

Zusammenfassung:
Meta-Analyse von Life-Cycle-
Assessments zu Toiletten mit
Stoffstromtrennung

Gero Scheck TU Berlin¹

¹ titles, full affiliation, full adress, including email

Verzeichnisse

Inhaltsübersicht

Verzeichnisse.....	ii
1 Einleitung.....	1
2 Methodik	1
3 Umweltwirkungen: Arten und Bedeutung.....	3
4 Fazit	6
Literaturverzeichnis.....	7

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse	ii
Inhaltsübersicht	ii
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis.....	v
1 Einleitung	1
2 Methodik	1
2.1 Ökobilanzen	1
2.2 Metaanalyse	1
3 Umweltwirkungen: Arten und Bedeutung	3
3.1 Erderwärmungspotenzial	4
3.2 Eutrophierungspotenzial	5
3.3 Versauerungspotenzial	5
3.4 Energieverbrauch	6
3.5 Wasserverbrauch	6
3.6 Ökotoxizität.....	6
4 Fazit	6
Literaturverzeichnis	7

Abbildungsverzeichnis

Es konnten keine Einträge für ein Abbildungsverzeichnis gefunden werden.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Untersuchungsrahmen der Studien.....	2
Tabelle 2 Betrachtete Umweltwirkungen.....	3

1 Einleitung

Die Meta-Analyse von Life-Cycle-Assessment-Studien zu Toiletten mit Stoffstromtrennung wurde mit dem Ziel erstellt, zu untersuchen, 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 6 verschiedener Umweltwirkungskategorien miteinander verglichen wurden.

2 Methodik

2.1 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 zunächst 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. 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.

2.2 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 10 Studien aus 6 verschiedenen Ländern und vier Kontinenten gefunden, die anhand dieser Kriterien geeignet für die Meta-Analyse sind. Die betrachteten Studien stellen neue Sanitärkonzepte, sowohl theoretische Modelle als auch real implementierte Anlagen, dem konventionellen System gegenüber, um eine direkte Vergleichbarkeit der Umweltwirkung möglich zu machen.

Tabelle 1 Untersuchungsrahmen der Studien

	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)	2000 Personen	Urin & Fäzes
Lehtoranta et al. (2014)	5 Personen	Urin & Fäzes
Remy und Jekel (2008)	5000 Personen	Urin & Fäzes
Spångberg (2014)	18 Personen	Urin & Schwarzwasser

Die Systemgrenzen aller Studien umfassten die Prozesse von der Toilettennutzung bis zur Düngung. Die Art der Düngung variiert zwischen den einzelnen Studien. Tabelle 1 gibt eine Übersicht darüber, in welchen Studien welche Ressource verwendet wird. 6 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. 4 Studien behandeln den gewonnenen 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.

Die betrachteten Studien unterscheiden sich zum Teil stark im Umfang des betrachteten Gebietes. Eine Übersicht über den Umfang der Studien findet sich in 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.

3 Umweltwirkungen: Arten und Bedeutung

Tabelle 2 Betrachtete Umweltwirkungen

	GWP	EP	AP	Ökotoxizität	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)	✓	✓	–	–	–	–
Remy und Jekel (2008)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Spångberg (2014)	✓	✓	✓	–	✓	–

Die betrachteten Umweltwirkungskategorien wurden anhand bekannter Effekte des konventionellen und des neuartigen Sanitärsystems ausgewählt. Welche der betrachteten Studien welche Umweltkategorie analysiert, kann Tabelle 2 entnommen werden. Die Kategorien decken eine Maßstabebene 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.

3.1 Erderwärmungspotenzial

Das Erderwärmungspotenzial 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 Erderwärmungspotential. Um die Emission verschiedener THG miteinander vergleichen zu können, wird deren Menge daher entsprechend ihres Erderwärmungspotentials 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 Erderwärmungspotential wird von 9 der 10 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 gewonnenen 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 THG-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 Erderwärmungspotential 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 Erderwärmungspotential des Systems enorm erhöht und dadurch ein höheres Erderwärmungspotential aufweist als das konventionelle System.

Kulak et al. (2017) zeigen, dass in einem von ihnen betrachteten Trennsystem, das Latrinen nutzt, das Erderwärmungspotential aufgrund der Methanausgasungen 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 Erderwärmungspotential hat als das konventionelle System, wird jeweils auch ein anderes Trennsystem betrachtet, das ein niedrigeres Erderwärmungspotential als das konventionelle System aufweist. Daher kommen diese beiden Studien zu dem Schluss das sich Trenntoiletten positiv auf das Erderwärmungspotential des Sanitärsystems auswirken können.

In den anderen Trennsystemen, bei denen ein Reduktion des Erderwärmungspotential festgestellt wurde, beläuft sich dieses in einem Rahmen von 30 bis nahezu 100 %. Die Unterschiede im Einsparpotential resultieren primär aus den verschiedenen Systemen und den verschiedenen Systemgrenzen, wobei bei der Betrachtung von weiteren Systemgrenzen das errechnete Einsparpotential im Bereich zwischen 30 und 50 % liegt. Dieser Effekt resultiert daher, dass bei weiteren Systemgrenzen auch Prozesse betrachtet werden, auf deren Erderwärmungspotential das Trennsystem keinen Einfluss hat und somit der prozentuale Wert der Einsparung sinkt.

3.2 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 10 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 unterschiedliche betrachtete Kläranlagen und unterschiedliche Annahmen über deren Anteil der entfernten Nährstoffe auf 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.

3.3 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 10 Studien untersuchen das Versauerungspotenzial der Sanitärsysteme. Im Allgemeinen wurde ein geringes Versauerungspotenzial für das konventionelle System festgestellt. Das Versauerungspotenzial von Trennsystemen wurde ebenfalls als sehr gering festgestellt. Eine Ausnahme hiervon stellte die Verwendung von bestimmten Chemikalien zur Urinaufbereitung dar. 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 Autoren ein doppelt so hohes Versauerungspotenzial im Vergleich zur getrennten Urin-Sammlung und anschließenden Düngung mit Urin und Bewässerung mit urinfreiem Abwasser fest.

3.4 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch des Sanitärsystems wurde von 6 der 10 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 %.

3.5 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.

3.6 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 daher 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 Dünger, der aus der Rückgewinnung von Toiletten mit Stoffstromtrennung stammt, verwendet wird (Remy und Jekel, 2008).

4 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 die unsachgemäße Handhabung von Exkrementen, die dazu führen können, dass stoffstromtrennende Sanitärsysteme starke negative Umweltwirkungen haben können. In ihrer Gesamtheit zeigen alle analysierten Studien jedoch auf, dass, wenn diese Faktoren in Planung und Betrieb berücksichtigt werden, stoffstromtrennende Systeme in den Kategorien, in denen das konventionelle Sanitärsystem die Umwelt aktuell belastet, negative Umwelteffekte reduziert werden können. 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 vereinbar zu machen.

Literaturverzeichnis

- 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.
- 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>.
- Lam, Lauho, Kiyo 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.
- 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>.