

**Josef G. Knoll-Wissenschaftspreisträger 2018**

**Josef G. Knoll-Science Award Winner 2018**

**Ariane Krause “Valuing Wastes – An Integrated System Analysis of Bioenergy, Ecological Sanitation, and Soil Fertility Management in Smallholder Farming in Karagwe, Tanzania“, Technische Universität Berlin, 2018**

Abstract

My dissertation had as its starting point the intention of two Tanzanian farmer's initiatives and their German partners to disseminate 'sustainable' cooking and sanitation technologies to smallholder households in Karagwe District, Tanzania (TZ). These locally developed and adapted technologies include improved cooking stoves (ICS), such as microgasifiers, and a system combining biogas digesters and burners for cooking, as well as urine-diverting dry toilets, and thermal sterilization/pasteurization for ecological sanitation (EcoSan). Currently, the most common combination of technologies for cooking and sanitation found in Karagwe smallholder households is a three-stone fire and pit latrine. Switching to the 'new' alternatives could potentially lead to optimized resource consumption, lower environmental emissions, and a higher availability of domestic residues for soil fertility management. The latter include biogas slurry from anaerobic digestion, powdery biochar from microgasifiers, and sanitized human excreta from EcoSan facilities. These residues are 'locally available resources' that can be used for on-farm material cycling. Such recycling practices address an existing problem for many smallholders in sub-Saharan Africa (SSA), namely, the lack of soil amenders to sufficiently replenish soil nutrients and soil organic matter (SOM) in soils used for agricultural activity.

My work, therefore, opens up a wider field of research into so-called 'microenergy systems': understanding and quantifying how energy, sanitation, and agriculture are interlinked in smallholder systems in SSA. Using TZ as an example, I have examined this nexus by applying an integrated systems analysis to jointly investigate (i) cooking and sanitation technologies that are locally available alternatives to smallholder households, and (ii) recycling-driven approaches to soil fertility management. My interdisciplinary research approach has applied a broad set of methodologies including: literature reviews, accessing practitioners' data from pilot projects, laboratory analysis, a practice-oriented short-term field experiment, material flow analyses, soil nutrient balances, and, finally, a multi-criteria analysis with participatory elements. Overall, this extensive and cumulative research project comprises five scientific articles.

Analytically and empirically, my results shed light on (i) potentials for circular economies in local smallholder farming systems, (ii) agronomic values for 'intersectional resource management', and (iii) weak points in the system, from both ecological and socio-economic perspectives. For example, I showed that cooking with either ICSs or the biogas system significantly reduces firewood requirements in smallholder households. Weak points in the biogas system, however, include increased total greenhouse gas emissions, and high acquisition costs. Implementation of waterless EcoSan facilities, meanwhile, is possible with a moderate initial cost outlay, significantly promotes nutrient recovery, and reduces environmental emissions. EcoSan, therefore, constitutes a viable alternative to water-based

septic systems, which place heavy pressure on already scarce water resources.

When assessing the technologies analyzed from multiple perspectives relating to 'sustainability', I found that the individual perceptions and evaluations of the cooperating stakeholders exhibited clear differences. Representatives of the German project partners tended to be more enthusiastic about new technologies, while representatives of the Tanzanian partners tended to be more sceptical. Overall, all the technologies analyzed, for both cooking and sanitation, are perceived as 'acceptable' rather than 'favourable' alternatives.

With respect to the recovery of residues from cooking and sanitation, I found that all the treatments analyzed are viable as substitutes for synthetic, commercial fertilizers. Using maize as an example, so-called 'CaSa-compost' the product of co-composting biochar with sanitized human excreta, has the potential to quadruple grain yields in the short-term, due to a direct increase of soil pH and an increase in plant-available phosphorus (P) in the soil. In the long-term, CaSa-compost or biogas slurry both show the potential to roughly double yields of maize grains. Corresponding nutrient requirements can, meanwhile, be adequately compensated for through residue capturing and subsistence production of soil amenders. Overall, the potential of CaSa-compost for 'sustainable' soil fertility management is superior to that of standard compost, especially with respect to liming, replenishing soil P, and restoring SOM. Biogas slurry, however, yields inferior results in all aspects when compared to compost amendments. The demonstrated potential of both CaSa-compost as biogas slurry to increase yields is, therefore, theoretically adequate to ensure sufficient food supply to smallholders and also to increase farm income from selling of crops.

Finally, I conclude that the practical approach of recovering biochar from cooking and human excreta from EcoSan represents a suitable exit strategy from the vicious circle of soil acidity and P-scarcity leading to insufficient production of food crops, which in turn leads to insufficient production of residual matter for soil fertility management and improvement, in the context of SSA smallholdings. Future research could include an upscaling of my results to a community level, a study of the fate of pharmaceuticals and hormones in the agroecosystem, an exploration of appropriate application dosages, timing, and techniques for the use of biogas slurry, or long-term field experiments to examine opportunities of CaSa practice to serve as a mitigation measure to climate change.

## Resümee

Der Anlass meiner Forschung ist der global betrachtet -unverhältnismäßige Umgang der Menschen mit natürlichen Ressourcen. Es gibt mittlerweile einen breiten Konsens darüber, dass dieser Raubbau der Menschen an der Natur, und vor allem der Ressourcenkonsum der wohlhabenden Länder, dazu führt, dass unsere Ressourcen knapp werden und dass wir auf verschiedene Weisen die ökologischen Belastungs-Grenzen der Erde -die sogenannten „*planetary boundaries*“ -überschreiten. Besonders im Bereich der Nährstoffflüsse und der Artenvielfaltüberschreiten wir die globalen Grenzwerte bereits soweit, dass wir irreversible Umweltveränderungen und letztlich sogar die Unbewohnbarkeit der Erde riskieren. Die Landwirtschaft bzw. die Produktion und Nutzung von synthetischen Düngemitteln, Pflanzenschutzmitteln, Saatgut etc. trägt signifikant zu diesem Risiko bei.

*Wie aber können wir menschliche Bedürfnisse nach Nahrung und Energie decken, ohne dabei die Natur zu überlasten, sondern dabei unsere Ökosysteme zu pflegen?*

Als mögliche Maßnahmen für einen **nachhaltigen Umgang mit Ressourcen** schlagen u.a. der Weltagrarrat und die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO), vor (i) Kreislaufwirtschaften zu etablieren, (ii) effektive und effiziente Technologien zu nutzen, die auf die jeweiligen lokalen Bedingungen angepasst und auch bezahlbar sind, und (iii) für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit vor Ort verfügbare Ressourcen zu nutzen. Als bekannte Ansätze zum Aufbau von Kreislaufwirtschaften gelten u.a. (i) die Nutzung von **Bio-Energie**, also die Bereitstellung von Energie aus Biomasse bzw. aus nachwachsenden Rohstoffen oder organischen Abfällen, und (ii) die **ökologische Sanitärversorgung**, kurz EcoSan, die Stoffströme getrennt betrachtet, erfasst, behandelt, und wenn möglich recycelt oder in eine andere Nutzung bringt. Beides sind bereits gut beforschte Felder, die auch schon ihren Weg in die praktische Anwendung gefunden haben.

In meiner Forschung habe ich nun den Einsatz von Koch- und Sanitär-Technologien und den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft gemeinsam betrachten. Das „Neue“ liegt also in der **Kopplung der drei Felder Bio-Energie, EcoSan, und Landwirtschaft** zu einem kreislaufforientierten, inter-sektionalen Ressourcen-Management. Ziel war es, eine umfassende -und dennoch handhabbare -System-Analyse zu einem frühen Zeitpunkt, also noch vor der eigentlichen Implementierung, durchzuführen. Die Analyse soll dazu dienen können (i) potentielle Effekte und Wechselwirkungen zu untersuchen, (ii) konkurrierende oder sich widersprechende Nachhaltigkeits-Ziele zu identifizieren, und letztlich (iii) unerwünschte Problemverlagerungen zu vermeiden. Meine übergeordnete Forschungsfrage war:

*Welche ökologischen und agronomischen Potentiale können realisiert werden, wenn die Implementierung von Koch- und Sanitärtechnologien kombiniert wird und gleichzeitig anfallende Reststoffe als Ressourcen in der Landwirtschaft genutzt werden?*

Vor dem Hintergrund, dass weltweit ca. 50 % der Nahrungsmittel von Kleinbäuer\*innen im Globalen Süden erzeugt werden, und ich über frühere Tätigkeiten den Zugang zu passenden Projekten in Tansania hatte, habe ich meine Forschung **auf kleinbäuerliche Landwirtschaft am Beispiel der ländlichen Region Karagwe, in Tansania**, ausgerichtet. Der Distrikt Karagwe gehört zur Region Kagera und liegt im Nord-Westen Tansanias, nahe dem Viktoriasee. Über 90 % der Haushalte sind in der Landwirtschaft tätig und leben ganz oder teilweise in Subsistenzwirtschaft. Das nutzbare Land pro Farm beträgt meist weniger als 1 Hektar; es handelt sich hier also um „kleinbäuerliche Landwirtschaft“. Die große Mehrheit der Haushalte in Karagwe verwenden zum Kochen Feuerholz und als Sanitäranlagen

Latrinen-Toiletten. Aufgrund dieser Tatsachen -und dem stetigen Wachstum der Bevölkerung –steigt der Druck auf natürliche Ressourcen wie Holz bzw. Wälder, Wasserquellen, und auch den Boden.

Diese aktuellen Versorgungsstrukturen waren der Anlass, warum zwei lokale Organisationen zusammen mit deutschen Partnern drei neue Projekte initiiert haben. Ziel war es, „angepasste Technologien“ als nachhaltige Alternativen für die Energie-bzw. Sanitärversorgung zu entwickeln. Die drei Projekte sind: (1.) Das BiogaST-Projekt (*Biogas Support for Tanzania*), das sich mit der Entwicklung einer **Kleinst-Biogasanlage** beschäftigt hat, deren Design auf die Verwendung lokal verfügbarer Ressourcen für Bau und Betrieb angepasst wurde. (2.) Das EfCoiTa-Projekt (*Efficient Cooking in Tanzania*), das sich mit effizientem Kochen per **Mikrovergaser** beschäftigt hat. Und (3.) das CaSa-Projekt (*Carbonization and Sanitation*), das einen neuen EcoSan-Ansatz ausprobiert. Das besondere am CaSa-Ansatz ist die Hitzebehandlung der in einer **Trenntrockentoiletten** (TTT) gesammelten Fäzes mit dem Ziel der „Hygienisierung“, also der Inaktivierung möglicher Krankheitserreger, per Pasteurisierung. Vorausgesetzt die entwickelten Technologien werden angenommen und implementiert, dann könnten folgende Ressourcen für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit genutzt werden: (i) **Gärreste** aus der Biogasanlage, die direkt zum Düngen im Ackerbau verwendet werden können; (ii) **Urin**, der eine bestimmte Zeit gelagert werden muss, und dann direkt als Flüssigdünger eingesetzt werden kann; (iii) **Biokohle** fällt als Rest in den Mikrovergasern, die im untersuchten Ansatz sowohl zum Kochen, als auch für die Pasteurisierung der Fäzes genutzt werden. Diese Biokohle kann gemeinsam mit (iv) **hitze-behandelten Fäzes** kompostiert werden; nach den Entstehungs-Prinzipien der *Dark African Earth* oder der *Terra Preta*.

Zur Anwendung einer integrierten System-Analyse habe ich verschiedene Methoden kombiniert. Das Konzept meiner Forschung lässt sich übergeordnet in drei Phasen aufteilen: (1.) die Datenerhebung, (2.) die Systemanalyse und (3.) die Auswertung bzw. Bewertung. Die Datenerhebung war initial notwendig um eine ausreichende Datenlage für den spezifischen Untersuchungskontext zu schaffen. Zunächst habe ich durch **Laboranalysen** die Nährstoffzusammensetzungen folgender Substrate bestimmt: (i) Gärreste aus einer BiogaST-Pilotanlage, (ii) „CaSa-Kompost“, als Produkt aus der Ko-Kompostierung von hygienisierten Fäzes, mit Biokohle und anderen Reststoffen, und (iii) Standard-Komposts, wie er in der Region hergestellt wird und der als Vergleichssubstrat dient. Dadurch konnte ich deren theoretische Potentiale als Düngemittel bzw. Bodenverbesserer charakterisieren. Um mögliche, kurzfristige Wirkungen auf bestimmte Boden-Parameter sowie das Pflanzenwachstum empirisch zu quantifizieren, habe ich vor Ort einen **praxis-orientierten Feldversuch** durchgeführt. Aufbauend auf den in dieser Phase gewonnenen Daten und Erkenntnissen, habe ich schließlich die Systemanalyse durchgeführt. Zunächst habe ich systematisch untersucht, wie sich bestimmte Stoffflüsse zwischen Farm und Ökosystem verändern, abhängig davon welche Technologien in den Haushalten zum Kochen oder als Sanitäreanlagen genutzt werden. Dazu habe ich mehrere Rechenmodelle aufgebaut, die den Grundsätzen der **Stoffstromanalyse** folgen. Anschließend habe ich in einem weiteren Rechenmodell die ermittelten Reststoff-Potentiale, in das Fruchtbarkeits-Management der lokalen Böden integriert und systematisch verschiedene Recycling-Szenarien betrachtet. Methodisch habe ich die Stoffstromanalyse mit der **Bodennährstoff-Bilanzierung** kombiniert. Die abschließende Nachhaltigkeits-Bewertung der entwickelten Technologien basiert auf der sogenannten Mehr-Kriterien-Analyse und integriert partizipative Elemente zur Entscheidungsunterstützung. Dazu habe ich mögliche Kriterien und Methoden identifiziert, ein Bewertungs-Werkzeug aufgebaut und dieses mit Repräsentant\*innen aus den Fallstudien getestet. Außerdem habe ich, in Ergänzung zu den empirischen Untersuchungen der

kurzfristigen Wirkungen, auch noch mögliche langfristige Wirkungen der untersuchten Kreislaufwirtschaftsansätze simuliert. Dazu habe ich, das sogenannte „*Soil and Water Integrated Model*“, das am Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelt wurde, verwendet. Darin habe ich die im vierten Arbeitspaket analysierten Dünge-Szenarien abgebildet und Effekte auf die P-Vorräte im Boden über einen Zeitraum von 30 Jahren simuliert.

Im folgenden Teil werde ich nun ausgewählte Ergebnisse diskutieren.

Die **Laboranalysen** haben zusammengefasst gezeigt, dass alle Substrate in ausreichenden Konzentrationen Haupt-Nährstoffe enthalten um eine angemessene Düngewirkung erreichen zu können. Außerdem zeigen alle untersuchten Substrate gute Kalkungs-Eigenschaften. Ein besonders herausragendes Potential zeigt der CaSa-Kompost, vor allem wegen der höchsten Werte bei P-Konzentration und Kalkungs-Potential. In Ergänzung zu den bestimmten theoretischen Potentialen, habe ich die praktische Wirkung der Substrate auf dem lokalen Boden, einem Andosol, in einem **Feldversuch** mit Intercropping-Design untersucht. Alle getesteten Substrate konnten das Pflanzenwachstum signifikant stimulieren und die Erträge steigern. Das gilt vor allem für Mais und Bohnen. Am Beispiel Mais konnten auf den unbehandelten Feldern der Kontroll-Variante Kornerträge von knapp über 1 Tonne je Hektar erzielt werden. Im Vergleich mit FAO-Daten und wissenschaftlichen Experimenten in Ostafrika ist dieses Ertragsniveau „typisch“ für die Region. Durch die Verwendung der Gärreste, konnte der Maiskornertrag mehr als verdoppelt werden; durch den Standard Komposts, fast verdreifacht; und durch den CaSa-Komposts sogar vervierfacht werden. Die beobachteten Wachstumseffekte basieren dabei auf einer verbesserten Verfügbarkeit der Nährstoffe, welche zum Einen durch einen direkten Anstieg des pH-Wertes, und zum anderen durch eine gesteigerte Düngung mit P bei gleicher N-Düngung erreicht wurde. Eine Bodenverbesserung, also eine positive Veränderung der untersuchten physico-chemischen Bodenparameter nach dem Versuch, konnte ich nur im Falle des CaSa-Komposts und nur für die Parameter pH-Wert und P-Konzentration im Boden feststellen. Hinsichtlich der Wasser-Verfügbarkeit, der Kationen-Austausch-Kapazität oder der Kohlenstoff-Konzentrationen im Boden konnte ich in diesem Kurzzeit-Versuch keine Veränderungen beobachten.

Bei der folgenden Arbeit der **Stoffstrom-Modellierung** habe ich Technologie zum Kochen und als Sanitäransatz auf Haushalts-Ebene betrachtet. Lokal verfügbare Alternativen zur herkömmlichen Nutzung des Drei-Stein-Feuers stellen (i) der Mikrovergaser, (ii) ein System aus Kleinst-Biogasanlage und Biogaskocher, und (iii) der Holzkohle-Kocher dar. Betrachtete Alternativen zur Latrinen-Toilette sind (i) die TTT als Komposttoilette, (ii) die TTT in Kombination mit dem Hygienisierungs-Lehmofen, sowie (iii) die Kombination aus Wassertoilette und septischem Tank. Als funktionale Einheiten habe ich die Versorgung mit Energie zum zweimaligen Kochen pro Tag bzw. die Entsorgung oder Verwertung der anfallenden Fäkalien für einen Haushalt mit 6 Personen und für den Zeitraum eines Jahres definiert. Bei den analysierten Stoffflüssen habe ich mich auf (i) den Ressourcenverbrauch als Input-Strom sowie (ii) anfallende Reststoffe und (iii) Emissionen als Output-Flüsse konzentriert. Letztere habe ich bewertet hinsichtlich des potentiellen Beitrags zu Erderwärmung und zur Eutrophierung. Beispielsweise ergibt meine Analyse für den Mikrovergaser durchweg positive Ergebnisse. Wird mit ihm gekocht, können der Ressourcenverbrauch und die Emissionen gesenkt werden, während mehr Reststoffe bereitgestellt werden; konkret ca. 300 kg Biochar pro Jahr. Bei einem Wechsel zu einem Biogas-System, steigen der Ressourcen-Bedarf und das Rückführungs-Potential für Gärreste stark an. Letztlich sind die um das ca. dreifach erhöhten Umwelt-Emissionen eine identifizierte Schwachstelle des Biogassystems. Bei den Sanitär-Systemen ergibt meine

Analyse dass die TTT weitgehend positiv bewertet werden kann, besonders wegen der möglichen Rückgewinnung von Nährstoffe und der deutlich gesenkten Umweltemissionen. Der ermittelte jährliche Ressourcenbedarf an Brennstoff für die Pasteurisierung entspricht in etwa 10% der Feuerholz-Menge, die aktuell zum Kochen per 3Stein-Feuer verwendet wird. Der Bedarf an Spülwasser im septischen System kann, je nach Kapazität der vorhandenen Regenwassertanks, den kompletten Jahresvorrat der Haushalte an Betriebswasser ausmachen. Die ermittelten Reststoff-Potentiale können nun zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit in einem Mischanbau-System auf dem Acker genutzt werden. Meine Ergebnisse zeigen, wie andere Studien aus der Region auch, dass die Böden zur Zeit kontinuierlich ausgelaugt werden, da die jährlichen Bodennährstoff-Bilanzen sowohl für N, als auch für P, negativ sind. Die Verwendung von Gärresten, CaSa-Kompost, Urin, und Standard Kompost macht es nun möglich, die negativen Ergebnisse für P zu einer positiven Bilanz umzudrehen und die jährliche Auslaugung der Boden mit N zu reduzieren. Außerdem habe ich errechnet, dass es möglich sein sollte, jährlich ca. 2,5 bis 3 Kubikmeter CaSa-Kompost herzustellen. Fäkalien und Biokohle tragen gemeinsam ca. die Hälfte der darin enthaltenen Haupt-Nährelemente und des Kohlenstoffs bei.

Für den abschließenden Aufbau eines Tools für die **Nachhaltigkeits-Bewertung** habe ich Kriterien gewählt, die es möglich machen die vielfachen Perspektiven von Nachhaltigkeit systematisch zu beachten und somit Nachhaltigkeit zu operationalisieren. Auf der ersten Ebene, spannen insg. 6 Dimensionen den „Stern der Nachhaltigkeit“ auf. Diese Hauptkriterien beachten neben der Zuverlässigkeit (technologisch) und der Bezahlbarkeit (ökonomisch), auch 4 Dimensionen der Akzeptanz (ökologisch, sozial, gesundheitlich, politisch-rechtlich). Auf der zweiten Ebene, habe ich dann über 80 Unterkriterien ausgewählt, mit denen die Alternativen mit einander verglichen werden. An einem ersten Testlauf des entwickelten Werkzeugs haben insg. 10 Personen teilgenommen, die die unterschiedlichen Partner der Fallstudien repräsentierten. Die Ergebnisse zeigen, dass alle entwickelten Technologien als „annehmbare“ oder „vertretbar“ bewertet werden, d.h. dass ihre Performance als „gewöhnlich gut“ eingestuft wurde. Die Bewertung hat außerdem gezeigt, dass weitere Verbesserungen notwendig sind, bevor die Technologien als „nachhaltig“ bezeichnet werden können. Konkreten Verbesserungs-Bedarf konnte ich vor allem für den Betrieb sowie die Finanzierbarkeit der Technologien feststellen. Letztlich hat die Methode transparent gemacht, dass die Bewertungen der Teilnehmenden zum Teil sichtlich voneinander abweichen. Z. B. bewerteten die tansanischen Teilnehmenden die Technologien meist unter-, die deutschen Teilnehmenden eher über-durchschnittlich.

Als Synthese meiner Arbeit kann ich zum Einen zeigen, dass die untersuchten Technologien geeignet sind um gleichzeitig die Energie-und Sanitärversorgung in den Haushalten zu verbessern und die Produktivität auf den Feldern zu steigern. Besonders die Kombination aus Mikrovergaser zum Kochen und dem CaSa-Ansatz als Sanitärversorgung -gekoppelt mit der konsequenten Realisierung der identifizierten Reststoff-Potentiale -ist ein vielversprechender Ansatz um gleichzeitig mehrere Ziele zu erreichen, nämlich: (i) den Ressourcenverbrauch zu verringern, (ii) negative Umweltwirkungen zu reduzieren, (iii) den Zugang zu Dünger durch Eigenproduktion zu erhöhen, (iv) die ausgelaugten und versauerten Böden zu sanieren und (v) letztlich positiv zu Ernährungssouveränität und Einkommensgrundlage der lokalen Kleinbäuer\*innen beizutragen. Zum Anderen, ist die angewandte Methode, als Kombination aus (i) explorativer Datenerhebung, (ii) rechenmodell-gestützter System Analyse, (iii) Zusammenarbeit von Forscher\*innen und Praktiker\*innen, und (iv) der Begleitung von Pilotprojekten ziel führend gewesen, um die in Karagwe entwickelten Technologien mehrperspektivisch zu bewerten.