

From the Professorship of Waste and Resource Management
Faculty of Agriculture, Civil and Environmental Engineering

Summary of the cumulative dissertation

**Developing an economically viable business case for the development of
hybrid waste to energy projects in Ghana**

to obtain the academic degree Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)

at the Faculty of Agriculture, Civil and Environmental Engineering
of the University of Rostock

submitted by M. Sc. Ekua Afrakoma Armoo

Defence on December 12, 2025

Developing countries such as Ghana require sustainable solutions to the numerous waste management challenges. Waste to energy (WtE) is a potential technological solution within the framework of a circular economy. Ghana has a current population of over 33 million. There is only one commercial large-scale WtE plant which produces mainly energy and compost. Further investment is required to implement sustainable WtE models. However, decision making for such an investment requires detailed business cases. The current study therefore aims to develop a business case to promote the implementation of a hybrid WtE (HWtE) model. The proposed model incorporates Solar PV, Anaerobic Digestion and Pyrolysis technologies. A hybrid WtE plant located in Ghana is used as a case study to evaluate the current potential and to design strategies for future replication.

This dissertation is structured as a cumulative of five publications in book chapters and peer review journals. The study begins with a bibliometric study of the trends of WtE development in Africa. It provides an overview of the subject area using 378 publications from the SCOPUS database. The recent themes, nature of publications and countries are presented. The results show that most publications are reviews in nature, and they involve theoretical or proposed systems rather than primary data or case studies. The trend also shows a growing interest in circular and sustainable development themes. This is published in a book chapter and presented as PAPER 1.

The Objectives I and II are linked to the case study plant. A detailed technoeconomic assessment (TEA) was carried out involving three parameters and eight scenarios. The parameters are: project financing, products and city-scale models. Each of these parameters have been thoroughly examined in three publications. Eight products have been examined according to two broad categories: Energy (electricity) and Alternative Fuels and Materials (AF&M). The RETSCREEN software version 9.1.0.9 and MS EXCEL were used for the TEA. In addition to onsite data, a market assessment was carried out to assess the market value, potential competitors and offtakers for the identified products. The outcomes indicate that the scale of the pilot plant is too small to reach economic feasibility for an energy generation plant. A financing model incorporating grants and subsidies improves feasibility. The capital cost and energy exported to grid are the major influencing factors. Source segregated waste reduces both the capital and operational costs and enhances feasibility. For the products model, a combination of both AF&M and energy is the most feasible scenario as compared to AF&M only or energy only scenarios. For the large city scale model, all scenarios are feasible. This confirms the relevance of scale in achieving feasibility. These have been published in a book chapter (PAPER II) and two journal articles (PAPER III and PAPER IV).

The environmental impact assessment is important for such projects because it enhances onsite processes and access to project financing. An environmental assessment is carried out comparing the onsite WtE processes and conventional landfilling. The modelling was carried out using the OpenLCA software (version 3.03) together with the Ecoinvent Database. The outcome indicates that the pyrolysis and RDF have the lowest potential environmental impact as compared to anaerobic digestion and segregation. As compared to

the landfilling, carbon savings of 3.5tCO₂eq/ ton of waste treated can be achieved through WtE. This has been published in PAPER V.

Objectives III and IV focus on the future replication and are presented in PAPER IV and Chapters 4 and 5 of this dissertation. Chapter 4 synthesizes the outcomes of the TEA into three business models (Scenarios): (1) on-grid prosumer, (2) on-grid supplier and (3) off-grid prosumer. Feasibility follows the order: on-grid prosumer> off-grid prosumer> on-grid supplier. In chapter 5, a multicriteria decision-making analysis (MCDA) methodology is used to select geographical hotspots for siting HWtE projects in Ghana. The case study plant is sited in a rural area. PAPER IV examines the replication of the HWtE model in an urban area while simultaneously assessing the parameter of economies of scale. The results indicate that districts in the Greater Accra Region, Kumasi Metropolis and Sekondi-Takoradi Metropolis have the highest potential for siting a future plant. The impact of urbanization and the concentration of manufacturing industries in these same locations make them an attractive location for the marketing of AF&M products.

Within the context of a circular economy, an integrated concept is presented. The concept integrates recycling, energy and plant nutrient recovery with the integration of solar PV, alternative fuels and emissions reductions. The HWtE model is a viable solution for Ghana's waste management solutions. It is however recommended that project developers and decision makers for future projects carefully consider the quality of the sourced waste, financing model, products model and adequate scale. Also, policies on source segregation and subsidies have a potential impact on feasibility and attracting investments.

Keywords: waste to energy, alternative fuels, Solar PV, anaerobic digestion, pyrolysis, business case, MCDA, technoeconomic feasibility, circular economy, Ghana

Entwicklungsländer wie Ghana stehen vor erheblichen Herausforderungen in der Abfallwirtschaft, für die nachhaltige Lösungsansätze dringend erforderlich sind. Die energetische Verwertung von Abfällen (Abfall-zu-Energie, WtE) stellt eine vielversprechende technologische Option im Kontext einer Kreislaufwirtschaft dar. Bei einer Bevölkerung von über 33 Millionen Einwohnern verfügt Ghana derzeit lediglich über eine kommerzielle Großanlage zur energetischen Abfallverwertung, die vorwiegend Energie und Kompost produziert. Die Implementierung nachhaltiger WtE-Modelle erfordert jedoch substanzielle Investitionen, deren Realisierung auf fundierten Business Cases basieren muss.

Die vorliegende Studie zielt darauf ab, einen solchen Business Case zu entwickeln, um die Umsetzung eines hybriden WtE-Modells (Hybrid Waste to Energy, HWtE) zu fördern. Das vorgeschlagene Modell integriert Solar-Photovoltaik-, anaerobe Vergärungs- und Pyrolysetechnologien. Eine hybride WtE-Anlage in Ghana dient dabei als Fallstudie zur Bewertung des aktuellen Potenzials sowie zur Entwicklung von Strategien für eine zukünftige Replikation.

Die Dissertation umfasst fünf Veröffentlichungen in Form von Buchkapiteln und peer-reviewten Fachzeitschriftenartikeln. Die Untersuchung beginnt mit einer bibliometrischen Analyse der Entwicklungstrends von WtE in Afrika, die einen systematischen Überblick über das Themengebiet anhand von 378 Publikationen aus der SCOPUS-Datenbank bietet. Dabei werden aktuelle Forschungsschwerpunkte, Publikationsarten und geografische Verteilungen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei den meisten Veröffentlichungen um Übersichtsarbeiten handelt, die sich vorwiegend mit theoretischen oder konzeptionellen Systemen befassen, während Primärdaten und Fallstudien unterrepräsentiert sind. Der erkennbare Trend deutet auf ein wachsendes wissenschaftliches Interesse an Themen der Kreislaufwirtschaft und nachhaltigen Entwicklung hin. Diese Analyse wurde als Buchkapitel publiziert und bildet ARTIKEL I der Dissertation.

Die Zielsetzungen I und II fokussieren auf die Fallstudienanlage und umfassen eine detaillierte technoökonomische Bewertung (TEA) unter Berücksichtigung von drei Parametern und acht Szenarien. Die untersuchten Parameter sind Projektfinanzierung, Produktportfolio und stadtweite Skalierungsmodelle, die in drei separaten Veröffentlichungen eingehend analysiert wurden. Acht Produkte wurden anhand zweier Hauptkategorien untersucht: Energie (Strom) sowie alternative Kraftstoffe und Materialien (AF&M). Für die TEA kamen die Software RETSCREEN Version 9.1.0.9 und MS EXCEL zum Einsatz. Ergänzend zu den vor Ort erhobenen Daten wurde eine Marktbewertung durchgeführt, um Marktwert, potenzielle Wettbewerber und Abnehmer für die identifizierten Produkte zu evaluieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Pilotanlage zu klein dimensioniert ist, um ausschließlich durch Einnahmen aus der Energieerzeugung wirtschaftlich rentabel zu operieren. Ein Finanzierungsmodell, das Zuschüsse und Subventionen integriert, verbessert die Rentabilität signifikant. Als zentrale Einflussfaktoren wurden die Kapitalkosten und die ins Netz eingespeiste Energiemenge identifiziert. Durch die Implementierung einer Trennung an der Quelle kann eine aufwendige Vortrennung vor Ort vermieden werden, wodurch sowohl

Kapital- als auch Betriebskosten reduziert und die wirtschaftliche Machbarkeit erhöht wird. Bezüglich des Produktmodells erweist sich eine Kombination aus AF&M und Energie als das wirtschaftlich tragfähigste Szenario im Vergleich zu Szenarien, die ausschließlich AF&M oder nur Energie umfassen. Für das Modell im Maßstab einer Großstadt zeigen alle Szenarien wirtschaftliche Realisierbarkeit, was die fundamentale Bedeutung der Skalierung für die Erreichung von Wirtschaftlichkeit bestätigt. Diese Erkenntnisse wurden in einem Buchkapitel (ARTIKEL II) sowie zwei Zeitschriftenartikeln (ARTIKEL III und IV) publiziert.

Die Umweltverträglichkeitsprüfung ist für derartige Projekte von essentieller Bedeutung, da sie die Prozesse vor Ort optimiert und den Zugang zu Projektfinanzierungen erleichtert. Die Umweltbewertung erfolgte durch einen Vergleich der WtE-Prozesse vor Ort mit der konventionellen Deponierung. Die Modellierung wurde mittels der Software OpenLCA (Version 3.03) in Verbindung mit der Ecoinvent-Datenbank durchgeführt. Die Ergebnisse belegen, dass Pyrolyse und RDF (Refuse Derived Fuel) im Vergleich zu anaerober Vergärung und Abfalltrennung die geringsten potenziellen Umweltauswirkungen aufweisen. Im Vergleich zur konventionellen Deponierung können durch WtE-Technologien CO₂-Einsparungen von 3,5 t CO₂eq pro Tonne behandelten Abfalls erzielt werden. Diese Erkenntnisse wurden in ARTIKEL V veröffentlicht.

Die Zielsetzungen III und IV konzentrieren sich auf die zukünftige Replikation des Modells und werden in Artikel IV sowie in den Kapiteln 4 und 5 der Dissertation präsentiert. Kapitel 4 synthetisiert die Ergebnisse der TEA in drei Geschäftsmodelle (Szenarien): erstens netzgebundener Prosumer, zweitens netzgebundener Versorger und drittens netzunabhängiger Prosumer. Die wirtschaftliche Machbarkeit folgt der Rangfolge: netzgebundener Prosumer, gefolgt von netzunabhängigem Prosumer und netzgebundenem Versorger. In Kapitel 5 wird eine multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA) angewendet, um geografische Hotspots für die Ansiedlung zukünftiger HWtE-Projekte in Ghana zu identifizieren. Während sich die Fallstudienanlage in einer ländlichen Region befindet, untersucht Artikel IV die Replikation des HWtE-Modells in urbanen Gebieten unter gleichzeitiger Bewertung des Parameters der Skaleneffekte. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bezirke in der Region Greater Accra, die Kumasi Metropolis sowie die Sekondi-Takoradi Metropolis das höchste Potenzial für die Ansiedlung zukünftiger Anlagen aufweisen. Die Auswirkungen der Urbanisierung und die Konzentration der verarbeitenden Industrie an denselben Standorten machen diese zu besonders attraktiven Absatzmärkten für AF&M-Produkte.

Im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft wird ein integriertes Gesamtkonzept vorgestellt, das Recycling, Energiegewinnung, Materialrückgewinnung und die Rückführung von Pflanzennährstoffen durch die Integration von Solar-Photovoltaik, alternativen Kraftstoffen und Emissionsreduktionen miteinander verbindet. Das HWtE-Modell stellt eine praktikable Lösung für die Abfallwirtschaft in Ghana dar. Projektentwicklern und Entscheidungsträgern für zukünftige Projekte wird empfohlen, die Qualität der zu beschaffenden Abfälle, das Finanzierungsmodell, das Produktportfolio sowie den angemessenen Projektumfang sorgfältig zu evaluieren. Darüber hinaus können politische Maßnahmen zur Förderung der

Mülltrennung an der Quelle sowie Subventionsprogramme die wirtschaftliche Machbarkeit und die Attraktivität für potenzielle Investoren maßgeblich beeinflussen.

Schlüsselwörter: Energiegewinnung aus Abfall, alternative Kraftstoffe, Solar-PV, anaerobe Vergärung, Pyrolyse, business case, multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA), technoökonomische Bewertung, Kreislaufwirtschaft, Ghana