



Meta-Analyse von Life-Cycle-Assessments zu Toilettensystemen mit Stoffstromtrennung an der Quelle

Das Wichtigste im Überblick:



Hintergrund

Klimawandel, Wasserknappheit und Gesundheitseinflüsse sind wesentliche Treiber für eine Transformation hin zur nachhaltigen Ressourcennutzung wobei der Kreislaufgedanke besonders in Bezug auf Nährstoffrecycling ausbaubedürftig ist.



Ansatz

Trenn- & Kreislaufsysteme werden zunehmend in Ökobilanzen (Engl. *Life-Cycle-Assessment*, LCA) berücksichtigt. In einer Meta-Analyse wurden die Ergebnisse ausgewählter Ökobilanzen anhand sechs verschiedener Umweltwirkungskategorien miteinander verglichen.



Ergebnis

Die internationale Literaturrecherche legt nahe, dass Sanitärsysteme basierend auf Stoffstromtrennung an der Quelle, d.h. in der Toilette, positive Ergebnisse aufzeigen. Deutliche ökologische Vorteile zeigen sich in folgenden, relevanten Umweltwirkungskategorien:

- Erderwärmungspotential bis zu -50%
- Eutrophierungspotential -85%
- Ökotoxizität bis zu -90%





Meta-Analyse von Life-Cycle-Assessments zu Toilettensystemen mit Stoffstromtrennung an der Quelle

22. März 2024

Gero Scheck¹, Greta Sundermann¹, Ariane Krause², Christian von Hirschhausen^{1,3}

¹ Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP), Technische Universität Berlin

² Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V., Großbeeren

³ Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) e.V., Berlin

Einleitung

Die Meta-Analyse von Studien zu Life-Cycle-Assessments (LCA) bzw. Ökobilanzen von Toiletten mit „Stoffstromtrennung an der Quelle“¹ untersucht, ob die Nährstoffrückgewinnung aus Toiletten mit Stoffstromtrennung in einer systemisch gesamtheitlichen Betrachtung ökologische Vorteile gegenüber dem aktuell in westlichen Ländern vorherrschenden, wasser- und entsorgungsbasierten Sanitärsystem bietet. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde eine Meta-Analyse durchgeführt, in der die Ergebnisse ausgewählter Ökobilanzen anhand sechs verschiedener Umweltwirkungskategorien miteinander verglichen wurden.

Methodik

Ökobilanzen

Bei allen betrachteten Studien handelt es sich um *Life Cycle Assessments*, zu Deutsch Ökobilanzen. Solche Studien untersuchen komplexe Prozesse auf die dadurch entstehenden Umweltwirkungen. Die Methodologie der Ökobilanzen ist durch die Normen ISO 14040 und ISO 14044 international standardisiert.

Der erste Schritt einer Ökobilanz ist die Zieldefinition, bei der die Systemgrenzen des zu betrachteten Prozesses festgelegt werden. Bei der Wahl der Systemgrenzen müssen mögliche Umweltwirkungen, die vor- und nachgelagerte Prozesse aufweisen können, betrachtet werden.

¹ Ressourcen-orientierte und zirkuläre Sanitärversorgung beruht meist „auf dem technischen Ansatz der „Stoffstromtrennung“ an der Quelle. Durch die getrennte Erfassung (zum Beispiel durch Trockentrenntoiletten) und Behandlung verschiedener Abwasserströme, wie zum Beispiel Urin, Fäzes und Regenwasser, bleiben die Wasser- und Nährstoffkreisläufe technisch getrennt. Einzelne Stoffgruppen werden so weder verdünnt, noch miteinander vermischt oder querkontaminiert, wodurch eine gezieltere und effizientere Behandlung ermöglicht wird“ (Cullmann et al., 2023)



Engere Systemgrenzen verringern den Arbeitsaufwand der Studie, können jedoch das Ergebnis verfälschen, wenn der betrachtete Prozess die Umweltwirkungen von Vorgängen außerhalb der Systemgrenzen beeinflusst. Nachdem die Systemgrenzen festgelegt wurden, müssen sämtliche Prozesse innerhalb der Systemgrenzen beschrieben werden. Außerdem wird die funktionelle Einheit festgelegt, eine fixer Output-Wert, auf den sich die Menge der Umweltwirkungen beziehen soll.

Der zweite Schritt der Ökobilanz ist das Aufstellen einer Sachbilanz. Hierbei werden alle Stoffe, die als In- und Output des Systems fungieren, aufgelistet. Im dritten Schritt, der Wirkungsabschätzung, wird auf Basis der in der Sachbilanz festgestellten In- und Outputs eine Aussage über die Umweltwirkungen des Gesamtsystems getroffen. Hierzu werden die Umweltwirkungen der einzelnen In- und Outputs analysiert, die Umweltwirkung des Systems entspricht der Summe der Umweltwirkungen, die durch die In- und Outputs verursacht werden.

Metaanalyse

Ziel einer Metaanalyse ist es, die Ergebnisse mehrerer wissenschaftlicher Studien zu einem Thema miteinander zu vergleichen und auf einen einheitlichen Trend hin zu untersuchen. Dafür müssen vor Beginn der Studiensichtung Kriterien aufgestellt werden, welche die Studien erfüllen müssen, um in der Metaanalyse beachtet zu werden. Diese Kriterien stellen die Vergleichbarkeit der Studien sicher und wirken sich auf die Interpretation der Ergebnisse aus.

Für die vorliegende Metaanalyse herangezogen wurden lediglich Studien, die auf Basis der Methodologie der Normen ISO 14040 und ISO 14044 erstellt wurden. Bei den Studien soll es sich außerdem um vergleichende Studien handeln, es soll innerhalb der Studie mindestens ein System, in dem die Ausscheidungen vermischt werden, mit einem System in dem diese getrennt gesammelt werden, verglichen werden. Des Weiteren wurden nur solche Studien betrachtet, welche die Verwertung von aus Toiletten mit Stoffstromtrennung gewonnenen Nährstoffen in der Landwirtschaft mit einbeziehen. Diese Einschränkung wurde vorgenommen, da wir davon ausgehen, dass die Verwendung der gewonnenen Ressourcen einen signifikanten Effekt auf die Umweltwirkung hat. Wenn dieser Schritt der Wertschöpfungskette nicht betrachtet wird, kommt es somit zu einer Verzerrung der Ergebnisse.

Es wurden insgesamt 11 Studien aus 6 verschiedenen Ländern und vier Kontinenten gefunden, die anhand dieser Kriterien geeignet für die Meta-Analyse sind (Tabelle 1). Die betrachteten Studien stellen neue Sanitärkonzepte, sowohl theoretische Modelle als auch real implementierte Anlagen, dem konventionellen System gegenüber, um eine direkte Vergleichbarkeit der Umweltwirkung zu ermöglichen.



Tabelle 1 Untersuchungsrahmen der Studien

Literaturquelle	Umfang	Ressource
Bradford-Hartke et al. (2015)	109 Haushalte	Urin & Fäzes
Hilton et al. (2021)	25.000 – 350.000 Personen	Urin
Ishii und Boyer (2015)	Universitätswohnheim	Urin
Landry und Boyer (2016)	Universitätswohnheim	Urin
Kavvada et al. (2017)	San Francisco	Urin
Kulak et al. (2017)	169 Mio. Toiletten	Urin & Fäzes
Lam et al. (2015)	2.000 Personen	Urin & Fäzes
Lehtoranta et al. (2014)	5 Personen	Urin & Fäzes
Martin et. al (2023)	1.020 Personen	Urin
Remy und Jekel (2008)	5.000 Personen	Urin & Fäzes
Spångberg (2014)	18 Personen	Urin & Schwarzwasser

Die betrachteten Studien unterscheiden sich im Umfang des betrachteten Gebietes (Vgl. Tabelle 1). Während die Studie mit dem geringsten Umfang lediglich die Versorgung von 5 Personen mit Trenntoiletten analysiert, werden in der umfangreichsten Studie 169 Millionen Toiletten betrachtet. Weiterhin unterscheiden sich die Studien darin, welche Ressourcen verwendet werden. Dabei umfassten die Systemgrenzen aller Studien die Prozesse von der Toilettennutzung über die Verwertung der Ausscheidung bis zur Düngung, wobei untersuchte Konzepte und Technologien zwischen den einzelnen Studien variierten.

Insgesamt sechs Studien nutzen sowohl den gewonnenen Urin als auch die gewonnenen Fäzes als Ressource für die Düngemittelherstellung. Die anderen Studien beschränken sich auf die Nutzung des Urins für die Düngung. In den Studien, in denen die Fäzes nicht für die Düngemittelherstellung genutzt werden, werden diese entweder entsorgt oder in Biogasanlagen eingesetzt. Die Studien unterscheiden sich außerdem in der Art der Behandlung des Urins, bevor er als Dünger verkauft bzw. ausgebracht wird. Vier Studien behandeln den gesammelten Urin nicht, sondern gehen davon aus, dass eine hinreichend lange Lagerung ausreicht, um aus dem Urin ein sicheres Düngemittel zu gewinnen. Die anderen Studien verwenden verschiedene technische Verfahren, um aus dem Urin Recyclingdünger zu gewinnen. Von diesen Studien betrachten einige zentrale, andere dezentrale Verfahren zur Urinaufbereitung, eine Studie betrachtet sowohl zentrale also auch dezentralen Verfahren und vergleicht diese.

Eine weitere Unterscheidung besteht im Transport der Ausscheidungen. Ein Konzept stellen hierbei Trockentrenntoiletten dar, bei denen komplett auf den Einsatz von Wasser verzichtet wird und dieses somit auch nicht als Transportmedium fungieren kann. Stattdessen erfolgt der Transport der Ausscheidung mit entsprechenden Fahrzeugen. Das andere betrachtete Konzept sind Trenntoiletten, bei denen Gelbwasser, mit Urin versetztes Abwasser, und Brauwasser, mit Fäzes



versetztes Abwasser, getrennt erfasst werden. Die getrennten Abwasserströme werden entweder gesammelt und abtransportiert oder aber über getrennte Rohrsysteme zur Klär- bzw. Aufbereitungsanlage geleitet.

Umweltwirkungen: Betrachtete Kategorien und deren Bedeutung

Die betrachteten Umweltwirkungskategorien wurden anhand bekannter Effekte des konventionellen und des neuartigen Sanitärsystems ausgewählt (Vgl. Krause et al., 2021). Welche der betrachteten Studien welche Umweltkategorie analysiert, kann Tabelle 2 entnommen werden. Die Kategorien decken eine Maßstabsebene von lokal bis global ab, alle haben einen direkten Einfluss auf die ökologischen planetaren Belastungsgrenzen. Die betrachteten Umweltkategorien wirken sich auf biochemische Kreisläufe, die Einbringung von Chemikalien, dem Verbrauch von Süßwasser und den Klimawandel aus. Damit werden mehrere Problemfelder eingeschlossen, in denen die planetaren Belastungsgrenzen bereits überschritten sind.

Tabelle 2 Betrachtete Umweltwirkungen

	GWP	EP	AP	Öko-toxizität	Energie	Wasser
Bradford-Hartke et al. (2015)	✓	✓	-	✓	✓	✓
Hilton et al. (2021)	✓	✓	✓	-	✓	✓
Ishii und Boyer (2015)	✓	✓	✓	✓	✓	-
Landry und Boyer (2016)	✓	✓	✓	✓	-	-
Kavvada et al. (2017)	-	-	-	-	✓	-
Kulak et al. (2017)	✓	-	-	-	-	-
Lam et al. (2015)	✓	✓	✓	-	-	-
Lehtoranta et al. (2014)	✓	✓	-	-	-	-
Martin et. al. (2023)	✓	✓	✓	-	✓	✓
Remy und Jekel (2008)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Spångberg (2014)	✓	✓	✓	-	✓	-

Ergebnisse der Meta-Analyse

Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch des Systems wurde von lediglich 3 Studien betrachtet. Er gibt an, wie viel Süßwasser im gesamten Prozess verschmutzt wird oder verloren geht. Einen großen Anteil am Wasserverbrauch hat im konventionellen System die Nutzung von Wasser zum Exkremententransport. **Da in einem Trennsystem weniger oder gar kein Wasser benötigt wird, kommen die Studien zum einheitlichen Ergebnis, dass ein solches System den Wasserverbrauch erheblich senken kann.**



Erderwärmungspotenzial

Das Erderwärmungspotenzial (*global warming potential*, GWP) eines Prozesses ergibt sich aus den Treibhausgasen (THG), die bei diesem freigesetzt werden. Durch unterschiedliche Verweildauern in der Atmosphäre und eine unterschiedlich starke Treibhauswirkung, haben verschiedene Treibhausgase ein unterschiedlich hohes Erderwärmungspotenzial. Um die Emission verschiedener THG miteinander vergleichen zu können, wird deren Menge daher entsprechend ihres GWP in CO₂-Äquivalenten normiert. In den betrachteten Studien stellten sich Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan als die beiden relevantesten THG im Sanitärsystem heraus. Während CO₂ vor allem bei energieintensiven Prozessen durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen freigesetzt wird, entstehen Methan-Emissionen, wenn Fäkalien oder Klärschlamm ausgasen.

Das GWP wird von 9 der 11 Studien analysiert. In allen Studien konnte durch Sanitärsysteme, die mit Hilfe von Stoffstromtrennung für eine Entlastung der Kläranlagen sorgen, ein großer Teil des im konventionellen System ausgestoßenen CO₂ eingespart werden. Zusätzlich wurden durch die Verwendung der gewonnen Ressourcen als Dünger THG-Emissionen bei der Herstellung von Dünger eingespart werden. Die THG-Emissionen, die mit dem Teilprozess der Verarbeitung der Ausscheidungen zu Dünger entstanden sind, waren in allen Studien niedriger als die Emissionen, die bei der Herstellung von synthetischen Düngern mit der gleichen Düngeleistung anfallen würden.

In einzelnen Studien, in denen mehrere alternative Sanitärsysteme verglichen werden, wurden auch Faktoren gefunden, die das GWP eines Trennsystems enorm erhöhen können. So fanden Ishii und Boyer (2015), dass die zusätzliche Beigabe von Natriumphosphat bei der Struvitgewinnung, die in dieser Studie zur Verarbeitung des Urins genutzt wurde, aufgrund der bei der Produktion des Stoffes anfallenden THG-Emissionen, das Erderwärmungspotenzial des Systems enorm erhöht und dadurch ein höheres GWP aufweist als das konventionelle System. Kulak et al. (2017) zeigen, dass in einem von ihnen betrachteten Trennsystem, das Latrinen nutzt, das GWP aufgrund der Methan- ausgasungen der in diesem System unbehandelten Fäkalien höher ist als in einem konventionellen System mit Kläranlage. Die beiden Studien, in denen ein betrachtetes Trennsystem ein höheres GWP hat als das konventionelle System, wird jeweils auch ein anderes Trennsystem betrachtet, das ein niedrigeres GWP als das konventionelle System aufweist. Daher kommen diese beiden Studien zu dem Schluss, dass sich Trenntoiletten positiv auf das GWP des Sanitärsystems auswirken können.

In den Studien, in denen eine Reduktion des GWP festgestellt wurde, beläuft sich dieses in einem Rahmen von 30 bis nahezu 100 %. Die Unterschiede im Einsparpotential resultieren primär aus den verschiedenen Technologien und Systemgrenzen. **Bei der Betrachtung von weiteren Systemgrenzen liegt das Einsparpotential im Bereich zwischen 30 und 50 %.** Dieser Effekt resultiert daher, dass bei weiteren Systemgrenzen auch Prozesse betrachtet werden, auf deren GWP das Trennsystem keinen Einfluss hat, was somit den prozentualen Wert der Einsparung sinkt.



Energieverbrauch

Der Energieverbrauch des Sanitärsystems wurde von 6 der 11 Studien analysiert. Das Ergebnis in dieser Kategorie fällt ähnlich aus wie beim Erderwärmungspotenzial. Der Betrieb von Kläranlagen und die Produktion von synthetischem Dünger sind im konventionellen System die zwei größten Energieverbraucher. In einem Trennsystem können beide Prozesse zum Teil substituiert werden, ohne dass andere energieintensive Prozesse an deren Stelle treten, wodurch Energie eingespart werden kann. **Das in den Studien errechnete Energieeinsparungspotenzial bewegt sich im Rahmen von 30 bis 70 %.**

Eutrophierungspotenzial

Das Eutrophierungspotenzial eines Prozesses ergibt sich durch den ungewollten Eintrag von Nährstoffen in ein Ökosystem. Durch übermäßigen Nährstoffeintrag kommt es zu einem für das Ökosystem ungesunden, einseitigen Pflanzenwachstum, welches das Ökosystem zum Kippen bringen kann. Das Eutrophierungspotenzial von Sanitärsystemen ist vor allem durch Nährstoffrückstände aus der Wasseraufbereitung gegeben.

Das Eutrophierungspotenzial wird von 8 der 11 Studien analysiert. Alle bis auf eine dieser Studien kommen zu dem Ergebnis, dass das Eutrophierungspotenzial durch Trennsysteme erheblich gesenkt werden kann. **Das errechnete Einsparungspotenzial beläuft sich bei diesen Studien auf zwischen 50 bis 85 %.** Die unterschiedlichen Ergebnisse begründen sich durch Unterschiede bei den betrachteten Kläranlagen und den getroffenen Annahmen über deren Anteil der entfernten Nährstoffe aus dem Wasser.

Die Ergebnisse von Spangberg et al. (2014) weichen in dieser Kategorie stark von den anderen Studien ab. Diese Studie kommt zu dem Ergebnis, dass das Eutrophierungspotenzial von Trennsystemen um das 25- bis 19-Fache höher sei als Eutrophierungspotenzial eines konventionellen Systems. Im Gegensatz zu den anderen Studien wird in dieser Arbeit angenommen, dass die Nährstoffemissionen der Wasseraufbereitungsanlage im konventionellen und im Trennsystem gleich seien. Dies steht im Kontrast zu den anderen in der Meta-Analyse betrachteten Studien, die eine erhebliche Verminderung des Eutrophierungspotenziales durch geringere Nährstoffemissionen aus der Wasseraufbereitung bei der Implementierung eines Trennsystems feststellen konnten.

Versauerungspotenzial

Durch die Einleitung von Stoffen mit niedrigem pH-Wert, wird eine Versauerung des Systems begünstigt. Diese Versauerung gefährdet die im System lebenden Organismen. Durch das Entstehen von saurem Regen kann die lokale Versauerung außerdem in andere Ökosysteme getragen werden.



6 der 11 Studien untersuchen das Versauerungspotenzial der Sanitärsysteme. Im Allgemeinen wurde ein geringes Versauerungspotenzial für das konventionelle System festgestellt. **Das Versauerungspotenzial Systemen mit Stoffstromtrennung ist nahezu nicht vorhanden, wenn nicht Chemikalien mit einem hohen Versauerungspotenzial zur Nährstoffrückgewinnung, zum Beispiel bei der Urinaufbereitung, verwendet werden.** Die Verwendung von Natriumphosphat in der Studie von Ishii und Boyer (2015) und die Verwendung von Ammoniumsulfat in der Studie von Hilton et al. (2021) führte zu einer Vervielfachung des Versauerungspotenziales. Beide Studien betrachten jedoch ebenfalls Aufbereitungsmethoden, bei denen diese Chemikalien nicht zum Einsatz kommen und das Versauerungspotenzial auf einem niedrigen Niveau gehalten werden kann.

Eine Ausnahme in dieser Kategorie stellt die Studie von Lam et al. (2015) dar. In dieser Studie werden behandeltes Abwasser und Klärschlamm zur Bewässerung und Düngung von Feldern genutzt. In diesen Fällen stellten die Autor:innen ein doppelt so hohes Versauerungspotenzial im Vergleich zur getrennten Urin-Sammlung und anschließenden Düngung mit Urin und Bewässerung mit urinfreiem Abwasser fest.

Ökotoxizität

Die Ökotoxizität wurde von drei Studien analysiert. Dabei wird die Einleitung giftiger Stoffe in das Ökosystem betrachtet. Da die Wirkungen verschiedener Umweltgifte sehr vielfältig sein können ist ein Vergleich unterschiedlicher Stoffe nur schwer möglich. Das konventionelle Sanitärsystem weist eine höhere Ökotoxizität auf, da Arzneimittel, die hauptsächlich durch Urin eingetragen werden, nicht rückstandsfrei aus dem Abwasser entfernt werden. **Eine Urinseparierung kann die Ökotoxizität um bis zu 90 % verringern, wenn der Urin danach sachgemäß behandelt wird** (Landry und Boyer, 2016). **Auch der Eintrag von Schwermetallen wie Cadmium, Chrom und Blei in den Boden kann um bis zu 85 % verringert werden**, wenn organischer Recyclingdünger aus Systemen mit Stoffstromtrennung verwendet wird (Remy und Jekel, 2008).

Fazit

In den analysierten Studien wurden zum Teil sehr unterschiedliche Anwendungsgebiete für stoffstromtrennende Sanitärsysteme untersucht. Da sich die verschiedenen Szenarien zum Teil stark voneinander in den Voraussetzungen und der Ausgestaltungsform der Systeme unterscheiden, kommt es zu einer großen Variationsbreite in den betrachteten Umweltwirkungen. Zudem haben die Studien gezeigt, dass es Faktoren gibt, insbesondere die Verwendung von bestimmten Chemikalien und eine unsachgemäße Handhabung von Exkrementen, die dazu führen können, dass stoffstromtrennende Sanitärsysteme starke negative Umweltwirkungen haben können.



Wenn diese Faktoren in Planung und Betrieb berücksichtigt werden, **zeigen alle analysierten Studien auf, dass stromstromrennende Systeme negative Umwelteffekte reduziert werden können. Dies gilt besonders in den Kategorien, in denen das konventionelle Sanitärsystem die Umwelt aktuell belastet. Ein positiver Umwelteffekt stellt sich insbesondere dadurch ein, dass menschlichen Fäkalien nicht mehr den Klärwerken zugeführt werden und diese dadurch entlastet werden.** Diese Entlastung sorgt zum einen für einen geringeren Energieverbrauch, zum anderen für einen geringeren direkten Schadstoffeintrag durch die Klärwerke in die Umwelt. Stoffstromtrennende Sanitärsysteme können daher einen Beitrag leisten, das menschliche Handeln mit den planetaren Grenzen (Richardson et al., 2023) vereinbar zu machen.

Dieses Dokument ist im Rahmen des Projektes „REGION.innovativ – zirkulierBAR: Interkommunale Akzeptanz für nachhaltige Wertschöpfung aus sanitären Nebenstoffströmen“ entstanden. zirkulierBAR ist ein im Rahmen der Fördermaßnahme REGION.innovativ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt.

Der vorliegende Text wurde von den oben genannten Autor:innen erarbeitet.

Die Inhalte des Dokuments sind unter Creative Commons – Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International – [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) lizenziert.

REGION.innovativ – zirkulierBAR:

Interkommunale Akzeptanz für nachhaltige Wertschöpfung aus sanitären Nebenstoffströmen

Koordination Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V. in Großbeeren

Web: <https://zirkulierbar.de> | Kontakt: info@zirkulierbar.de





Literaturquellen

- Bradford-Hartke, Zenah, Joe Lane, Paul Lant, und Gregory Leslie. 2015. „Environmental benefits and burdens of phosphorus recovery from municipal wastewater“. *Environmental science & technology* 49 (14): 8611–22.
- Cullmann, Astrid, Gretag Sundermann, Nicole Wägner, Christian von Hirschhausen, Claudia Kemfert (2022). Wertvolle Ressource Wasser auch in Deutschland zunehmend belastet und regional übermäßig genutzt. DIW Wochenbericht 49 / 2022, S. 651-660. https://www.diw.de/de/diw_01.c.860993.de/publikationen/wochenberichte/2022_49_1/wertvolle_ressource_wasser_auch_in_deutschland_zunehmend_belastet_und_regional_uebermaessig_genutzt.html
- Hilton, Stephen P., Gregory A. Keoleian, Glen T. Daigger, Bowen Zhou, und Nancy G. Love. 2021. „Life cycle assessment of urine diversion and conversion to fertilizer products at the city scale“. *Environmental Science & Technology* 55 (1): 593–603.
- Ishii, Stephanie K.L., und Treavor H. Boyer. 2015. „Life Cycle Comparison of Centralized Wastewater Treatment and Urine Source Separation with Struvite Precipitation: Focus on Urine Nutrient Management“. *Water Research* 79 (August): 88–103. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.010>.
- Kavvada, Olga, William A. Tarpeh, Arpad Horvath, und Kara L. Nelson. 2017. „Life-Cycle Cost and Environmental Assessment of Decentralized Nitrogen Recovery Using Ion Exchange from Source-Separated Urine through Spatial Modeling“. *Environmental Science & Technology* 51 (21): 12061–71. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02244>.
- Kulak, Michal, Nimish Shah, Niteen Sawant, Nicole Unger, und Henry King. 2017. „Technology Choices in Scaling up Sanitation Can Significantly Affect Greenhouse Gas Emissions and the Fertiliser Gap in India“. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* 7 (3): 466–76. <https://doi.org/10.2166/washdev.2017.005>.
- Krause A, von Hirschhausen C, Schröder E, Augustin F, Häfner F, Bornemann G, Sundermann G, Korduan J, Udert KM, Deutsch L, Reinhardt ML, 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.
- Lam, Lauho, Kiyoko Kurisu, und Keisuke Hanaki. 2015. „Comparative environmental impacts of source-separation systems for domestic wastewater management in rural China“. *Journal of Cleaner Production* 104: 185–98.
- Landry, Kelly A., und Treavor H. Boyer. 2016. „Life Cycle Assessment and Costing of Urine Source Separation: Focus on Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drug Removal“. *Water Research* 105 (November): 487–95. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.024>.
- Lehtoranta, S., R. Vilpas, und T. J. Mattila. 2014. „Comparison of carbon footprints and eutrophication impacts of rural on-site wastewater treatment plants in Finland“. *Journal of Cleaner Production* 65 (Februar): 439–46. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.024>.
- Remy, C., und M. Jekel. 2008. „Sustainable wastewater management: life cycle assessment of conventional and source-separating urban sanitation systems“. *Water Science and Technology* 58 (8): 1555–62.
- Richardson, Katherine, Will Steffen, Wolfgang Lucht, Jørgen Bendtsen, Sarah E. Cornell, Jonathan F. Donges, Markus Drüke, et al. 2023. ‘Earth beyond Six of Nine Planetary Boundaries’. *Science Advances* 9 (37): eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>.
- Spångberg, J., P. Tidåker, und H. Jönsson. 2014. „Environmental Impact of Recycling Nutrients in Human Excreta to Agriculture Compared with Enhanced Wastewater Treatment“. *Science of The Total Environment* 493 (September): 209–19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.123>.