachung der Schadwirkung (Schwermetalle)	Freiland mit sandigem Boden	KIT, KIT + Mineraldünger	Keine Düngung, Mineraldünger, Weizenstroh + Mineraldünger	Fruchtfolge: Winterzwischenfrucht – Silomais – Winterroggen
Anwendungsversuch	Zerpen-schleuse	HNEE, SAG	Ermittlung der Dünge- & Schadwirkung (N-Aufnahme, Seuchenhygiene, organ./anorgan. Schadstoffe), Erfahrungen mit Ausbringungstechnik	Freiland, on-farm, heterogener, vorwiegend sandiger Boden (19 BP)	KIT	Keine Düngung, Mineraldünger, Wirtschaftsdünger (Rinder-Stallmist)	Fruchtfolge: Winterroggen (2020/2021, 2021/2022), Winterzwischenfrucht/Leguminosen (2022/2023), Silomais (2023) Sonnenblume (2024)
Anwendungsversuch	Groß Schönebeck	HNEE, SAG	Ermittlung der Dünge- & Schadwirkung (N-Aufnahme, Seuchenhygiene, Pharmazeutika), Erfahrungen mit Ausbringungstechnik	Freiland, on-farm, Parabraun-Boden	KIT + UFIT	Keine Düngung, Mineraldünger	Silomais

Tabelle 7

Übersicht der empirischen Untersuchungen der ackerbaulichen Wirkung von Kompost aus Inhalten aus Trockentoiletten (KIT) und Flüssigdünger aus nitrifiziertem Urin (UFIT), durchgeführt von der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) in Kooperation mit der Humboldt Universität (HU) zu Berlin sowie der Schorfheider Agrar GmbH (SAG)

Der Fokus der wissenschaftlichen Arbeit lag auf (i) der Demonstration der Düngewirkung, (ii) dem Ausschluss möglicher Schädwirkungen sowie (iii) der Stabilität der Dünger und somit deren spezifischen Potenzialen bezüglich Humusaufbau und Kohlenstoffbindung. Außerdem wurde erprobt, inwieweit sich bereits vorhandene Ausbringungstechnik einsetzen lässt.

Untersucht wurden zwei Arten von Recyclingdünger, die beide im zirkulierBARReallabor hergestellt werden:

1. ein thermophiler Kompost aus Inhalten von Trockentoiletten (KIT) und
2. ein flüssiger Mineraldünger aus nitrifiziertem Urin (UFIT).

Von 2020 bis 2024 wurde eine Reihe von Düngerversuchen als Labor-, Gefäß-, Parzellen- und On-Farm-Versuche durchgeführt. Sie sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Abbildung 16 gibt außerdem einen Überblick über die Lage der Versuchsstandorte.

Erhoben wurden Daten zu Bodenparametern (z. B. pH-Werte, Konzentrationen im Boden an mineralischem Stickstoff, Phosphat, Schwermetallen etc.) und nutzpflanzenbezogenen Parametern (z. B. Ertrag in Frisch- und Trockenmasse, Körneranzahl etc.).

Abbildung 16

Lage der Versuchsstandorte



© Brandenburgviewer (www.bb-viewer.geobasis-bb.de)

Die Versuche fanden im Rahmen einer kumulativen Dissertation an HNEE und HU statt (Boness, in Arbeit) und wurden 2024 abgeschlossen. Die Ergebnisse sollen in wissenschaftlichen Journals veröffentlicht (Boness et al., 2024a) und auf Fachkonferenzen vorgestellt werden (Boness et al., 2024b). Eine übersichtliche Zusammenfassung von Aufbau und Ergebnissen der Versuche wird in der Dissertation von Boness (in Arbeit) zu finden sein. Nachfolgend ein erster Einblick in die Ergebnisse sowie Beobachtungen aus dem OnFarmAnwendungsversuch in Groß Schönebeck.

Erkenntnisse aus dem On-Farm-Anwendungsversuch

Der On-Farm-Versuch in Groß Schönebeck betrachtet einmalig die Kultur von Silomais (*Zea mays L.*). Er wurde durchgeführt, um die Dünge- und Schadwirkung (Stickstoffaufnahme, Seuchenhigiene, Pharmazeutika) zu untersuchen und Erfahrungen zur Ausbringungstechnik zu sammeln. Betrachtet wurde die kombinierte Recycling-Düngung mit KIT und UFIT im Vergleich zu mineralischer Düngung und einer ungedüngten Kontrollgruppe.

Nährstoffgehalte: Die gedüngten Varianten erhielten eine Gesamtstickstoffzufuhr von 100 kg N pro Hektar. Um die auszubringenden Düngermengen zu ermitteln, sind die Nährstoffgehalte der Dünger relevant. Die Nährstoffkonzentrationen von KIT wurden im Rahmen der Qualitätssicherung durch eine andere Arbeitsgruppe im Projekt analysiert (siehe Tabelle 5, S. 101). In den für die Anbauversuche genutzten KIT-Chargen betrug die Konzentration bei KIT durchschnittlich 1,6 Prozent N, 0,8 Prozent P und 1,2 Prozent K (Prozent bezogen auf die Trockenmasse). Beim getesteten flüssigen Mineraldünger aus nitrifiziertem Urin (UFIT) werden die Konzentrationen im Flüssigdünger vom Hersteller mit 4,2 Prozent Gesamt-N, 0,2 Prozent P und 1,5 Prozent K angegeben (Prozent bezogen auf die Frischmasse). Aufgrund von Variabilität im Ausgangsmaterial und Ungenauigkeiten in den Analysemethoden können diese Werte jedoch leicht schwanken. In eigenen Analysen stellten wir Konzentrationen von 5,4 Prozent Gesamt-N, 0,3 Prozent P und 1,6 Prozent K fest.

Wahl der Kultur: Sowohl KIT, als auch UFIT sind vielfältig einsetzbar. Die Untersuchungen in zirkulierBAR betrachten die Anwendung bei Mais und Winterroggen. Mais wurde als Kultur

gewählt, da diese Pflanze aufgrund ihres hohen Flächenanteils und des typischen Bedarfs an organischen Düngemitteln von besonderem Interesse ist. Mais ist eine Hackfrucht und zählt zu den Humuszehrnern. Das heißt, dass der Anbau von Mais zu einem Humusabbau im Boden führt. Auch die eingebrachten Mengen an Ernte- und Wurzelresten reichen nicht aus, um den Humusabbau zu kompensieren. Im konventionellen Ackerbau, vor allem in viehhaltenden Betrieben, wird Mais daher häufig organisch gedüngt, um die Humusbilanz auszugleichen. Zudem hat Mais einen besonders hohen Phosphorbedarf, insbesondere in der frühen Pflanzenentwicklung, so dass der P-reiche KIT hier ein geeigneter Dünger ist. Die Versuche zeigten, dass die Anwendung von KIT in Kombination mit dem Urindünger UFIT den Maisbestand bis zur Ernte ausreichend mit Nährstoffen versorgen kann (siehe Abb. 18, S. 120). In der Jugendentwicklung wurden die Pflanzen ausreichend mit P versorgt. Es wurden keine Phosphormangelsymptome festgestellt, die in vergleichbaren ökologischen Anbauverfahren häufiger auftreten.

Zeitpunkt der Anwendung: Für die Variante KIT + UFIT wurde KIT vor der Aussaat der Kulturpflanze ausgebracht. Die Düngung mit UFIT erfolgte im Jungpflanzenstadium. Die synthetisch-mineralische Düngung erfolgte ebenfalls vor der Aussaat. Die Kontrollvariante blieb ungedüngt.

Für die Ausbringung von KIT sollten dieselben Regeln wie für Kompost gemäß der Düngeverordnung (DüV) angenommen werden. Da KIT als langsam wirkender organischer Dünger die Nährstoffe über einen längeren Zeitraum freisetzt, ist eine Ausbringung vor der Wachstumsphase der Kulturpflanzen notwendig. Dies ermöglicht eine gründliche Einarbeitung und gewährleistet, dass die Nährstoffe gleichmäßig im Boden verteilt und verfügbar sind, wenn die Pflanzen ihren höchsten Bedarf haben. Gemäß den Vorgaben der DüV ist nach der Ausbringung von organischen Düngemitteln eine unverzügliche Einarbeitung in den Boden notwendig. Diese Einarbeitung muss in der Regel innerhalb von vier Stunden erfolgen, um Verluste durch Ammoniak-Ausgasung zu verhindern und die Nährstoffe im Boden zu fixieren. So wird sichergestellt, dass die wertvollen Nährstoffe nicht in die Atmosphäre entweichen, sondern den Pflanzen zur Verfügung stehen.

Ausbringungstechnik: Abbildung 17 zeigt die beim On-Farm-Versuch genutzten Ausbringungstechniken. KIT wurde mithilfe eines Tiefladerstreuers (Kompoststreuer/Miststreuer) auf das Feld gebracht. Der UFIT-Dünger wurde mit einer handelsüblichen Pflanzenschutzspritze ausgebracht, mit der auch andere Flüssigdünger appliziert werden.

Die praktischen Erfahrungen im Anwendungsversuch zeigten, dass eine Ausbringung von KIT mittels Miststreuer problemlos funktioniert. Sie ist eine Technik, die von Landwirt:innen gut zu handhaben ist. Die Rieselfähigkeit des Kompostmaterials hat sich in unseren On-Farm-Versuchen als günstig erwiesen, um mit betriebsüblicher Technik ein gleichmäßiges Streubild zu erreichen. Bei der nachfolgende Bedarfsdüngung mit UFIT zeigten sich Probleme hinsichtlich der Ausbringungstechnik: Aufgrund der relativ hohen auszubringenden Menge über Schleppschläuche waren mehrere Überfahrten nötig. Aufgrund der Nährstoffkonzentration des UFIT müssten, um den N-Düngerbedarf zu decken, je nach Kultur und Nährstoffvorrat im Boden etwa 1.000 bis 2.500 Liter UFIT pro Hektar ausgebracht werden. Da die Pflanzenschutzspritze nur max. 400 Liter pro Hektar schafft, müsste demnach mehrfach über das Feld gefahren werden. Da die Nährstoffkonzentration von UFIT der von Gülle ähnlich ist, könnte auch ein Güllefass mit Schleppschläuchen oder direkten Einbringscharen benutzt werden. Für den kleinen On-Farm-Versuch in Groß Schönebeck und die geringen Ausbringungsmengen war die Spritze praktikabel, nicht jedoch für einen praxistauglichen Einsatz.

Der Einsatz von aufkonzentriertem und nicht wieder verdünnten UFIT verursachte leichte Verbrennungsschäden an den Jungpflanzen, die sich jedoch später verwachsen. Bei UFIT ist – wie bei vergleichbaren Düngern (Ammonium-Sulfat-Lösung, Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung) – auf die Vermeidung von Ätزشäden zu achten. Zur Ausbringungstechnik für UFIT besteht daher weiterer Experimentier- und Austauschbedarf zwischen Wissenschaft und Praxis.

Düngewirkung und Nährstoffverfügbarkeit: Unsere Versuche konnten zeigen, dass die Rückgewinnung von Nährstoffen aus menschlichen Fäkalien eine praktikable und effektive Methode darstellt. Die Ergebnisse der Ertragsdaten (bezogen auf

Abbildung 17
genutzte Ausbringungstechnik für Kompost (oben und links) und den flüssigen Recyclingdünger aus Urin (rechts)



© zirkulierBAR, Finizio

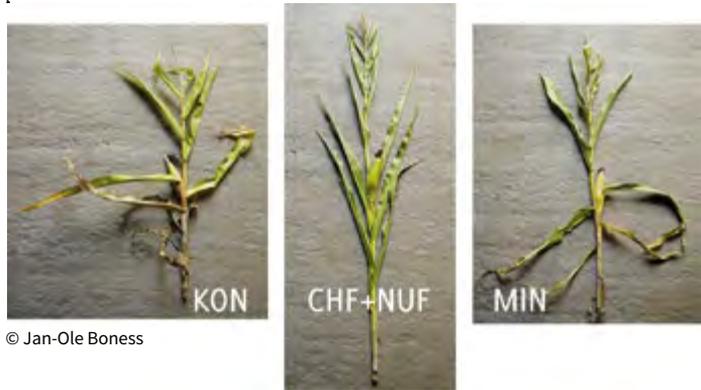
die Trockenmasse) belegen, dass die Recycling-Variante mit KIT + UFIT vergleichbare Erträge erzielte wie die Variante mit synthetischer Mineraldüngung (MIN). Die Erträge beider Varianten lagen ohne statistisch signifikante Unterschiede bei knapp 160 dt/ha-1. Die ungedüngte Kontrolle (KON) erreichte mit gut 100 dt/ha-1 lediglich zwei Drittel des vollen Ertrags (mit MIN = 100 Prozent) (Boness et al., 2024a).

Der UFIT kann aufgrund seines hohen Gehalts an schnell verfügbarem N als effizienter N-Dünger angesehen werden. KIT hingegen weist eine geringe kurzfristige N-Düngewirkung auf und trägt dadurch zu einer langfristigen Anreicherung des N-Reservoirs im Boden bei. KIT kann zudem den Gehalt an löslichem und somit pflanzenverfügbarem P und K in verarmten Böden erhöhen, wenn es in höheren Dosen (z. B. 20 bis 30 t/ha) ausgebracht wird.

Der hohe P-Gehalt im KIT erfordert besondere Aufmerksamkeit. Auf ertragsschwachen Böden kann der Phosphorentzug durch die Ackerkulturen innerhalb des Berechnungszeitraums für die Düngedarfbsberechnung nach DüMV zu gering ausfallen. Dann empfiehlt sich, den P-reichen KIT mit einem eher P-ärmeren aber N-reichen Dünger zu kombinieren – wie z. B. UFIT.

Abbildung 18

Maispflanzen nach der Ernte (KON: ungedüngte Kontrolle, CHF: composted human feces; NUF: nitrified urine fertilizer; MIN: synthetische Mineraldüngung)



© Jan-Ole Boness

Die dokumentierten Beobachtungen zum Pflanzenwachstum zeigen, dass die Maispflanzen, die mit KIT + UFIT gedüngt wurden, zum Zeitpunkt der Ernte deutlich weniger oder keine Anzeichen von Seneszenz (also Alterung) zeigten (siehe Abbildung 18). Die Beobachtungsdaten deuten auf eine kontinuierliche Versorgung der Pflanzen mit mineralisiertem Stickstoff hin. Weiterhin wurde vermutlich im feuchtwarmen Herbstklima auch in der späteren Vegetationsperiode noch Stickstoff aus KIT mineralisiert und den Pflanzen zur Verfügung gestellt.

Anwendungssicherheit: Ein Dünger soll gemäß der DüMV bei sachgerechter Anwendung die Fruchtbarkeit des Bodens, die Gesundheit von Menschen, Tieren und Nutzpflanzen nicht beeinträchtigen und den Naturhaushalt nicht gefährden. In diesem Zusammenhang wurden (i) der Eintrag von seuchenhygienisch relevanten Mikroorganismen (Krankheitserreger) und (ii) pharmazeutische Rückstände als relevante Faktoren für die Einschätzung einer möglichen Schädigung von Düngern aus Inhalten von Trockentoiletten identifiziert.

Aus den durchgeführten Versuchen kann kein gesundheitsrelevantes Gefährdungspotenzial der Düngung mit KIT hinsichtlich der Seuchenhygiene abgeleitet werden (Boness et al., 2024b). Obwohl im KIT die Anforderungen der DIN SPEC 91421 bzw. der deutschen DüMV in Bezug auf die Parameter E. coli, Salmonella spp. und Enterokokken eingehalten wurden, gab es Einträge durch KIT mit geringen Keimzahlen von E. coli und Enterokokken (Funde unterhalb der Grenzwerte nach DIN SPEC 91421 bzw. DüMV). Diese Einträge konnten jedoch in keinem Fall

im Boden wiedergefunden werden. In einem Gefäßversuch, in dem eine KIT-Miete mit geringem positivem Enterokokken-Befund (250 KBE²¹ pro g; Grenzwert < 1000 KBE pro g) verwendet wurde, war nach acht Wochen keine Belastung des Bodens mit Enterokokken mehr nachweisbar. Im Vergleich zu anderen organischen Düngern, die ebenfalls deutliche Einträge von Indikatororganismen in den Boden verursachen und dort nachweisbar sind, waren die in unseren Experimenten gemessenen Konzentrationen als moderat einzustufen (Boness et al. 2024b).

Hinsichtlich des Eintrags von pharmazeutischen Rückständen in den Boden wurde eine einmalige Düngung mit KIT und UFIT getestet. Bei einem Screening von 99 Wirkstoffen war weder vor noch nach der Düngung ein Positivbefund in den Bodenproben festzustellen. Unsere Untersuchungen zeigen, dass sich pharmazeutische Rückstände bei einer einmaligen Düngung mit KIT und UFIT nicht im Boden nachweisen lassen (Boness, in Arbeit).

Dennoch ist es beim Einsatz menschlicher Fäkalien in der Düngung wichtig, aufmerksam zu sein, um den Übertragungsweg Mensch-zu-Mensch für Krankheitserreger zu unterbrechen und die Kontamination von Böden mit Schadstoffen zu vermeiden. Die DIN SPEC 91421, die sich an geltenden Gesetzen wie den deutschen Düngemittel-, Bioabfall- oder Klärschlammverordnungen orientiert, bietet hierfür nach unseren Erkenntnissen eine solide Grundlage für die Qualitätssicherung der Recyclingdünger.

Humuswirkung: In Bezug auf die Humuswirkung wurde festgestellt, dass KIT hinsichtlich seiner Abbaustabilität vergleichbar ist zur Qualität herkömmlicher Biogut-Komposte (Boness, in Arbeit). Die jährliche Mineralisierungsrate von 5 Prozent im Anwendungsjahr und 4 Prozent, 3 Prozent und 3 Prozent in den Folgejahren, wie sie für andere Komposte empfohlen wird, kann auch für KIT übernommen werden. KIT trägt somit zur Humusanreicherung im Boden bei und fördert langfristig eine stabile Bodenstruktur.

21) KBE: Koloniebildende Einheiten

Vergleich zu anderen Studien mit Recyclingdüngern

Mehrere wissenschaftliche Studien zeigen vergleichbare Ergebnisse für die Anwendung von Recyclingdüngern in verschiedenen Anbausystemen. Recyclingdünger aus getrennt erfasstem Urin und Fäzes wurden weltweit mit verschiedenen Kulturen getestet (van den Broek et al., 2024 sowie Erkenntnisse aus dem Projekt MARA, siehe unten). Fäkalkompost wurde verwendet für Studien mit Salat, Okra, Banane, Kohl, Rettich, Süßkartoffel, Ackerbohne, Paprika, Weizen, Gerste, Mais, Tomate oder auch Akazie sowie Westindischem Mahagoni. Dünger aus nitrifiziertem Urin wurden experimentell getestet beim Anbau von Kohl, Tomate, Paprika, Rettich, Mais, Weizen, Raps, Salat oder Weidelgras. Die Studien bestätigen empirisch die positive Wirkung von urinbasiertem Recyclingdünger und Fäkalkomposten auf das Pflanzenwachstum.

Im Rahmen einer "Proof-of-Concept" Studie am IGZ wurden von 2018 bis 2022 bereits mehrere Versuche zur Untersuchung der Düngewirkung von Recyclingdüngern in verschiedenen Anbausystemen durchgeführt (siehe Abbildung 19), (vgl. Häfner et. al., 2023; Halbert-Howard et. al, 2020; Krause et al., 2020; Schröder et al., 2021).

Die Untersuchungsergebnisse zur Düngewirkung in Hydroponik (= Pflanzenaufzucht in Minerallösung) zeigen, dass es möglich ist, mit urinbasierten Recyclingdüngern vergleichbare Erträge zu erreichen wie durch eine synthetische Volldüngung (HalbertHoward et. al, 2020; Mauerer et. al, 2023). Die Lachgas-Emissionen sind dabei entweder gleich oder sogar geringer als bei organischen Vergleichsdüngern (Halbert-Howard et. al, 2020). Im hydroponischen Anbau ist außerdem der Grad der Nitrifikation bei der Urinbehandlung relevant, da ein zu hoher AmmoniumGehalt die Pflanzenwurzeln stressen kann.

Auch die Untersuchungen der Düngewirkung im Substrat und Boden ergaben, dass die Erträge nach Düngung mit Recyclingdüngern vergleichbar sind mit den Erträgen aus synthetischer oder organischer Vergleichsdüngung. Bei alleiniger Nutzung zeigt der Humusdünger über eine Vegetationsperiode eine geringere Düngewirkung im Vergleich zu Vinasse (pflanzlichem Flüssigdünger) (Häfner et. al., 2023). Die Kombination aus Kompost- und Urindünger erzielte jedoch höhere Erträge als nur Kompost.



© Oscar Monzon, Aladdin Halbert-Howard, Franziska Häfner, Corinna Schröder (IGZ e.V.)

Abbildung 19

Pflanzversuche mit Recyclingdüngern in verschiedenen Anbausystemen, durchgeführt am Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V. in Großbeeren, 2018–2020

Zwischen verschiedenen urinbasierten Flüssigmineraldüngern mit unterschiedlichem Nitrifikationsgrad wurde kein Unterschied gefunden. Bezüglich umweltrelevanter Emissionen konnte gezeigt werden, dass die Ammoniak-Emissionen bei Urin-Recyclingdüngern geringer sind als bei der vergleichenden Düngung mit konventionellem Harnstoff oder unbehandeltem Urin. Das Risiko zur Aufnahme von Medikamentenrückständen wird als gering eingeschätzt.

Das Netzwerk für nachhaltige Sanitärsysteme (NetSan) e.V. führt im Projekt MARA eine „MetaAnalyse wissenschaftlicher Daten zur Zusammensetzung und Wirkung von Recyclingdüngern aus menschlichen Ausscheidungen“ durch. Die Ergebnisse (Grafiken, Tabellen, Aussagen zur Eignung und zu Risiken der Dünger) sollen verständlich aufgeschrieben werden, für Praxis, Politik und Wissenschaft zugänglich und nützlich sein und online auf einer Wissensplattform veröffentlicht werden. Infos zum Projekt: www.netsan.org/projektmara/

Zusammenfassung und Ausblick

Erste Ergebnisse des Versuchs in Groß Schönebeck zur Wirksamkeit der Recyclingdünger deuten darauf hin, dass der Einsatz von Recyclingdüngern, die die Qualitätssicherungsstandards nach DIN SPEC 91421:2020 einhalten, keine Risiken für Boden, Pflanze und Ökosystem birgt. Hinsichtlich der untersuchten seuchenhygienisch relevanten Organismen, Schwermetalle und Salzgehalte konnten keine relevanten Erhöhungen festgestellt werden (Boness, in Arbeit).

Die bisherigen Ergebnisse sprechen dafür, dass die zunächst getrennt erfassten und behandelten Fäkalien als Recyclingdünger auf dem Feld wieder kombiniert werden sollten. Der organische Dünger aus den Feststoffen trägt hierbei langfristig zur Nährstoffversorgung und Bodenhumuspflge bei. Der flüssige Nährstoffdünger aus Urin liefert kurzfristig verfügbare Nährstoffe, die den Pflanzen vor allem in den wachstumsintensiven Phasen zugeführt werden. Ergebnisse bezüglich der Stabilität bzw. des spezifischen Mineralisierungsverhaltens des KIT und das damit verbundene Potenzial zur Kohlenstoffbindung durch Erhalt und Aufbau von organischer Substanz im Boden (Humus) weisen auf eine gute Vergleichbarkeit mit anderen Qualitätskomposten hin.

Hinsichtlich der geeigneten Ausbringungstechnik besteht noch Bedarf für weitere Erprobungen in Zusammenarbeit von Praxis und Wissenschaft. Als zielführend zeigten sich hier Anwendungsversuche in Kooperation mit Praxisbetrieben wie im beschriebenen On-Farm-Versuch.

Um die positive Wirkung von Recyclingdüngern aus Inhalten aus Trockentoiletten in der Agrarpraxis nutzen zu können, braucht es Abnehmer:innen für die Produkte in Landwirtschaft und Gartenbau. Die Ergebnisse aus dem Projekt zirkulierBAR zeigen, dass es bei den Ökolandbau-Verbänden eine grundlegende Akzeptanz für den Einsatz von Recyclingdünger gibt. Das Wirtschaften in Kreisläufen ist seit jeher ein zentrales Element der ökologischen Landwirtschaft (siehe auch Kapitel 2.1).



4

Kapitel

Fazit: Von der Linie zum Kreis

Der Weg in eine zirkuläre Zukunft

125

Fazit: Von der Linie
zum Kreis

Vom stillen Örtchen aus etwas fürs Klima tun? Die Forschungsergebnisse aus zirkulierBAR zeigen: Es ist möglich! Aus „Pfui“ kann „Hui“ werden und die Kreislaufführung menschlicher Ausscheidungen ist ökologisch sinnvoll und praktisch umsetzbar.

Die nötigen Technologien – ROSS und Aufbereitungstechniken – sind vorhanden und werden schon angewendet. Sie sparen nicht nur Wasser und Energie, sondern ermöglichen es, Krankheitskeime und Arzneimittelrückstände im Recyclingprozess zu entfernen. Die gewonnenen Recyclingdünger sind in Kombination ebenso wirksam wie mineralische Dünger. Auch die entscheidende Revolution in den Köpfen hat bereits begonnen: Trockentoiletten werden immer beliebter und ersetzen zunehmend Wasser- und Chemietoiletten. Auf Veranstaltungen und Festivals sind sie kaum mehr wegzudenken. Auch im Kleingarten- und Campingbereich sind sie eine beliebte Lösung. Die Verwertung der gesammelten Inhalte ist bislang jedoch eine rechtliche Grauzone und als Infrastruktur nicht etabliert. Es müssen eigene Entsorgungs- und Verwertungswege dafür gefunden werden.

Kommunen setzen bei der Wahl öffentlicher Toiletten zunehmend auf ressourcenorientierte Sanitärsysteme, denn sie sind standortflexibel und saisonal einsetzbar. Zudem entlasten sie die örtlichen Kläranlagen und verbessern die kommunale Klimabilanz. Umfragen zeigen schließlich: Die **Gesellschaft** wünscht sich grundsätzlich mehr Toiletten im öffentlichen Raum. Dabei sind die Menschen offen für Trockentoiletten. Das gilt auch für den Konsum von Gemüse, das mit den Recyclingdüngern gedüngt wurde. Auch für zu Hause wünschen sich immer mehr Menschen wassersparende und ressourcenschonende Alternativen zur herkömmlichen Wassertoilette. **Architekt:innen** und **Planende** haben das Potenzial von ROSS schon erkannt und plädieren für eine grundsätzliche Offenheit gegenüber diversen Sanitärlösungen – ob nass, wassersparend oder trocken. Die **Landwirtschaft** ist schließlich das zentrale Element, das den

Nährstoffkreislauf schließt. Sie bringt den Recyclingdünger aus und erzeugt damit pflanzliche Produkte. Das Interesse der Landwirt:innen an dem Dünger ist groß, denn die Nachfrage nach nachhaltigen Nährstoffquellen übersteigt das Angebot deutlich.

Was auf dem Weg zur Sanitär- und Nährstoffwende noch offen bleibt (und auch nicht in der Hand der Interessensgruppen liegt), ist die Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen auf kommunaler und insbesondere bundespolitischer Ebene. Eine Übergangslösung für existierende und entstehende Recyclinganlagen könnte der Status eines Reallabors liefern. Langfristig bedarf es klarer Zulassungen und Zertifizierungen für Trockentoiletten und Recyclingdünger, um die nötige Rechtssicherheit für diese Nachhaltigkeitstransformation zu schaffen.

Die Vision eines geschlossenen Nähr- und Kohlenstoffkreislaufes nimmt Gestalt an. Unseren „Beitrag“ dazu können wir alle leisten – Entscheidend ist, was wir daraus machen.

Literatur

Adam, R., Krause, A., Calmet, A., Jung, E., Schröder, C., Beneker, C., & Kirsten, C. (2023). Recyclingdünger: Warum wir eine Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen brauchen, um Wasser zu sparen, Schadstoffe zu reduzieren und Ressourcen zu schonen – Ein Positionspapier zur Sanitär- und Nährstoffwende. Berlin, Eberswalde, Großbeeren, Leipzig.
Verfügbar unter: www.zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/positionspapier-1/

Amlinger, F., Peyr, S., Hildebrandt, U., Müsken, J., Cuhls, C., Clemens, J. (2005). Stand der Technik der Kompostierung. Richtlinie des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
Verfügbar unter: www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/verwertung/bio/kompostierung.html

Bahrs, C. M. (2022). Recycling Performances in sanitären Nährstoffkreisläufen, Technische Universität Berlin.
Verfügbar unter: www.zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/#abschlussarbeiten

BioAbfV (2022). Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf Böden, Bioabfallverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. April 2013.

BGK (Hrsg.) (2006). Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate. 5. Aufl. Köln. Selbstverlag.

Boness, J.-O., Kautz, T., & Hoffmann-Bahnsen, R. (2024a). Fertilizing Effect of Novel Recycling Fertilizers from Human Excreta in a Pot Experiment with Maize (*Zea mays* L.). *Soil use and Management* 40(4).
Verfügbar unter: dx.doi.org/10.1111/sum.13151

Boness, J.-O., Kautz, T., & Hoffmann-Bahnsen, R. (2024b). Konzentrationen seuchenhygienisch relevanter Indikatororganismen im Boden nach Düngung mit Kompost aus menschlichen Fäkalien. VDLUFA-Schriftenreihe 81 Kongressband 2024. 135. VDLUFA-Kongress, Karlsruhe. Verfügbar unter: www.researchgate.net/publication/384395578_Konzentrationen_seuchenhygienisch_relevanter_Indikatororganismen_im_Boden_nach_Duengung_mit_Kompost_aus_menschlichen_Fakalien#fullTextFileContent

Boness (in Arbeit). Kreislaufwirtschaft: Entwicklung und Bewertung von Nutzungskonzepten für Inhalte von Trockentoiletten in Landwirtschaft und Gartenbau zur klimarelevanten C-Sequestrierung. Dissertation am Fachbereich Landschaftsnutzung und Naturschutz der HNEE und den Fachgebieten Ackerbau/Pflanzenbau und Pflanzenernährung des Albrecht Daniel Thaer-Instituts für Agrar- und Gartenbauwissenschaften der HU Berlin.

Bryson, J., Crosby, M. und Middleton Stone, M. (2006). The Design and Implementation of Cross-Sector Collaborations: Propositions from the Literature. *Public Administration Review* 66(1). Verfügbar unter: www.doi.org/10.1111/j.1540-6210.2006.00665.x

Bundesinformationszentrum Landwirtschaft BZL (2023). Wie hat sich der Marktanteil von Bio-Fleisch entwickelt? Verfügbar unter: www.oekolandbau.de/handel/marktinformationen/wie-hat-sich-der-marktanteil-von-bio-fleisch-entwickelt/

Deutsches Institut für Normung (2020). DIN Spec 91421: DIN SPEC 91421:2020-12, Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau, Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: www.dinmedia.de/de/technische-regel/din-spec-91421/330937272

DüMV (2019). Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482). Verfügbar unter: www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/index.html#BJNR248200012BJNE000100000

Eawag (2024). Aurin – der Dünger aus Urin. Verfügbar unter: www.eawag.ch/de/abteilung/eng/projekte/aurin-duenger-aus-urin/

Ebert, B., Birzle-Harder, B., Douhaire, C., Hübner, T., Schramm, E. und Winkler, M. (2021). Kompostprodukte aus hygienisierten Fäkalien und Pflanzenkohle. Bedürfnisse der Nutzenden, Kooperationsmodelle und rechtliche Rahmenbedingungen. Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH. Verfügbar unter: www.soe-publikationen.de/fileadmin/redaktion/ISOE-Reihen/msoe/msoe-65-isoe-2021.pdf

EU-Verordnung 2019/515 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. März 2019 über die gegenseitige Anerkennung von Waren, die in einem anderen Mitgliedstaat rechtmäßig in Verkehr gebracht worden sind und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 764/2008. Verfügbar unter: www.eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0515

EU-Verordnung 2019/1009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt. Verfügbar unter: www.eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009

Granstrand, O. und Holgersson, M. (2019). Innovation ecosystems: A conceptual review and new definition. Technovation. S. 90–91. Verfügbar unter: www.doi.org/10.1016/j.technovation.2019.102098

Häfner F., Monzon Diaz O. R., Tietjen S., Schröder C., Krause A. (2023). Recycling fertilizers from human excreta exhibit high nitrogen fertilizer value and result in low uptake of pharmaceutical compounds. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 2592. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1038175. Verfügbar unter: www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2022.1038175/full

Halbert-Howard A., Häfner F., Karlowsky S., Schwarz D., Krause A. (2020). Evaluating recycling fertilizers for tomato cultivation in hydroponics, and their impact on greenhouse gas emissions. *Environ Sci Poll Res. Recycling, Resource Recovery and Green Chemistry Practices*. S. 1–20. DOI: 10.1007/s11356-020-10461-4. Verfügbar unter: www.link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-10461-4

Huber, L. (2014). Forschungsbasiertes, Forschungsorientiertes, Forschendes Lernen: Alles Dasselbe? Ein Plädoyer für eine Verständigung über Begriffe und Unterscheidungen im Feld forschungsnahen Lehrens und Lernens. *Das Hochschulwesen*. 62. 1/2. S. 32–39. Verfügbar unter: www.hochschulwesen.info/inhalte/hsw-1-2-2014.pdf

Jönsson, H., Vinnerås, B. (2004). Adapting the nutrient content of urine and faeces in different countries using FAO and Swedish data. *Ecosan – Closing the Loop*. 2nd International Symposium on Ecological Sanitation. S. 623–626. Lübeck.

Jönsson H., Stintzing A. R., Vinnerås B., Salomon E. (2004). Guidelines on the use of urine and faeces in crop production. *EcoSanRes Publication Series*. Stockholm Environment Institute (SEI). ISBN 91-88714-94-2.

Köpping I, Mc Ardell C. S., Borowska E., Böehler M. A., Udert K. M. (2020). Removal of pharmaceuticals from nitrified urine by adsorption on granular activated carbon. *Water Res X*. 2020 Jun 2;9:100057. doi: 10.1016/j.wroa.2020.100057. PMID: 32566925; PMCID: PMC7298675.

Krause, A., Halbert-Howard, A., Schröder, C., Monzon O. R., Häfner, F. (2020). Evaluating novel recycling fertilizers for horticultural production. Summary of results from experiments conducted by the team working on „Nutrient Cycling“ at IGZ in 2019. Verfügbar unter: www.igzev.de/application/files/2517/2112/5694/IGZ_Experiment_Summary_sSiEUGreen_kompr_1.pdf

Krause, A., Häfner, F., Augustin, F., Harlow, E., Boness, J.-O., Udert, K. M. (2020). Risikoanalyse zur Anwendung von Recyclingdüngern aus menschlichen Fäkalien im Gartenbau. Arbeitsergebnis aus dem Projekt „DIN SPEC – Qualitätssicherung von Recyclingprodukten aus Trockentoiletten zur Anwendung im Gartenbau“. Verfügbar unter: www.igzev.de/application/files/4416/6748/5155/Krause-et-al-2020_DIN-Risikoanalyse_DE-2.pdf

Krause, A., Häfner, F., Augustin, F., Udert, K. M. (2021). Qualitative Risk Analysis for Contents of Dry Toilets Used to Produce Novel Recycling Fertilizers. *Circ Econ Sustain.* 2021;1(3):1107-1146. doi: 10.1007/s43615-021-00068-3. Verfügbar unter: www.link.springer.com/article/10.1007/s43615-021-00068-3

Krause A., von Hirschhausen C., Schröder E., Augustin F., Häfner F., Bornemann G., Sundermann G., Korduan J., Udert K. M., Deutsch L., Reinhardt M. L., Götzenberger R., Hoffmann S., Becker-Sonnenschein S. (2021). Ressourcen aus der Schüssel sind der Schlüssel – Wertstoffe zirkulieren, Wasser sparen und Schadstoffe eliminieren. Diskussionspapier zur Sanitär- und Nährstoffwende. Berlin, Hamburg, Zürich. Verfügbar unter: www.naehrstoffwende.org/diskussionspapier-naehrstoff-und-sanitaerwende/

KrWG (2023). Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212). Verfügbar unter: www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html

P2Green (2024). Closing the gap between fork and farm for circular nutrient flows. Laufzeit 01.12.2022 – 30.11.2026. FKZ 101081883. Horizon Europe.

LAGA (2019). Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32. LAGA PN 98 – Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen.

Lapid, D. (2008). Ecological Sanitation: A Hope for a Sustainable Future. Verfügbar unter: www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC26761.pdf

Mauerer, M., Rocks, T., Dannehl, D., Schuch, I., Mewis, I., Förster, N., ... & Schmidt, U. (2023). Replacing Mineral Fertilizer with Nitrified Human Urine in Hydroponic Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Production. *Sustainability*, 15(13), 10684. Verfügbar unter: www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10684

Martin, T. M. P., Aubin, J., Gilles, E., Auberger, J., Esculier, F., Levavasseur, F., McConville, J., & Houot, S. (2023). Comparative study of environmental impacts related to wheat production with human-urine based fertilizers versus mineral fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135123. doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135123

Mühlenberg, J., Jung, E. M., Kirsten, C. (2024). Characterisation of recycled fertilisers from dry toilet contents – analysis of nutrients, hygiene and harmful substances”, *Mendeley Data*, V2, doi: 10.17632/fjv2bf6mh2.2

Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations*. (5. Aufl.). New York. Free Press.

Rueß, J., Gess, C., und Deicke, W. (2016). Forschendes Lernen und forschungsbezogene Lehre – empirisch gestützte Systematisierung des Forschungsbezugs hochschulischer Lehre. *Zeitschrift für Hochschulentwicklung*, 11(2). S. 23–44. Verfügbar unter: www.zfhe.at/index.php/zfhe/article/view/914/723

Scheck G., Sundermann, G., Krause, A., von Hirschhausen C. (2023). Meta-Analyse von Life-Cycle-Assessments zu Toiletten mit Stoffstromtrennung. Verfügbar unter: www.zirkulierbar.de/wp-content/uploads/2024/03/zirkulierBAR_Meta-Analyse-LCA_TU-WIP.pdf

Schröder C., Häfner F., Larsen O. C., Krause A. (2021). Urban Organic Waste for Urban Farming: Growing Lettuce Using Vermicompost and Thermophilic Compost. *Agronomy* 2021, 11, 1175. DOI: 10.3390/agronomy11061175. Verfügbar unter: www.mdpi.com/2073-4395/11/6/1175

Schürhoff, S. (2023). Charakterisierung von Flüssigsubstraten aus wasserlosen Toiletten und verfahrenstechnische Implikationen auf die Herstellung eines Recyclingproduktes. Berlin University of Applied Sciences and Technology. Verfügbar unter: www.zirkulierbar.de/wissen/projektergebnisse/#abschlussarbeiten

Simha, P., Barton, M., Perez-Mercado, L., McConville, J., Lalander, C., Magri, M., Dutta, S., Kabir, H., Selvakumar, A., Zhou, X., Martin, T., Kizos, T., Katakai, R., Gerchman, Y., Herscu-Kluska, R., Alrousan, D., Goh, E., Elenciuc, D., Głowacka, A., Korculanin, L., Tzeng, R., Ray, S., Niwagaba, C., Prouty, C., Mihelcic, J. und Vinnerås, B. (2021). Willingness among food consumers to recycle human urine as crop fertiliser: Evidence from a multinational survey. *Science of The Total Environment*. 765. Verfügbar unter: www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144438

Utai, K., Narjes, M., Krimly, T., & Lippert, C. (2022). Farmers' preferences for fertilizers derived from domestic sewage and kitchen waste – A discrete choice experiment in Germany. *German Journal of Agricultural Economics*. 71. 4. S. 169–183. Verfügbar unter: www.doi.org/10.30430/gjae.2022.0235

VDLUFA (Hrsg.) (1995). Die Untersuchung von Düngemitteln. Methodenbuch Band II.1. 4. Aufl., Darmstadt, VDLUFA-Verlag.

Viscari, E-L., Grobler, G., Karimäki, K., Gorbatova, A., Vilpas, R., Lehtornanta, S. (2018). Nitrogen Recovery with Source Separation of Human Urine – Preliminary Results of Its Fertiliser Potential and Use in Agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2:32.

Wolf, M., Schönfelder, W., Konetzki, E., Brouwer, S., van Aalderen, N., Backes, H., Salmon, S., Londong, J. und Kraft, E. (2023). Akzeptanz ressourcenorientierter Sanitärsysteme – Erkenntnisse aus der Jenfelder Au in Hamburg. Verfügbar unter: www.gwf-wasser.de/produkt/akzeptanz-ressourcenorientierter-sanitaersysteme/

zirkulierBAR (2024). Interkommunale Akzeptanz für nachhaltige Wertschöpfung aus sanitären Nebenstoffströmen. Förderung durch Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen von „REGION.innovativ – Kreislaufwirtschaft“. Laufzeit 01.06.2022 – 31.12.2024. FKZ 033L242.

Impressum

REGION.innovativ – zirkulierBAR

Projektkoordination

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V.
Theodor-Echtermeyer-Weg 1, 14979 Großbeeren
www.zirkulierbar.de

Dr. Ariane Krause
zirkulierbar@igzev.de

Konzept und Redaktion

Felix Bickert, Anna Calmet, Annika Grebener

Lektorat

Elbetext, Dr. Thomas Orthmann

Satz und Layout

MedienMélange: Kommunikation!

Titelbild

Illustration lizenziert unter CC BY-SA 4.0, IGZ e.V.,
gezeichnet von Aaron-João Markos

Datum: 15. Dezember 2024



Kostenlose PDF-Version verfügbar unter:

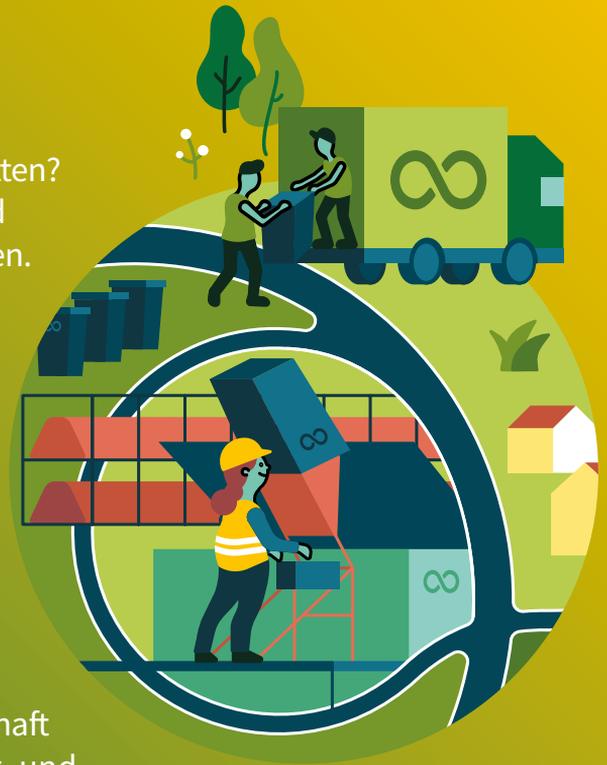
[www.naehrstoffwende.org/
zirkulierbar-handbuch](http://www.naehrstoffwende.org/zirkulierbar-handbuch)



Die Inhalte des Dokuments sind unter Creative Commons – Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International – CC BY-SA 4.0 lizenziert. Sie sind frei verfügbar, können von anderen genutzt, geteilt und verändert werden, wenn Wiederveröffentlichung unter gleichen Bedingungen (SA = Share Alike) und Namensnennung (BY) erfolgt. Existierende Marken- und Lizenzrechte (z. B. Firmenlogos) bleiben bestehen und sind von der CC-Lizenz ausgenommen. Enthaltene urheberrechtlich geschützte Fotos und Abbildungen sind ebenfalls von der CC-Lizenz ausgenommen und sind entsprechend gekennzeichnet.

Das diesem Handbuch zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme REGION.innovativ und unter dem Förderkennzeichen 033L242A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

Vom stillen Örtchen aus etwas fürs Klima tun oder gar den Planeten retten? Es sind nicht immer die großen und sichtbaren Dinge, die etwas bewegen. Viele wirksame Veränderungen beginnen im Verborgenen. Die Notdurft, die wir täglich verrichten, kann dazu beitragen, unsere Umwelt und Ressourcen zu schonen. Klingt erst mal seltsam und bedarf einer Revolution in unseren Köpfen: Aus „Pfui“ wird „Hui“. Menschliche Ausscheidungen werden aufbereitet und als Recyclingdünger in der Landwirtschaft eingesetzt. Es geht um eine Sanitär- und Nährstoffwende: Mit Hilfe neuer Sanitärsysteme und Aufbereitungsanlagen werden Nährstoffe aus unserer verzehrten Nahrung wieder in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt. Das schont Ressourcen, spart Wasser und reduziert klimaschädliche Stoffe.



Das Handbuch für die Sanitär- und Nährstoffwende bündelt die Erfahrungen und Ergebnisse aus dem dreijährigen Forschungsprojekt zirkulierBAR. Es ist ein Praxisleitfaden für kommunale Mitarbeitende, Planende, Landwirt:innen und alle Interessierten. Es illustriert, welche Wege, Gestaltungsoptionen und Herausforderungen es auf dem Weg in eine zirkuläre Zukunft gibt. Den täglichen „Beitrag“ dazu leisten wir eh. Entscheidend ist, was wir draus machen.

Konsortiumsmitglieder im Verbund-Forschungsvorhaben zirkulierBAR sind:

