

Aus der Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft  
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

Thesen der Dissertation

**Vergleichende Untersuchungen und Bilanzierungen  
von Prozessketten zur Herstellung und Nutzung von Biokohlen  
aus Klärschlämmen**

zur Erlangung des Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Rostock

vorgelegt von M. Sc. Fabian Gievers  
aus Vellmar

Verteidigung am 12. Mai 2023



1. *Die Einbindung thermochemischer Verfahren wie der hydrothermalen Carbonisierung (HTC) oder der Pyrolyse bei der Klärschlammbehandlung auf Kläranlagen ermöglichen Synergien innerhalb der auftretenden Energie- und Stoffströme und haben positive Auswirkungen auf die Emissionscharakteristik der Klärschlammverwertung.*

Die ökobilanzielle Bewertung sowie die Analyse der auftretenden Energie- und Massenflüsse der HTC ergaben, dass die HTC im Vergleich zur Klärschlamm-trocknung energetische Vorteile bietet und dadurch positive Auswirkungen auf die Emissionscharakteristik entstehen. Durch Wegfall des energieaufwändigen Verdampfungsprozesses des Wassers bei gleichzeitigem Erreichen hoher Trockensubstanzgehalte in den Biokohlen von 60 % und mehr können Wärmeenergie und elektrische Energie innerhalb der Prozesskette eingespart und dadurch die Emissionen aus der Energiebereitstellung minimiert werden. Des Weiteren wurde ermittelt, dass die Trocknung des Klärschlammes anteilig mithilfe der bei der Pyrolyse entstehenden Pyrolyseöle und Pyrolysegase erfolgen kann, was ebenfalls zu einer Emissionsreduktion des Gesamtprozesses führt. Durch die Einbindung des an der Kläranlage anfallenden Biogases zur Wärmebereitstellung können weitere Emissionsminderungspotenziale ausgeschöpft werden.

2. *Der stoffliche Einsatz der Biokohle ermöglicht ein direktes Nährstoffrecycling, eine stabile Kohlenstoffsенke und den Ersatz fossiler Ressourcen ohne dabei signifikant negative Umweltauswirkungen zu verursachen.*

Der direkte, stoffliche Einsatz der Biokohle aus der HTC in der Landwirtschaft oder im Gartenbau zeigt aufgrund der potenziell enthaltenen, organischen Schadstoffe ein erhöhtes Toxizitätspotenzial. Im Hinblick auf weitere Schadstoffe wie beispielsweise Schwermetalle ergaben die modellierten Gehalte für beide thermochemischen Verfahren keine maßgebliche Erhöhung des Toxizitätspotenzials. Allerdings könnte bei einigen Klärschlämmen aufgrund der hohen Varianz der Klärschlamm-eigenschaften ein erhöhtes Toxizitätspotenzial auftreten, sodass für den stofflichen Einsatz der Biokohlen aus der HTC der organische Schadstoffgehalt vorbelasteter Klärschlämme kritisch geprüft werden sollte. Hinsichtlich einer stabilen Kohlenstoffsенke kann nur für die Biokohle aus der Pyrolyse eine längerfristige Speicherung von Kohlenstoff attestiert werden. Durch die angestrebte Defossilierung der Energiesysteme könnten zukünftig Biokohlen aus der Klärschlamm-pyrolyse für einen aktiven Kohlenstoffzug aus der Atmosphäre genutzt werden. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass ein direktes Nährstoffrecycling mithilfe der Biokohlen beider thermochemischer Konversionsverfahren möglich ist und vor allem mineralische Phosphatdünger substituiert werden können.

- 3. Die energetische Nutzung der entstehenden Biokohlen bietet ökologische Vorteile gegenüber der fossilen Energiebereitstellung.*

Im Vergleich zur stofflichen Nutzung der Biokohlen ergab die Auswertung der Ökobilanz im Hinblick auf eine energetische Verwertung der anfallenden Biokohlen sowohl für die HTC als auch für die Pyrolyse ökologische Vorteile in nahezu allen Umweltwirkungskategorien. Die Substitution fossiler Rohstoffe erzielte in der Bilanzierung der Prozessketten ein maßgebliches Emissionsminderungspotenzial, das zu einem großen Anteil aus Gutschriften für vermiedene Emissionen aus fossilen Bereitstellungspfaden innerhalb der Prozessketten besteht.

- 4. Die Monoverbrennung von Klärschlamm ist aus ökobilanzieller Sicht nicht die einzige zu priorisierende Behandlungsmethode.*

Der Vergleich der Monoverbrennung des Klärschlammes mit den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten alternativen Verfahren ergab für beide thermochemischen Verfahren geringere Emissionspotenziale in nahezu allen Wirkungskategorien. Die verringerten Umweltwirkungen der HTC liegen zu einem großen Teil in der höheren Energieeffizienz des Prozesses begründet, die durch die Einsparung des Trocknungsprozesses erreicht wird. Beim Einsatz der Pyrolyse entstehen verbesserte Emissionsprofile hauptsächlich durch Synergieeffekte bei den Stoff- und Energieströmen innerhalb der modellierten Prozesskette. Unter Einbezug der Anwendungen der entstehenden Biokohlen zeigten die ökobilanziellen Bewertungen, dass die HTC-Prozessketten tendenziell geringere Emissionen aufweisen als die Prozessketten mit Pyrolyse. Allerdings ergab die Auswertung des Eutrophierungspotenzials sowie des Humantoxizitätspotenzials (krebserregend) bei den stofflichen Anwendungsszenarien der Biokohlen aus der HTC höhere negative Auswirkungen als die Monoverbrennung oder Pyrolyse des Klärschlammes. Einerseits bedingt die beabsichtigte Phosphorgabe auf agrarisch genutzten Böden durch die Biokohle eine Erhöhung des Eutrophierungspotenzials. Andererseits konnte ein negativer Einfluss der HTC hinsichtlich der Stoffströme von organischen Schadstoffen wie PCDD/F auf das Toxizitätspotenzial herausgearbeitet werden. In Bezug auf die energetischen Anwendungsszenarien der Biokohle führten die erzielten Gutschriften aus der Substitution fossiler Rohstoffe für beide thermochemischen Verfahren zu niedrigeren Emissionspotenzialen in nahezu allen Umweltwirkungskategorien. Mithilfe der durchgeführten Ökobilanz wurde ermittelt, dass bei einer angepassten Verwertungsstrategie sowohl die Pyrolyse als auch die HTC ökologische Vorteile gegenüber der Monoverbrennung des anfallenden Klärschlammes bieten können.