



Die Toilette der Zukunft

Themenkurzprofil Nr. 45 | Simone Ehrenberg-Silies | Mai 2021

Mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung hat keinen Zugang zu einer sicheren Sanitärversorgung mit zum Teil verheerenden Auswirkungen für die menschliche Gesundheit, Natur und Umwelt. Eine weltweite Implementierung der in den westlichen Industrieländern weit verbreiteten und an Kanalisation und Kläranlagen angeschlossenen Wasserklosetts (WC) scheint aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen und Unterhaltungskosten sowie der vielerorts drohenden Wasserknappheit ungeeignet. Zudem sind konventionelle Toilettentechnologien nicht auf nachhaltiges Nährstoffmanagement und/oder Energiegewinnung ausgerichtet und schöpfen das Potenzial zur Verwertung menschlicher Ausscheidungen nicht aus. Vielversprechend erscheinen Innovationen wie NoMix-Toiletten zur Urinseparation, um daraus auf energiesparende Weise wertvollen Pflanzendünger zu gewinnen, oder Nanomembran-Toiletten, die ohne Wasser und externe Energiequellen auskommen. Diese Technologien stecken jedoch überwiegend noch am Anfang der Entwicklung und erfordern weitere Forschungsanstrengungen, etwa hinsichtlich der Effektivität der mechanischen Spülung bei der Nanomembran-Toilette. Zudem ist die Implementierung neuartiger Toilettentechnologien in vorhandenen Abwasserinfrastrukturen nicht selten voraussetzungsreich. Zum Beispiel wäre die Einführung der NoMix-Toilette in Bestandsbauten schwierig, zumal sie eine separate Abwasserleitung für Urin erfordert, solange es keine Aufbereitungsmöglichkeit neben der Toilette gibt.

Da in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern flächendeckend kaum etablierte Toiletteninfrastrukturen existieren, lassen sich Technologieinnovationen hier schneller einführen. Hierzu tragen auch die politisch intendierten Toilettenprogramme von bevölkerungsreichen Ländern wie China und Indien bei.

Während es in diesen Ländern primär um die Gewährleistung besserer und nachhaltiger Hygienebedingungen für breite gesellschaftliche Schichten geht, werden für die Industrieländer auch weitreichendere Gesundheitsziele verfolgt. Beispielsweise wird an Toiletten geforscht, die auf medizinischem Niveau Gesundheitsanalysen von Kot und Urin durchführen und damit perspektivisch einen Beitrag zu Diagnosen und Prävention von Krankheiten leisten könnten.

Hintergrund und Entwicklung

Seit Beginn der Menschheitsgeschichte erfanden verschiedene Zivilisationen Methoden und Technologien, um sich ihrer Exkremente in der Umwelt zu entledigen (Antoniou et al. 2016, S.1). Bis sich jedoch komplette Sanitärsysteme entwickelten, die unterschiedliche Technologien und Dienstleistungen für alle Schritte der Sanitärversorgung – Sammlung, Aufbewahrung, (Vor-)Behandlung, Transport und Beförderung, (semi)zentralisierte Behandlung in Kläranlagen, Verwertung bzw. finale Beseitigung (Tilley et al. 2014, S.10 u. 12) – miteinander verbanden, dauerte es mehrere tausend Jahre. Auch heute haben hunderte Millionen von Menschen noch keinen Zugang zu sanitären Grundeinrichtungen wie Toiletten und Latrinen (WHO 2019; WHO/UNICEF 2017, S.29). Ein Blick in die Geschichte der Sanitärversorgung zeigt eine gewisse Persistenz von Technologien und Verfahren, die eine zügige Verbreitung von Innovationen zumeist behindert sowie auch Phasen der Technologiedegeneration kennt.

Bereits 3.000 Jahre vor unserer Zeitrechnung (v.u.Z.) wurden in den Städten Mesopotamiens Klärgruben genutzt. Bis 2.500 Jahre v.u.Z. können in dieser Region Toiletten in Bädern nachgewiesen werden. In der bronzezeitlichen In-

duskultur 1.900 Jahre v.u.Z. im Nordwesten des indischen Subkontinents bauten die Menschen im Erdreich unter ihren gittermusterartigen Straßen Kanalisationsnetze und spülten ihre Toiletten mit Wasser. Im antiken Griechenland wurden 350 Jahre v.u.Z. mehrsitzige heimische oder öffentliche Toiletten über Abwasserkanälen gebaut und um das Jahr 100 herum entstanden im Römischen Reich öffentliche Latrinenanlagen nach dem gleichen Prinzip. Unter den Sitzbänken wurde kontinuierlich mit Wasser aus den Aquädukten gespült (Antoniou et al. 2016, S.2 u. 50). Im Mittelalter finden sich an Burgen und manchen Wohnhäusern Aborterker oder -schächte, die menschliche Exkremte (im freien Fall) in Wassergräben oder nach außerhalb der Burgmauern befördern. Die normale Bevölkerung nutzte in der Regel Nachttöpfe, die sie in den Gassen entleerte, da häusliche Entwässerungssysteme im Mittelalter noch die absolute Ausnahme bildeten (Antoniou et al. 2016, S.27 u. 50; BR Wissen 2020). 1556 entwickelte der englische Dichter Sir John Harrington für Königin Elisabeth I. ein Spülklosett mit Zisterne. 1775 meldete der Schotte Alexander Cummings das Patent für das WC an (Antoniou et al. 2016, S.50).

Erst in den 1860er Jahren wurden zunächst im englischen Manchester Häuser mit WCs gebaut (BR Wissen 2020). Das Abwasser dieser ersten WCs wurde üblicherweise in Flüsse eingeleitet, wodurch jedoch großer Gestank resultierte. Da die Menschen ihr Trinkwasser auch aus den Flüssen bezogen, kam es regelmäßig zu dramatischen Krankheitsausbrüchen (z.B. Cholera, Typhus) (The British Association of Urological Surgeons o.J.). Wien gilt als erste Stadt, die Mitte des 18. Jahrhunderts innerhalb ihrer Stadtmauern über ein Kanalisationssystem verfügte (Stadt Wien 2019). 1858 wurde mit dem Bau des Londoner Kanalisationssystems begonnen (Wedlich 2020), 1873 mit dem Berlins (Krzywaneck 2004). Die erste Kläranlage auf dem europäischen Festland wurde von 1883 bis 1887 im Stadtteil Niederrad in Frankfurt am Main errichtet (Thomas 2020).



In westlichen Industrieländern hat sich seitdem wenig an der Art und Weise verändert, wie menschliche Exkremte entsorgt werden: Die Bevölkerung nutzt überwiegend WCs (BR Wissen 2020) und Haushalte sind an Sanitär- und Abwasserentsorgungssystemen angeschlossen. Der Anschlussgrad an Kläranlagen lag im Vereinigten Königreich 2018 beispielsweise bei 100% (97,3% Anschluss an das Kanalnetz), in Deutschland bei 97,12% (ebenfalls Kanalnetz), in Rumänien allerdings nur bei 51,5% (52,9% Anschluss an das Kanalnetz) (Statista 2020). Für die USA wird angenommen, dass 75% der Haushalte an zentrale Kläranlagen angeschlossen sind und die verbliebenen 25% an autonome Kleinkläranlagen (Umann 2020). Es gibt allerdings Hinweise darauf, dass mehr als 2 Mio. Menschen in den USA keinen Zugang zu sicherem Trinkwasser und zu einer Sanitärversorgung haben (Dig Deep/US Water Alliance 2019, S.12 u. 22).

Eine weltweite bzw. umfassende Implementierung von WCs, die über gebäudeinterne Abwasserleitungen an die öffent-



liche Kanalisation angeschlossen sind, scheint insbesondere für viele Entwicklungs- und Schwellenländer aufgrund der hohen Kosten für den Bau und die Instandhaltung von Kanalisationssystemen und Kläranlagen sowie aufgrund vielerorts drohender Wasserknappheit nicht möglich bzw. sinnvoll zu sein. Doch auch in den Industrieländern wird inzwischen nach Alternativen zum herkömmlichen WC gesucht. Übergeordnetes Ziel bei der Entwicklung neuartiger Toilettentechnologien für Entwicklungs- und Schwellenländer ist zumeist, überhaupt erst einmal eine hygienische Grundversorgung der Bevölkerung zu ermöglichen. Für Industrieländer machen Toiletteninnovationen von sich reden, die für weitreichendere gesundheitsbezogene bzw. medizinische Anwendungen (intelligente Toilette) konzipiert sind. Zahlreiche Toiletteninnovationen orientieren sich zudem an der Definition der Vereinten Nationen (UN) für nachhaltige Toiletten. Demnach ist ein Toiletten- und Abwassersystem nachhaltig, wenn Exkremente in einer sicheren, zugänglichen und menschenwürdigen Umgebung aufgefangen, sicher gelagert, transportiert, behandelt und entsorgt bzw. produktiv zur Nährstoff- und Energiegewinnung genutzt werden. Eine nachhaltige Verwertung spart Wasser, mindert und bindet Treibhausgasemissionen und trägt zur Versorgung der Landwirtschaft mit Nährstoffen und sauberem Wasser bei (UN o.J.).

Im folgenden Abschnitt werden drei Toiletteninnovationen exemplarisch vorgestellt, die im Wesentlichen, aber nicht ausschließlich, für neue Herangehensweisen an die Themen Nährstoffmanagement (NoMix-Toiletten), Autarkie- und Energieversorgung (Nanomembran-Toilette) sowie Gesundheit (intelligente Toilette) stehen.

NoMix-Toiletten

Sogenannte Quellentrennungstechnologien für Toiletten (Source Separation Technologies) werden schon seit einigen Jahrzehnten erforscht und sind wie die urinseparierende Trockentoilette seit den 1970er Jahren in Gebrauch. Urinseparierende NoMix-Spültoiletten wurden in den 1990er Jahren in Schweden erfunden. Treiber der Innovation war damals vor allem die erwartete Phosphorknappheit (Larsen et al. 2009, S.6121f.). Ziel von NoMix-Toiletten ist die Urinseparation, also die Trennung nährstoffreichen Urins vom Wasser.

Urin enthält beträchtliche Mengen an Stickstoff, Phosphor und Kalium, die zur Pflanzendüngung eingesetzt werden können. Die derzeitige Weltbevölkerung scheidet rund 25 Mio. t/Jahr Stickstoff, 1,8 Mio. t/Jahr Phosphor und 5,5 Mio. t/Jahr Kalium aus. Als Düngemittel eingesetzt, hätten die Ausscheidungen einen Marktwert von rund 20 Mrd. US-Dollar. Die industrielle Ammoniakproduktion für die gleiche Menge an Dünger würde 1.100 PWh¹/Jahr an Primärenergie verbrauchen (Larsen 2020 S.2). Eine

Urinseparation könnte somit zu enormen Energieeinsparungen führen. Zum Vergleich: Deutschland hatte 2020 einen Primärenergieverbrauch in Höhe von 11,8 Exajoule (Statista 2021), dies entspricht rund 3,3 PWh.

Ein Beispiel für eine NoMix-Toilette ist „save!“, die von der Schweizer Firma Laufen zur Produktreihe entwickelt und auf den Markt gebracht wurde. Sie basiert auf Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Eidgenössischen Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (Eawag) und Designern der österreichischen Firma EOOS. Sie baut auf der „Blue Diversion Toilet“ auf, die 2011 aus der Beteiligung der Eawag an der „Reinvent the Toilet Challenge“ der Bill & Melinda Gates Foundation hervorging.

Technisch wird die Urinseparation mit einer sogenannten Urinfalle umgesetzt: Der Urin gelangt über eine angewinkelte Wanne an der Vorderseite der Toilette in eine nicht-sichtbare Öffnung. Schwerkraft und die durch numerische Strömungssimulation optimierte Geometrie der Toilette wirken zusammen und erzeugen den hydrodynamischen „Teekanneneffekt“: Wird die Flüssigkeit in einer Teekanne langsam ausgegossen, tropft sie an der Tülle herunter; wird hingegen schnell gegossen, entsteht ein bogenförmiger Strahl. Der Teekanneneffekt wird allerdings nur wirksam, wenn der Toilettengang im Sitzen stattfindet. Bei der NoMix-Toilette sorgt der Teekanneneffekt dafür, dass das schnell fließende Spülwasser über die Urinfalle hinweg-schießt und die Fäkalien direkt in den normalen Abfluss schwemmt (Eawag 2019; Tucker 2019). Grundsätzlich gibt es nach der Urinseparation an der Quelle zwei Möglichkeiten für das weitere Nährstoffmanagement: die Vor-Ort-Behandlung des Urins oder aber den Transport zu einer zentralen Urinaufbereitungsanlage per Kanalisation oder Lkw (Larsen et al. 2009, S.6123).



1 Petawattstunde (PWh) entspricht 1 Billion Kilowattstunden (kWh).



Eine Vor-Ort-Behandlung des Urins wird zurzeit im Wesentlichen in Forschungsprojekten und von Forschungseinrichtungen wie der Eawag erprobt. Im Untergeschoss des Eawag-Hauptgebäudes wird der dort in den NoMix-Toiletten anfallende Urin in Form von Dünger und destilliertem Wasser (für eine erneute Toilettenspülung) aufbereitet (Eawag 2015). Technologien, die eine direkte Aufbereitung neben der Toilette ermöglichen würden, sind für die NoMix-Toilette noch nicht verfügbar (Eawag 2019). Sie wären eine Voraussetzung dafür, dass NoMix-Toiletten in Bestandsbauten eingeführt werden könnten.

Unabhängig davon, ob der Urin nun im Gebäude selbst oder andernorts aufbereitet werden soll, bedarf es neuer Abwasserleitungen für ihn. Diese könnten bei Neubauten eingeplant bzw. bei größeren Renovierungsarbeiten nachgerüstet werden (Eawag 2019).

Für eine Weiterleitung des Urins per Kanalisation sind verschiedene Ansätze denkbar. Beispielsweise könnten unterschiedliche Rohre für Urin, Fäkalien und Grauwasser (leicht verschmutztes Abwasser ohne Fäkalien) verlegt werden, was jedoch mit erheblichen Investitionen verbunden wäre. Eine Alternative wäre die konzentrierte Einleitung des Urins in vorhandene Rohrsysteme in der Nacht, wenn in der Regel nur wenig Grau- und Schwarzwasser durch die Kanalisation fließt. Neben der möglichen Geruchsbelästigung besteht hier jedoch die Gefahr, dass im Fall von Starkregen über die Hochwasserentlastung ungereinigter Urin in die Gewässer gelangt. Als Interimslösung gilt eine Zwischenspeicherung des Urins in einem 10 l umfassenden Speicher, der in die NoMix-Toilette integriert werden kann. Die Einleitung des Urins in die Kanalisation kann anschließend mittels einer einfachen Steuerungsstrategie über 24 h verteilt werden. Dadurch können vor allem Spitzen bei der Stickstofffracht in Kläranlagen – wie die sogenannte Morgenspitze, die aus der intensiven Nutzung von Toiletten nach dem Aufstehen und einem höheren Konzentrationsgrad von Urin am Morgen entsteht – abgemildert werden. Durch eine Zwischenspeicherung des Urins ließe sich der beispielsweise durch Bevölkerungswachstum notwendig werdende teure Ausbau von nitrifizierenden Kläranlagen ganz vermeiden oder zumindest aufschieben. Als Alternative wäre auch die Sammlung des Urins in großen Tanks und ein Weitertransport mit Lkw vorstellbar (Eawag 2007; Larsen et al. 2009, S.6123).

Für Urin, der in wasserlosen Urinalen oder in NoMix-Toiletten gesammelt werden konnte, hat die Eawag ein Verfahren zur Herstellung von Pflanzendünger entwickelt, der in der Schweiz und Deutschland zugelassen ist. In dem Verfahren wird der Stickstoff im Urin durch Nitrifikation stabilisiert. Aktivkohlefilter entfernen Hormone und Medikamente (Vuna GmbH o.J.). In einer wissenschaftlichen Studie konnte nachgewiesen werden, dass eine Kombination aus Nitrifikation und Pulveraktivkohle(PAC)-Adsorption die Herstellung eines sicheren Düngers mit hinlänglich niedriger Arzneimittel-Östrogen-Konzentration unter Beibehaltung nützlicher Nährstoffe zulässt (Özel Duygan et al. 2021). Mögliche Krankheitskeime werden in einem späteren Verfahrensschritt durch Eindampfen beseitigt, zugleich wird das Volumen reduziert (Vuna GmbH o.J.).

Nanomembran-Toilette

Die Nanomembran-Toilette der Cranfield University im Vereinigten Königreich ist ein tragbares und in sich geschlossenes System, welches nach seiner Inbetriebnahme ohne Wasserspülung und externe Energiequelle autark funktioniert und deshalb vor allem für Städte ohne Wasser- und Energieversorgung entwickelt worden ist. Anstatt einer Wasserspülung befördert ein Rotationsmechanismus die menschlichen Exkremente zunächst in einen geruchsdicht verschlossenen Behälter. Der Rotationsmechanismus wird durch Schließen des Toilettendeckels aktiviert, die Kloschüssel beginnt sich zu drehen und ein Wischer transportiert Urin und Kot in den Behälter. Von dort befördert ein Schneckengewinde den Kot in eine Trockenkammer. Die getrockneten Feststoffe fallen anschließend in eine kleine Brennkammer, die sich in der Toilette selbst befindet. Dort werden sie zu Asche verbrannt. Durch den einmal initiierten Verbrennungsprozess wird im weiteren Verlauf dann die gesamte Energie erzeugt, die die Nanomembran-Toilette benötigt. Die übrig gebliebene Flüssigkeit wird vaporisiert, durch Nanomembranen gereinigt und wieder zu Wasser (kein Trinkwasser) kondensiert, was sich im Haushalt und Garten verwenden lässt. Die Nanomembran-Toilette ist auf 10 Nutzende täglich und eine Lebensdauer von 10 Jahren ausgelegt (Canales 2019). Erste Feldtests mit Prototypen der flüssigkeitslosen, mechanischen Toilettenspülung wurden in den Jahren 2016/2017 in der Gemeinde eThekweni in Südafrika durchgeführt. Mit der mechanischen Spülung gelang es, die meisten Fäkalien aus der Toilettenschüssel zu entfernen, und auch die Geruchsbarriere zwischen der Toilettenschüssel und den darunterliegenden Ausscheidungen funktionierte befriedigend, jedoch verblieben häufig Verschmutzungen in der Toilettenschüssel. Zukünftige Forschungsarbeiten richten sich deshalb auf die Widerstandsfähigkeit der Schüssel gegen Verschmutzungen, beispielsweise durch die Applikation geeigneter Beschichtungen, das automatische Aufbringen eines Schmiermittelsprays und veränderte Geometrien sowie die Funktionsfähigkeit des Wischers (etwa Materialwahl und Design) (Hennigs et al. 2019, S.427f.).

Intelligente Toilette

Exkremate lassen sich nicht nur zur Nährstoff- und Energiegewinnung verwenden, sie können auch Auskunft über die menschliche Gesundheit geben. Zur Diagnose von Krankheiten durch die Analyse von Urin und Kot mittels neuartiger Toilettentechnologien existieren bereits unterschiedliche Prototypen, jedoch nur wenige kommerzielle Produkte, vor allem in Japan. Die erhältlichen Modelle liefern zumeist keinen klinischen Mehrwert, da sie lediglich einfache Parameter wie Urintemperatur, Ernährung (z.B. Blutzuckerspiegel), Körperfett und Körpergewicht messen. Letzteres erfolgt bei einigen Varianten über in den Boden von Bädern eingelassenen Wagen oder durch Sensoren in Armlehnen (Körperfett), also nicht durch die Toilette selbst. Überhaupt ist die Gestaltung der Schnittstelle zur Übermittlung der Informationen aus Kot- und Urinanalysen zwischen Klinik und Privathaushalten eine große Herausforderung. So erfordern beispielsweise eine Stuhlprobenahme und -analyse die Homogenisierung des Stuhls, was nicht einfach automatisiert möglich ist. Zudem erschweren zurzeit die hohen Preise für intelligente Toiletten von mehreren tausend Euro ihre Markteinführung und Verbreitung (Baggaley 2019; Park et al. 2020, S.625).

Eine Arbeitsgruppe an der Stanford University School of Medicine setzte an diesen Unzulänglichkeiten verfügbarer Technologien an und entwickelte vollautomatische Toilettenmodule, bestehend aus Soft- und Hardwarekomponenten, mit denen sich konventionelle Toiletten aufrüsten lassen. Diese Module identifizieren das Wasserlassen mit einem Infrarotsensor. Daraufhin wird ein konventioneller Teststreifen aus einer Kartusche im Toilettensystem ausgefahren und eine biochemische Urinanalyse anhand von zehn Biomarkern – Erythrozyten, Urobilinogen, Bilirubin, Protein, Nitrit, Ketone, Glukose, pH-Wert, spezifisches Gewicht (Urindichte) und Leukozyten – durchgeführt. Für die Auswertung des Teststreifens produziert eine Kamera Videorohdaten, die in Echtzeit analysiert und in eine Cloud transferiert werden (Park et al. 2020, S.625). Mittels Computer-Vision-Uroflowmetrie werden die Fließgeschwindigkeit und das Urinvolumen gemessen (diese Indikatoren können z.B. auch auf Blasenentleerungsstörungen hinweisen). Zudem messen Drucksensoren die Dauer des Stuhlgangs und eine Kamera fotografiert den Kot. Bilder des Kots werden unter Einsatz eines neuronalen Netzwerkes in die sogenannte Bristol-Stuhlformen-Skala eingeordnet. Um die Nutzenden der Toilette eindeutig identifizieren zu können, nimmt eine Kamera einen sogenannten Analprint auf (Röcker 2020). Dieses modulare Toilettensystem kann auf Basis der mittels Sensoren, Machine-Learning-Algorithmen und Computer-Vision-Testsystemen erfassten Parameter bei der medizinischen Diagnose und Überwachung z.B. eines Reizdarmsyndroms, der benignen Prostatahyperplasie und/oder von Harnwegsinfektionen unterstützen (Park et al. 2020, S.630f.).

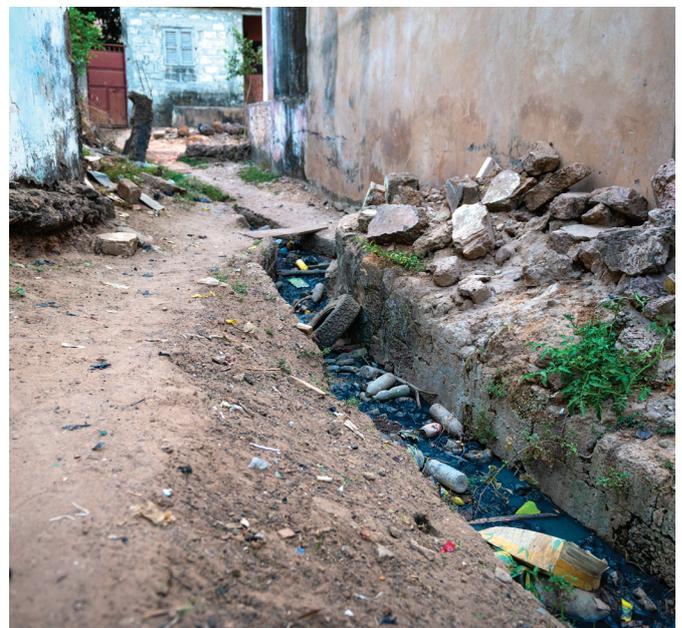
Ein ungelöstes Problem dieser Technologie ist die Möglichkeit falsch-positiver Ergebnisse bei den eingesetzten

biochemischen Testverfahren, was auf Verunreinigungen in der Toilettenumgebung zurückgeführt werden kann. Um das Risiko hierfür zu minimieren, müssen Selbstreinigungsverfahren entwickelt und nach jedem Toilettengang angewendet werden (Park et al. 2020, S.632). Zudem wurden die Urinanalyse- und Uroflowmetriemodule bisher nur für im Stehen wasserlassende Männer getestet, da sich der männliche und weibliche Harnstrahl unterscheiden. In der weiteren Forschung sollen auch Frauen einbezogen werden, indem beispielsweise ein ausziehbarer Stab für die Positionierung des Urinstreifens genutzt oder Sono-uroflowmetrie eingesetzt wird, also Häufigkeit und Volumen des Wasserlassens per Schall geschätzt werden (Park et al. 2020, S.633).

Momentan ist diese Technologie nur für den Einsatz bei Sitztoiletten geeignet, nicht aber für Hocktoiletten (Park et al. 2020, S.632).

Gesellschaftliche und politische Relevanz

4,5 Mrd. Menschen hatten 2015 keinen Zugang zu sicheren² sanitären Einrichtungen. Hiervon konnten 2,1 Mrd. eine Grundversorgung in Anspruch nehmen, 600 Mio. hatten Zugang zu einer eingeschränkten und 856 Mio. lediglich zu einer unzureichenden sanitären Einrichtung. 892 Mio. von ihnen hatten keine andere Möglichkeit als offene Defäkation zu betreiben, beispielsweise in Straßenrinnen, hinter Büschen oder in offenen Gewässern. Betrof-



-
- 2 Die WHO und UNICEF definieren Toiletten- und Abwassersysteme in Haushalten als sicher, die Exkremate in die Kanalisation spülen und in Kläranlagen behandeln, sowie Toiletten und Latrinen, die an Klärgruben angeschlossen sind. Voraussetzung ist allerdings, dass die Klärgruben entleert und die Exkremate an anderer Stelle behandelt bzw. vor Ort behandelt und entsorgt werden (WHO/ UNICEF 2017, S. 29).

fen von unzureichender Sanitärversorgung sind vor allem Menschen in Subsahara-Afrika und Südasien (Bill & Melinda Gates Foundation o.J.). Die Folgen sind dramatisch: Ihr Fehlen begünstigt die Verbreitung von Krankheiten wie Cholera, Durchfall, Ruhr, Hepatitis A, Typhus und Polio und führt jährlich schätzungsweise zu rund 432.000 Todesfällen. Zudem wird Tropenkrankheiten, wie Darmwürmern, Bilharziose und Trachom, Vorschub geleistet (WHO 2019).



80% der erzeugten Abwässer weltweit fließen unbehandelt in das Ökosystem zurück (UN o.J.). Eine Anbaufläche von schätzungsweise 36 Mio. ha (Fläche Deutschlands 35,7 Mio. ha) in stadtnahen Gebieten wird mit ungeklärtem Abwasser bewässert. 10% der Weltbevölkerung verzehrt deshalb mit Abwässern kultivierte Nahrungsmittel (WHO 2019). Die darin vorhandenen unbehandelten menschlichen Exkremente sind vor allem aufgrund von Krankheitserregern und Keimen, Arzneimittelrückständen und Hormonen schädlich (Berkenheide 2020).

Würde die gesamte Weltbevölkerung mit modernen Abwassersystemen versorgt, wären die Bau-, Erhaltungs- und Reparaturinvestitionen enorm. Derzeit werden die Kosten für die Nährstoffelimination in Kläranlagen zur Vermeidung von Eutrophierung (hoher Nährstoffeintrag in Gewässer und dadurch schädliches Pflanzenwachstum) und hypoxischen Totzonen (sauerstoffarme Zonen in Ozeanen und Seen in Folge von Eutrophierung) in Industrieländern auf etwa 20 bis 40 US-Dollar pro Person und Jahr geschätzt. Würden herkömmliche Technologien zur Nährstoffelimination für die gesamte Weltbevölkerung verwendet, stiegen die Kosten schätzungsweise auf insgesamt 1 Billion US-Dollar pro Jahr, also etwa 133 US-Dollar pro Kopf und Jahr (Larsen 2020, S.2).

Mit herkömmlichen Toiletten- und Abwassersystemen lässt sich eine bessere Sanitärversorgung der Weltbevölke-

rung auch aufgrund zunehmender Wasserknappheit nicht erreichen. Die Vereinten Nationen (UN o.J.) prognostizieren, dass im Jahr 2050 rund 5, Mrd. Menschen in Regionen leben könnten, in denen sie mindestens 1 Monat pro Jahr schon ihren elementaren Wasserbedarf nicht decken können.

Der Klimawandel trägt zudem dazu bei, dass Dürren und Überschwemmungen zunehmen und der Meeresspiegel ansteigt. Dadurch können Bestandteile von Abwassersystemen, wie Toiletten, Klärgruben und -anlagen, zerstört werden und menschliche Fäkalien ins Trinkwasser oder auf Felder gelangen (UN o.J.). Dies könnte für den Einsatz eigenständiger Toiletten mit geschlossenen Kreisläufen sprechen und stellt auch eine Option für Industrieländer dar. Dort sind öffentliche Kanalisationssysteme häufig mehr als 100 Jahre alt und marode, was ebenfalls das Risiko erhöht, dass Fäkalien ungeklärt in die Umwelt gelangen. Die Reparaturkosten für Wasser- und Abwasserinfrastrukturen können jedoch immens sein. In Anbetracht der hohen Infrastrukturkosten für die konventionelle Sanitärversorgung könnte eine weite Verbreitung eigenständiger Toiletten mit geschlossenem Kreislauf zu einer deutlichen Reduzierung der Kosten für die Abwasserbehandlung sorgen (Van Voorhis et al 2018, S.1, 3 f.).

Das Innovationsgeschehen zu Toilettentechnologien wird derzeit stark durch supranationale und nationale politische Initiativen sowie den 2011 von der Bill & Melinda Gates Foundation ausgelobten Wettbewerb „Reinvent the Toilet Challenge“ getrieben. So lautet Ziel 6 der 17 globalen Ziele für nachhaltige Entwicklung der Agenda 2030 der Vereinten Nationen: „Wasser und Sanitärversorgung für alle – Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten“ (BMU o.J.). Am Welttoilettentag, dem 19. November, wird an die Bedeutung von Toiletten für die Sanitärversorgung erinnert (UN o.J.). Da mit China und Indien die beiden Länder mit mehr als 1 Mrd. Einwohner/innen Kampagnen – „Swachh Bharat“ (Sauberes Indien) sowie in China die „Toilettenrevolution“ – lanciert haben, ist ein enormer zukünftiger Markt für die Adaption neuartiger Toiletteninnovationen entstanden, die sich durch vergleichsweise niedrige Kosten, Modularität und der Möglichkeit einer Installation in netzfernen, ländlichen und/oder von Wasserknappheit betroffenen Gebieten auszeichnen und auch eine Lösung für Industrieländer darstellen könnten (Bill & Melinda Gates Foundation o.J.; Van Voorhis et al. 2018, S.3 f.).

In den Industrieländern könnte zudem der Trend zum selbstständigen Gesundheitsmonitoring durch Wearables wie Smart Watches und Fitnessstrackern sowie die zunehmende Vernetzung von Daten für die Gesundheitsversorgung die Verbreitung von intelligenten Toiletten als ein Hilfsmittel zur Diagnose und Prävention von Krankheiten unterstützen, sofern diese technologisch ausgereifter und preisgünstiger würden.

Mögliche vertiefte Bearbeitung des Themas

Aufgrund der immensen Bedeutung nachhaltiger Toilettensysteme für die menschliche Gesundheit, die Umwelt und das Klima sowie der u.a. durch politische Initiativen beschleunigten Innovationsdynamik erscheint eine Bearbeitung in Form einer Kurzstudie oder Innovationsanalyse sinnvoll. In dieser könnten die Vor- und Nachteile einer größeren Auswahl von Innovationen, als im Themenkurzprofil vorgestellt wurden, für alle Schritte der Sanitärversorgung exemplarisch analysiert und im Hinblick auf ihre Adaptierbarkeit unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen in Entwicklungs-, Schwellen- und Industrieländern beleuchtet werden. Ein besonderes Augenmerk könnte auf nachhaltigere Toilettensysteme für die EU sowie die zu ihrem Betrieb notwendigen Dienstleistungen und ggf. sozialen Innovationen gelegt werden. In diesem Zusammenhang sollten auch mögliche Barrieren, wie kulturelle Prägungen und technologische Pfadabhängigkeiten, identifiziert werden, die eine weitreichende Diffusion von Toiletteninnovationen verhindern könnten.

Literaturverzeichnis

- ▶ Antoniou, G.; De Feo, G.; Fardin, F.; Tamburrino, A.; Khan, S.; Tie, F.; Reklaityte, I.; Kanetaki, E.; Zheng, X.; Mays, L.; Angelakis, A. (2016): Evolution of Toilets Worldwide through the Millennia. In: Sustainability 8(779), S.1–55
- ▶ Baggaley, K. (2019): Here's how smart toilets of the future could protect your health. NBC, 23.1.2019, www.nbcnews.com/mach/science/here-s-how-smart-toilets-future-could-protect-your-health-ncna961656 (25.5.2021)
- ▶ Berkenheide, M. (2020): Ökoprojekt Komposttoiletten: Die Scheiße soll aufs Feld. Taz, 26.12.2020, <https://taz.de/Oekoprojekt-Komposttoiletten!/5722827/> (25.5.2021)
- ▶ Bill & Melinda Gates Foundation (o.J.): Water, Sanitation & Hygiene. www.gatesfoundation.org/our-work/programs/global-growth-and-opportunity/water-sanitation-and-hygiene (25.5.2021)
- ▶ BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (o.J.): SDG 6: Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen. www.bmu.de/themen/europa-internationales-nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltige-entwicklung/nachhaltigkeitsziele-sdgs/sdg-6-sauberes-wasser-und-sanitaereinrichtungen/ (25.5.2021)
- ▶ BR Wissen (2020): Klo- und Toiletten-Kulturgeschichte: Die Karriere des stillen Örtchens. 20.11.2020, www.br.de/wissen/toilette-klo-kulturgeschichte-100.html (25.5.2020)
- ▶ Canales, M. (2019): These new toilets could solve a global problem. National Geographic Magazin 7, www.nationalgeographic.com/magazine/article/new-toilets-could-solve-global-sanitation-problem (11.4.2021)
- ▶ Dig Deep; US Water Alliance (2019): Closing the Water Access Gap in the United States. A National Action Plan. http://uswateralliance.org/sites/uswateralliance.org/files/Closing%20the%20Water%20Access%20Gap%20in%20the%20United%20States_DIGITAL.pdf (25.5.2021)
- ▶ Eawag (Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz) (2007): Novaquatis. Ein Querprojekt der Eawag zur Urinseparierung. Nova 3 – Lagerung und Transport. 6.3.2007, www.novaquatis.eawag.ch/arbeitspakete/nova3/index.html (25.5.2021)
- ▶ Eawag (2015): Aus Urin wird Flüssigdünger. 18.3.2015, www.eawag.ch/de/news-agenda/news-plattform/news/aus-urin-wird-fluessigduenger/ (25.5.2021)
- ▶ Eawag (2019): Tove Larsen erklärt die Toilettenrevolution. 11.3.2019, www.eawag.ch/de/news-agenda/news-plattform/news/tove-larsen-erklaert-die-toilettenrevolution/ (25.5.2021)
- ▶ Hennigs, J.; Ravndal, K.; Blose, T.; Toolaram, A.; Sindall, R.; Barrington, D.; Collins, M.; Engineer, B.; Kolios, A.; McAdam, E.; Parker, A.; Williams, L.; Tyrrel, S. (2019): Field testing of a prototype mechanical dry toilet flush. In: The Science of the total environment 668, S.419–431
- ▶ Krzywaneck, O. (2004): Die Entstehung der Berliner Kanalisation. Ein Kraftakt. In: fundiert: Wasser 2, www.fu-berlin.de/presse/publikationen/fundiert/archiv/2004_02/04_02_krzywaneck/index.html (25.5.2021)
- ▶ Larsen, T. (2020): Urine Source Separation for Global Nutrient Management. In: O'Bannon, D. (Hg.): Women in water quality. Investigations by prominent female engineers. Cham, S.99–111
- ▶ Larsen, T.; Alder, A.; Eggen, R.; Maurer, M.; Lienert, J. (2009): Source separation: will we see a paradigm shift in wastewater handling? In: Environmental science & technology 43(16), S.6121–6125
- ▶ Özel Duygan, B.; Udert, K.; Remmele, A.; McArdell, C. (2021): Removal of pharmaceuticals from human urine during storage, aerobic biological treatment, and activated carbon adsorption to produce a safe fertilizer. In: Resources, Conservation and Recycling 166(105341), S.1–10
- ▶ Park, S.-M.; Won, D.; Lee, B.; Escobedo, D.; Esteva, A.; Aalipour, A.; Ge, T.; Kim, J.; Suh, S.; Choi, E.; Lozano, A. et al. (2020): A mountable toilet system for personalized health monitoring via the analysis of excreta. In: Nature biomedical engineering 4(6), S.624–635
- ▶ Röcker, A. (2020): Smart Home: Was die Toilette über unsere Gesundheit verraten kann. Spektrum.de, 6.4.2020, www.spektrum.de/news/was-die-toilette-ueber-unsere-gesundheit-verraten-kann/1719838 (25.5.2021)
- ▶ Stadt Wien (2019): Wien Geschichte Wiki. Kanalisation von 1683 bis 1830, 4.12.2019, www.geschichtewiki.wien.gv.at/Kanalisation_von_1683_bis_1830 (25.5.2021)
- ▶ Statista (2020): Anschlussgrad an die öffentliche Abwasserentsorgung nach ausgewählten europäischen Ländern im Jahr 2018. 10.12.2020, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/165429/umfrage/anschlussgrad-an-die-oeffentliche-abwasserentsorgung-in-europa-2007/> (25.5.2021)

- ▶ Statista (2021): Struktur des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträger im Jahr 2020. 6.4.2021, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/251525/umfrage/struktur-des-primaeernergieverbrauchs-in-deutschland-nach-energietraeger/> (25.5.2021)
- ▶ The British Association of Urological Surgeons (o.J.): A Brief History of The Flush Toilet. www.baus.org.uk/museum/164/a_brief_history_of_the_flush_toilet (25.5.2021)
- ▶ Thomas, P. (2020): Abwasserbehandlung. Alles geklärt. FAZ, 3.3.2020, www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/abwasserbehandlung-in-deutschland-alles-gekluert-16648009-p3.html (25.5.2021)
- ▶ Tilley, E.; Ulrich, L.; Lüthi, C.; Reymond, P.; Schertenleib, R.; Zurbrugg, C. (2014): Compendium of sanitation systems and technologies. Dübendorf
- ▶ Tucker, E. (2019): The Toilet That Dreams of Saving the World. Metropolis, 27.8.2019, www.metropolismag.com/design/industrial-design/laufen-save-toilet/ (25.5.2021)
- ▶ Umann, U. (2020): US-Markt für Abwassertechnik im Modernisierungsmodus. Germany Trade & Invest, 25.3.2020, www.gtai.de/gtai-de/trade/specials/special/usa/us-markt-fuer-abwassertechnik-im-modernisierungsmodus-224070 (25.5.2021)
- ▶ UN (United Nations) (o.J.): World Toilet Day 19 November. Sustainable sanitation and climate change. www.un.org/en/observances/toilet-day (25.5.2021)
- ▶ Van Voorhis, V.; Larson, J.; Serazin, E.; Holmes, C.; Woods, W. (2018): Tech Disruption comes to global sanitation. Boston Consulting Group, https://image-src.bcg.com/Images/BCG-Tech-Disruption-Comes-to-Global-Sanitation-Nov-2018-NL_tcm9-207617.pdf (25.5.2021)
- ▶ Vuna GmbH (o.J.): Aurin Recycling Dünger. <https://vuna.ch/aurin/> (25.5.2021)
- ▶ Wedlich, S. (2020): Der Gestank des Todes. Cholera-Ausbruch in London. Der Spiegel, 2.4.2020, <https://www.spiegel.de/geschichte/cholera-epidemie-in-london-1858-the-great-stink-a-a92b0581-ad69-4538-8a29-39ce8c6bee7e> (25.5.2021)
- ▶ WHO (World Health Organization) (2019): Sanitation. 14.6.2019, www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/sanitation (25.5.2021)
- ▶ WHO; UNICEF (United Nations Children's Fund) (2017): Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2017. Update and SDG Baselines. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/258617/9789241512893-eng.pdf;jsessionid=5C911F06E7C852340709B4222141683B?sequence=1> (25.5.2021)

Das Horizon-Scanning ist Teil des methodischen Spektrums der Technikfolgenabschätzung im TAB.

Horizon
SCANNING

Mittels Horizon-Scanning werden neue technologische Entwicklungen beobachtet und diese systematisch auf ihre Chancen und Risiken bewertet. So werden technologische, ökonomische, ökologische, soziale und politische Veränderungspotenziale möglichst früh erfasst und beschrieben. Ziel des Horizon-Scannings ist es, einen Beitrag zur forschungs- und innovationspolitischen Orientierung und Meinungsbildung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zu leisten.

In der praktischen Umsetzung werden im Horizon-Scanning softwaregestützte Such- und Analyseschritte mit expertenbasierten Validierungs- und Bewertungsprozessen kombiniert.

Herausgeber: Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)

Gestaltung und Redaktion: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Bildnachweise: majivecka/iStock (S. 1); olalaja/iStock (S. 2); tuachanwatthana/iStock (S. 2); AlexLMX/iStock (S. 3); metamorworks/iStock (S. 4); Tiago Fernandez/iStock (S. 5); piyaset/iStock (S. 6)

ISSN-Internet: 2629-2874