



Urinseparierung

Abwasser enthält Ressourcen. Doch traditionell stehen in der Abwasserbehandlung der Gewässerschutz und die Hygiene im Vordergrund, nicht das Recycling. Weil das ganze System auf diese Ziele ausgerichtet ist, wird die Rückgewinnung von Ressourcen umständlich. Eine Alternative ist es, Stoffströme schon an der Quelle zu trennen. Werden Urin, Fäkalien und Grauwasser separat gesammelt, können sie danach gezielt behandelt werden [13].

Die meisten Nährstoffe werden mit dem Urin ausgeschieden: 85 bis 90% des Stickstoffs, 50 bis 80% vom Phosphor und 80 bis 90% des Kaliums [14]. Diese drei Nährstoffe sind auch die Hauptbestandteile von Düngern. Zudem enthält Urin viele andere Nährstoffe, die für das Pflanzenwachstum wichtig sind, etwa Schwefel. Urin macht jedoch nur weniger als 1% der gesamten Abwassermenge aus. Es liegt daher nahe, Nährstoffe aus dem Urin in die Landwirtschaft zurückzuführen.

Entweder wird der Urin direkt vor Ort behandelt oder es braucht für den Transport Alternativen zu den herkömmlichen Spültoiletten und der Kanalisation. Denn sonst wird er unnötig mit Spülwasser verdünnt. Urin an der Quelle abzutrennen, drängt sich vor allem in Städten und Regionen auf, in denen es keine Kanalisation gibt oder wo wenig Wasser verfügbar ist. Das trifft für die meisten schnell wachsenden Städte in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen zu.

Anwendungen für die Urinseparierung

Urin separat zu behandeln bietet viele Vorteile, zum Beispiel:

- Urin ist eine nachhaltige Quelle für Nährstoffe. Ein Urin-

Stickstoff	85% – 90% aus Urin	Kot
Kalium	80% – 90% aus Urin	Kot
Phosphor	50% – 80% aus Urin	Kot
Volumen	> 99% – anderes Abwasser	

Nährstoffanteile in den menschlichen Ausscheidungen und Anteil des Urins am gesamten Abwasser.

dünger hilft, den Nährstoffkreislauf zwischen Siedlung und Landwirtschaft zu schliessen [7].

- In vielen Regionen nutzen Trockentoiletten die Urinabscheidung, weil so die Fäkalien leichter getrocknet werden können [8]. Diese enthalten viel organische Substanz, die zur Energiegewinnung genutzt werden kann.
- Auf Kläranlagen ist die Stickstoffentfernung ein energie- und platzintensiver Prozess. Die Urinseparierung könnte zentrale Kläranlagen entlasten, weil dort weniger Stickstoff entfernt werden muss [27].

- Führt der Klimawandel häufiger zu tiefen Wasserständen, wird es umso wichtiger, die Stickstoffkonzentrationen in Flüssen tief zu halten. Bei separat behandeltem Urin wird das einfacher und ist z.B. unterhalb von Paris für die Seine vorgeschlagen [26].
- Mit Nitrat, an Ort aus Urin hergestellt, lässt sich in Kanalisationen die Korrosion durch Sulfatreduktion verhindern [19].
- Die Urinbehandlung mit Nährstoffrückgewinnung wird auch untersucht für Langstreckenmissionen im All [4].

Herausforderungen

- **Kontamination:** Unmittelbar nach der Ausscheidung enthält der Urin kaum Mikroben. Doch mikrobielle Verunreinigungen, auch Krankheitskeime, aus der Umwelt und aus den Fäkalien setzen sich im Urin ab, wenn er in urinseparierenden Toiletten oder Urinalen gesammelt wird. Diese Kontamination und die folgenden mikrobiellen Prozesse machen den quellenseparierten Urin zu einer ganz anderen Lösung als wenn er frisch in sterilen Flaschen gesammelt wird [25]. Vor einer Verwendung müssen pathogene Keime entfernt werden [10].
- **Stickstoffverlust:** Der grösste Teil des Stickstoffs im Urin ist als Harnstoff vorhanden. Dieser wird mit dem Enzym Urease bakteriell zu Ammoniak und Bikarbonat abgebaut, was zu einem hohen pH-Wert von 9 führt [24]. In unzureichenden Hausinstallationen geht ein Teil davon als flüchtiges Ammoniak verloren [22]. Das senkt den Wert des Urindüngers und belastet die Umwelt. Unstabilisierter Urin sollte daher möglichst wenig mit Luft in Kontakt kommen.
- **Verstopfungen:** Der durch den Harnstoffabbau verursachte Anstieg des pH-Werts führt zu Ausfällungen. In Toiletten, Siphons und Leitungen lagern sich Kalziumphosphat und Struvit ab [24]. Ausserdem kann sich Kalzit bilden, wenn der Urin mit hohen Mengen an hartem Wasser gespült wird. Diese Mineralien, organische Verbindungen und Biofilme können Verstopfungen verursachen. Sie können mechanisch oder durch regelmässiges Spülen mit einer Säure (z.B. 10% Zitro-

nensäure) beseitigt werden [16].

- **Gerüche:** Neben dem Harnstoff bauen fermentierende Bakterien auch andere organische Substanzen ab [23]. Der stechende Geruch von abgestandenem Urin ist das Ergebnis dieser Fermentierungsprozesse.
- **Medikamente:** Gut zwei Drittel der ausgeschiedenen Wirkstoffe von Arzneimitteln befinden sich im Urin [17]. Das ist besonders wichtig an Orten, wo viele Medikamente konsumiert werden, z.B. in Südafrika aufgrund der HIV-Epidemien [2]. Die Urinseparierung erlaubt eine gezielte Entfernung dieser Verunreinigungen, damit diese nicht in die Umwelt gelangen.

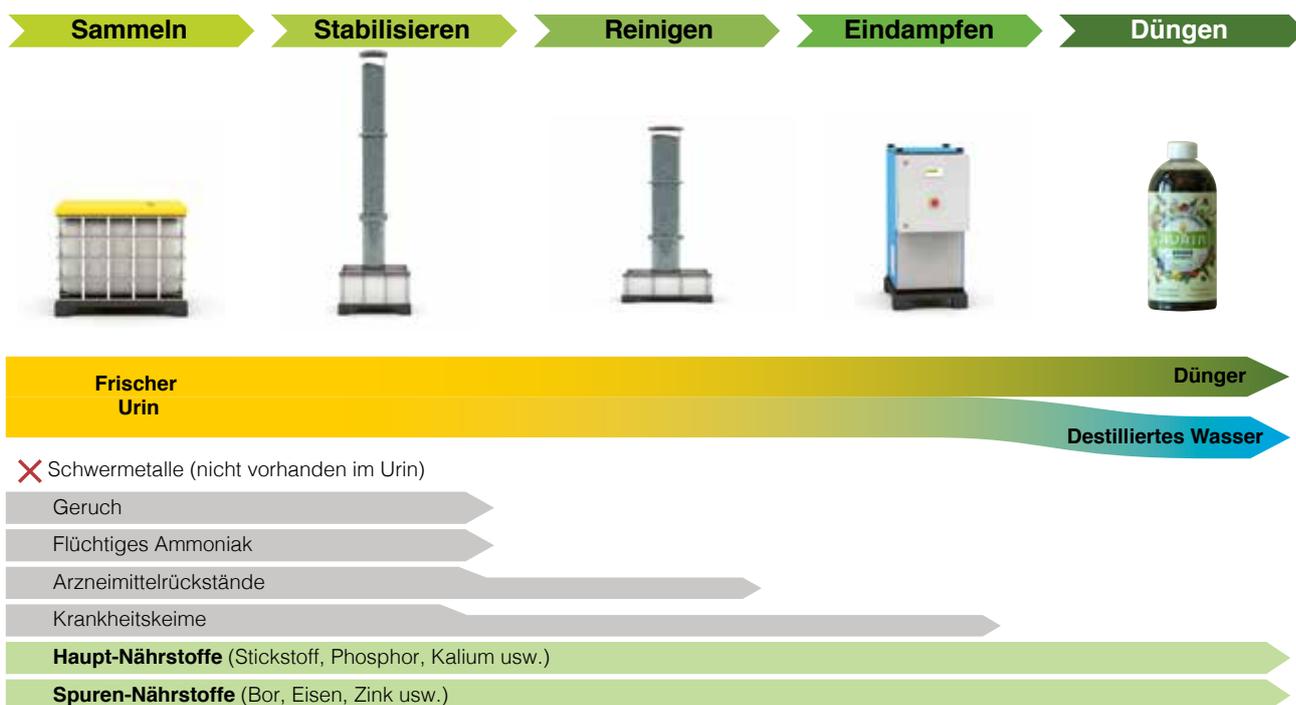
Chancen

Die meisten Verfahren zielen darauf ab, Urin in einen Dünger umzuwandeln. Dabei muss gewährleistet werden, dass die Umwelt nicht belastet wird und keine Gesundheitsgefährdung geschaffen wird.

Direkte Nutzung: Bei einer Nutzung von Urin ohne Stabilisierung wird vor dem Ausbringen eine sechsmonatige Lagerung zur Inaktivierung von Krankheitserregern empfohlen [10]. Es werden auch Ausbringetechniken beschrieben, die Ammoniakverluste und Geruchsbelästigung vermeiden sollen [12]. Dieser Ansatz ist aber nur in der Nähe von landwirtschaftlichen Flächen realistisch, da er grosse Lager- und Transportkapazitäten erfordert. Trotzdem können Geruchsprobleme auftreten und Medikamentenrückstände in die Umwelt gelangen.

Rückgewinnung eines bestimmten Nährstoffs: Dabei ist meistens ein zusätzlicher Behandlungsschritt nötig zur Desinfektion, Entfernung von organischen Stoffen oder Mikroverunreinigungen, wenn das Abwasser nicht in eine Kläranlage eingeleitet wird.

- **Phosphor:** Der am intensivsten untersuchte Prozess ist die Phosphorfällung als Struvit [6]. Ein anderes Verfahren ist die Zugabe von Kalziumhydroxid zum frischen Urin [21]. Dabei



Der Vuna-Prozess. Im Unterschied zu Kunstdüngern ist der Urindünger Aurin frei von Schwermetallen.

bildet sich Kalziumphosphat mit hohem Düngewert [18]. Da Kalziumhydroxid nur in frischen Urin dosiert werden sollte, um die Bildung von Kalzit zu verhindern, beschränkt es sich auf Anwendungen, bei denen Urin in der Nähe der Toilette behandelt werden kann. Diesen Prozess nutzen Eawag-Forschende in der Toilette «Autarky» (www.autarky.ch).

- **Stickstoff:** Stickstoff kann über Stripping aus dem gelagerten Urin gewonnen werden. Der Prozess kann auch mit einer vorgelagerten Struvitfällung kombiniert werden. [1]

Rückgewinnung aller Nährstoffe:

- **Kombination von Elektrodialyse, Mikrofiltration und Ozonierung:** Dieser Prozess ermöglicht eine Separation und Aufkonzentrierung der meisten Nährstoffe bei gleichzeitiger Entfernung von Medikamenten und Mikroorganismen [20].
- **Behandlungskette mit Nitrifikation und Destillation:** Dieses Verfahren wurde an der Eawag entwickelt [7] und wird von der Spin-off-Firma Vuna kommerzialisiert. Das Produkt des Vuna-Prozesses ist Aurin, ein in der Schweiz zugelassener Dünger. Die Aurinproduktion besteht aus drei Hauptschritten. Im ersten verhindert die biologische Behandlung die Verflüchtigung von Ammoniak und den Geruch. Das Produkt ist eine Lösung, die Ammoniumnitrat und wenig organische Verbindungen enthält. Im zweiten Schritt werden pharmazeutische Verbindungen durch Aktivkohleabsorption entfernt, im dritten wird die Lösung konzentriert und durch Destillation pasteurisiert. Das Endprodukt ist eine 10- bis 20-fach konzentrierte Flüssigkeit mit hohem Düngewert [3]. Im «Water Hub» des NEST-Gebäudes (www.eawag.ch/waterhub) arbeiten Eawag-Forschende an der Verbesserung der Urinbehandlung und es wird Aurin-Dünger produziert. Eine Herausforderung ist vor allem die biologische Behandlung des Urins aufgrund seiner hohen Ammoniakkonzentration und seines hohen pH-Wertes. Sie erfordert eine ausgefeilte pH-Kontrolle. Alternativ könnte die Ammoniakverflüchtigung auch durch die Zugabe von Säure verhindert werden. Allerdings sind grosse Säuremengen erforderlich [5].

...was man mit dem Urin auch noch tun kann

- **Backsteine:** Urin wurde als Rohstoff für die Herstellung von Backsteinen vorgeschlagen. Stabilisierter Urin wird mit Sand gemischt. Bakterien, die Urease produzieren, bilden dann aus Harnstoff Kalziumkarbonat, das den Sand zu Biosteinen bindet [9].
- **Energiegewinnung:** Aus Urin lässt sich Energie gewinnen, z.B. über bio-elektrochemische Prozesse [15]. Weil die Menge an chemischer Energie, die im Urin steckt, aber relativ gering ist, bleiben die Anwendungen auf kleine Verbraucher, wie Beleuchtung, beschränkt [11].

Getrennt sammeln: Ja, aber wie?

Eine separate Behandlung von Urin setzt voraus, dass Urin möglichst ohne Verunreinigung durch Fäkalien und möglichst nicht oder nur wenig verdünnt mit (Spül-)Wasser getrennt abgeleitet und gesammelt wird. Dafür stehen zur Zeit folgende Schnittstellen (User Interfaces) zur Verfügung:

- **Wasserlose Urinale:** Wasserlose Urinale mit verschiedenen Systemen einer Geruchssperre sind heute bereits marktüblich und werden immer häufiger eingesetzt, vor allem an Festivals, in Sportanlagen oder Restaurants. Urinale für Frauen konnten sich bisher allerdings nicht durchsetzen, werden aber laufend weiterentwickelt.

- **Urin trennende Trockentoiletten:** (UDDT: Urine Diverting Dry Toilet) sind der gängigste Typ von Trenntoiletten und werden häufig als dezentrale Lösung z.B. auf Berghütten, vermehrt aber auch im städtischen Raum eingesetzt. Die Trennung findet auf einem geeigneten Förderband unterhalb des Toilettensitzes (Ecodomeo oder Sanisphère) oder durch eine Trennwand in der Toilettenschüssel statt. Die Separierung der Stoffströme dient hier nicht nur dem Abtrennen des Urins, sondern auch der Geruchsreduktion und der einfacheren Kompostierung der weniger nasen Fäkalien. Urintrennende Trockentoiletten benötigen keine Einstreu wie z.B. Holzspäne.
- **Urin trennende Spültoiletten:** Die bisher gängigsten gespülten Trenntoiletten (auch unter dem Namen NoMix-Toiletten bekannt) trennen den Urin mithilfe einer Trennwand in der Schüssel. Je nach Modell ist die Trennwand weiter vorne oder weiter hinten in der Schüssel angeordnet. Das System funktioniert grundsätzlich, ist aber nicht für alle Personen (z.B. für Kinder) passend und verursacht einen erheblichen Reinigungs- und Unterhaltsaufwand. Die unerwünschte Verdünnung des Urins mit Spülwasser konnte teilweise durch Ventile verringert werden. Diese Toiletten werden aber nicht mehr produziert. Die 2019 neu entwickelte Schüssel "save!" (Designstudio EOOS und Laufen Bathrooms) trennt den Urin ohne Ventil, indem die Oberflächenspannung (Teekanneneffekt) genutzt wird. Es ist kaum sichtbar, dass es sich um eine Urintrenn-Toilette handelt.

Quellen:

- 1 Antonini, S., Paris, S., Eichert, T. and Clemens, J. (2011) Nitrogen and Phosphorus Recovery from Human Urine by Struvite Precipitation and Air Stripping in Vietnam. *CLEAN – Soil, Air, Water* 39(12), 1099-1104
- 2 Bischel, H.N., Özel Duygan, B.D., Strande, L., McArdeell, C.S., Udert, K.M. and Kohn, T. (2015) Pathogens and pharmaceuticals in source-separated urine in eThekweni, South Africa. *Water Research* 85, 57-65.
- 3 Bonvin, C., Etter, B., Udert, K.M., Frossard, E., Nanzer, S., Tamburini, F. and Oberson, A. (2015) Plant uptake of phosphorus and nitrogen recycled from synthetic source-separated urine. *Ambio* 44(Suppl. 2), S217-S227.
- 4 Clauwaert, P., Muys, M., Alloul, A., De Paepe, J., Luther, A., Sun, X., Ilgrande, C., Christiaens, M.E.R., Hu, X., Zhang, D., Lindeboom, R.E.F., Sas, B., Rabaey, K., Boon, N., Ronsse, F., Geelen, D. and Vlaeminck, S.E. (2017) Nitrogen cycling in Bioregenerative Life Support Systems: Challenges for waste refinery and food production processes. *Progress in Aerospace Sciences* 91, 87-98.
- 5 Ek, M., Bergström, R., Bjurhem, J.E., Björlenius, B. and Hellström, D. (2006) Concentration of nutrients from urine and reject water from anaerobically digested sludge. *Water Science and Technology* 54(11-12), 437-444.
- 6 Etter, B., Tilley, E., Khadka, R. and Udert, K.M. (2011) Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. *Water Research* 45(2), 852-862.
- 7 Fumasoli, A., Etter, B., Sterkele, B., Morgenroth, E. and Udert, K.M. (2016) Operating a pilot-scale nitrification/distillation plant for complete nutrient recovery from urine. *Water Science and Technology* 73(1), 215-222.
- 8 Gounden, T., Pfaff, B., MacLeod, N. and Buckley, C. (2006) Provision of free sustainable basic sanitation: the Durban experience. 32nd WEDC Conference, Sustainable Development of Water Resources, Water Supply and Environmental Sanitation, November 2006, Colombo, Sri Lanka.
- 9 Henze, J. and Randall, D.G. (2018) Microbial induced calcium carbonate precipitation at elevated pH values (>11) using *Sporosarcina pasteurii*. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 6(4), 5008-5013.
- 10 Höglund, C., Stenström, T.A. and Ashbolt, N. (2002) Microbial risk assessment of source-separated urine used in agriculture. *Waste Management and Research* 20(2), 150-161.
- 11 Ieropoulos, I.A., Stinchcombe, A., Gajda, I., Forbes, S., Merino-Jimenez, I., Pasternak, G., Sanchez-Herranz, D. and Greenman, J. (2016) Pee power: urinal-microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation. *Environmental Science: Water Research & Technology* 2(2), 336-343.
- 12 Johansson, M. (2001) Urine separation – closing the nutrient cycle. Stockholm Water Company, Stockholm, Sweden.
- 13 Larsen, T.A., Udert, K.M. and Lienert, J. (2013) Source separation and decentralization for wastewater management, IWA Publishing, London, UK.
- 14 Larsen, T.A. and Gujer, W. (1996) Separate management of anthropogenic nutrient solutions (human urine). *Water Science and Technology* 34(3-4), 87-94.
- 15 Ledezma, P., Kuntke, P., Buisman, C.J.N., Keller, J. and Freguia, S. (2015) Source-separated urine opens golden opportunities for microbial electrochemical technologies. *Trends in Biotechnology* 33(4), 214-220.
- 16 Lienert, J. and Larsen, T.A. (2007) Pilot projects in bathrooms: a new challenge for wastewater professionals. *Water Practice & Technology* 2(3).
- 17 Lienert, J., Bürki, T. and Escher, B.I. (2007) Reducing micropollutants with source control: Substance flow analysis of 212 pharmaceuticals in faeces and urine. *Water Science and Technology* 56(5), 87-96.
- 18 Meyer, G., Frossard, E., Mäder, P., Nanzer, S., Randall, D.G., Udert, K.M. and Oberson, A. (2018) Water soluble phosphate fertilizers for crops grown in calcareous soils – an outdated paradigm for recycled phosphorus fertilizers? *Plant and Soil* 424(1-2), 367-388.
- 19 Oosterhuis, M. and van Loosdrecht, M.C.M. (2009) Nitrification of urine for H₂S control in pressure sewers. *Water Practice and Technology* 4(3).
- 20 Pronk, W., Zuleeg, S., Lienert, J., Escher, B., Koller, M., Berner, A., Koch, G. and Boller, M. (2007) Pilot experiments with electro dialysis and ozonation for the production of a fertiliser from urine. *Water Science and Technology* 56(5), 219-227.
- 21 Randall, D.G., Krähenbühl, M., Köpping, I., Larsen, T.A. and Udert, K.M. (2016) A novel approach for stabilizing fresh urine by calcium hydroxide addition. *Water Research* 95, 361-369.
- 22 Siegrist, H., Laurenzi, M. and Udert, K.M. (2013) Transfer into the gas phase: ammonia stripping. In: *Source Separation and Decentralization for Wastewater Management*. Larsen, T.A., Udert, K.M. and Lienert, J. (eds), pp. 337-350, IWA Publishing, London, UK.
- 23 Troccaz, M., Niclass, Y., Anziani, P. and Starkenmann, C. (2013) The influence of thermal reaction and microbial transformation on the odour of human urine. *Flavour and Fragrance Journal* 28(4), 200-211.
- 24 Udert, K.M., Larsen, T.A., Biebow, M. and Gujer, W. (2003) Urea hydrolysis and precipitation dynamics in a urine-collecting system. *Water Research* 37(11), 2571-2582.
- 25 Udert, K.M., Larsen, T.A. and Gujer, W. (2006) Fate of major compounds in source-separated urine. *Water Science and Technology* 54(11-12), 413-420.
- 26 Unesco and Arceau IdF (2016) *Water, megacities and global change*, Unesco and Arceau IdF, Paris, France.
- 27 Wilsenach, J.A. and Van Loosdrecht, M.C.M. (2004) Effects of Separate Urine Collection on Advanced Nutrient Removal Processes. *Environmental Science and Technology* 38(4), 1208-1215.

Mehr Informationen: www.eawag.ch/nomix

Ansprechperson

Eawag, Prof. Kai Udert, Abteilung Verfahrenstechnik, Überlandstrasse 133, 8600 Dübendorf, Schweiz, +41 58 765 5360, kai.udert@eawag.ch

Mitarbeit an diesem Factsheet: Prof. Kai Udert, Carina Doll, Andri Bryner, Peter Penicka (alle Eawag), Bastian Etter (Vuna GmbH).

Adresse

Eawag, Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf, Schweiz, +41 58 765 5511, info@eawag.ch, eawag.ch