

Professorship for Waste and Resource Management
Faculty for Agriculture, Civil and Environmental Engineering

Summary of the cumulative dissertation

Integrating the Food Waste–Energy–Ecosystem Nexus for a Sustainable Circular Economy Transition in Tunisia

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

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

submitted by

Dr. Nour El Houda Chaher

born on September 25, 1992,

in Tunis, Tunisia.

Defence on 24 April 2026

Tunisia is confronted with significant sustainable development challenges characterized by the interplay of food insecurity, water scarcity, energy dependence, and ecosystem degradation. In light of these complexities, a pioneering integrated framework is proposed, positioning food waste (FW) as a critical resource within a holistic Food-Food Waste-Water-Energy-Ecosystem (FWE)² nexus. This innovative paradigm is designed to transcend conventional sector-specific methodologies, emphasizing the intricate interactions among food systems, FW management, water utilization, renewable energy generation, and ecosystem services, all encapsulated within the circular economy (CE) framework.

A multifaceted methodological approach is adopted in this research, qualitative and quantitative analyses to address the sustainable waste management challenges endemic to Tunisia. A comprehensive background data collection process, augmented by an extensive literature review, is conducted, elucidating significant knowledge gaps and highlighting the limitations inherent in traditional management approaches. This foundational work informs a novel research design anchored in three interconnected objectives.

The first objective involves the evaluation of the effectiveness of the Food-Food Waste-Ecosystem Nexus through windrow composting, utilizing two distinct feedstock combinations: one composed of uncooked food waste paired with green waste, and the other comprising cooked food waste along with green waste. Throughout a rigorous 13-week experimental period, the impacts of varying organic waste streams on compost maturity and quality are meticulously assessed. Comprehensive physical, chemical, and microbiological analyses yield remarkable outcomes, including significant reductions in carbon to nitrogen (C:N) ratios, with final values of 15.74 and 13.54 compared to initial ratios of 31.33 and 21.47. The resultant composts are found to conform to Class V maturity as per German standards, exhibiting a nitrification index approaching unity and respiration activity (AT₄) significantly below 6 mg O₂/g TS. Heavy metal concentrations are consistently found to fall within permissible limits as defined by both Tunisian and German regulations. These findings affirm the feasibility of generating high-quality, pathogen-free compost through optimized windrow composting, thereby presenting a viable and sustainable waste management solution for Tunisia.

Building upon this foundational investigation, the research transitions to the evaluation of the Food-Food Waste-Energy-Ecosystem Nexus through the exploration of Anaerobic Co-Digestion (ACoD) for renewable energy generation. Semi-continuous ACoD experiments are conducted, utilizing FW, wheat straw (WS), and cattle manure (CM) as feedstocks, while systematically varying organic loading rates (OLRs) from 2.0 to 3.6 kg VS/m³.d to optimize biogas and digestate production. The optimal feedstock ratio for biogas production is identified as 75:25 for FW to CM, resulting in a 62% enhancement in specific biogas yield compared to mono-digestion of FW at an OLR of 2.4 kg VS/m³.d. Process stability, evaluated through volatile fatty acid to total alkalinity (VFA:TAC) ratios, is maintained at optimal levels (below 0.3)

for OLRs up to 2.8 kg VS/m³.d across all mixtures; however, instability is noted at elevated loading rates for the FW₇₅WS₂₅ combination. The resultant digestate undergoes extensive characterization, revealing its potential utility as a soil amendment and biofertilizer.

The final research objective integrates insights derived from preceding analyses within a circular economy perspective, providing a comprehensive evaluation of the (FWE)² nexus. The intricate interrelationships among FW management, energy production, water utilization, and ecosystem services are modeled. The viability of utilizing digestate as an unconventional moisturizing agent for an in-vessel composting process treating food and agricultural waste is investigated, demonstrating its capacity for substantial water conservation while enhancing performance across critical monitoring parameters and overall product quality.

In the concluding chapter, a detailed techno-economic analysis is conducted to assess the scalability and cost-effectiveness of both composting and anaerobic digestion strategies. A composting facility with an annual processing capacity of 10,000 tons is envisaged, with capital expenditures estimated at approximately €2 million and annual operational costs projected to be €285,400. Assuming a selling price of €30/ton for compost and a 30% investment grant, the project is anticipated to achieve a two-year financial amortization period. For the anaerobic digestion model, a biogas facility processing 30,000 tons/year is established, evaluating both capital and operational expenditures along with valorization strategies for digestate—either as a soil amendment/biofertilizer priced at €20/ton or as a composting agent—and potential revenue streams from electricity generation across varying market prices (€0.08–€0.18/kWh). These techno-economic insights elucidate the potential for financially viable and environmentally beneficial waste management solutions in Tunisia, reinforcing the necessity for strategic policy interventions to facilitate their implementation.

In summary, a robust theoretical and practical foundation is laid through this research for redefining FW as a strategic resource critical to Tunisia's sustainable development. Measurable improvements in resource efficiency, ecological integrity, and economic viability are demonstrated through optimized composting and Anaerobic Co-Digestion (ACoD), revealing the transformative potential embedded within an integrated framework. The analysis not only illuminates the economic and environmental implications of sustainable waste management practices but also equips policymakers with essential insights and recommendations aimed at promoting renewable energy, ensuring water security, advancing sustainable agriculture, and safeguarding ecosystem health.

The integrated (FWE)² nexus approach delineated in this research charts a promising pathway toward a more sustainable and equitable future for Tunisia. By effectively addressing the multifaceted challenges of resource interdependencies within a circular economy framework, new economic

opportunities can be unlocked while fostering resilience within Tunisia's ecosystem. In conclusion, the findings disseminated throughout this research underscore the critical role that integrated approaches, such as the (FWE)² nexus, play in shaping a sustainable future. By embracing the potential of food waste and fostering innovative practices in waste management, Tunisia can enhance its resource management capabilities and cultivate a resilient ecosystem that supports both its population and the environment. Through collaborative efforts and strategic policy frameworks, the nation can navigate the complexities of sustainable development, ensuring a balanced coexistence of ecological integrity and economic vitality.

Tunesien sieht sich erheblichen Herausforderungen der nachhaltigen Entwicklung gegenüber, die durch das Zusammenwirken von Lebensmittelsicherheit, Wasserknappheit, Energieabhängigkeit und Ökosystemdegradation geprägt sind. Vor dem Hintergrund dieser Komplexitäten wird ein neuartiger integrierter Rahmen vorgeschlagen, der Lebensmittelabfälle (FW) als kritische Ressource innerhalb eines ganzheitlichen Food-Food Waste-Water-Energy-Ecosystem (FWE)² Nexus positioniert. Dieses innovative Paradigma ist darauf ausgerichtet, die konventionellen sektoralen Methodologien zu transzendieren und die komplexen Wechselwirkungen zwischen Lebensmittelsystemen, FW-Management, Wasserverwendung, erneuerbarer Energieerzeugung und Ökosystemdienstleistungen im Rahmen einer(zirkularen) Wirtschaft (CE) zu betonen.

In dieser Forschung wird ein vielseitiger methodologischer Ansatz gewählt, der qualitative und quantitative Analysen kombiniert, um die Herausforderungen des nachhaltigen Abfallmanagements, die in Tunesien vorherrschen, anzugehen. Ein umfassender Prozess zur Datenerhebung im Hintergrund, der durch eine ausführliche Literaturübersicht ergänzt wird, wird durchgeführt, um signifikante Wissenslücken zu beleuchten und die Beschränkungen der herkömmlichen Managementansätze herauszustellen. Diese grundlegende Arbeit informiert über ein neuartiges Forschungsdesign, das auf drei miteinander verbundenen Zielen basiert.

Das erste Ziel beinhaltet die Bewertung der Wirksamkeit des Food-Food Waste-Ecosystem Nexus durch Windrow-Kompostierung, wobei zwei verschiedene Rohstoffkombinationen verwendet werden: eine aus ungekochten Lebensmittelabfällen und Grünabfällen und die andere aus gekochten Lebensmittelabfällen zusammen mit Grünabfällen. Während eines rigorosen 13-wöchigen Experimentierzeitraums werden die Auswirkungen der verschiedenen organischen Abfallströme auf die Reife und Qualität des Komposts sorgfältig untersucht. Umfassende physikalische, chemische und mikrobiologische Analysen ergeben bemerkenswerte Ergebnisse, darunter erhebliche Reduzierungen der Kohlenstoff-zu-Stickstoff (C:N) Verhältnisse, mit finalen Werten von 15,74 und 13,54 im Vergleich zu den anfänglichen Verhältnissen von 31,33 und 21,47. Die resultierenden Komposte werden gefunden, um der Klassenreife V gemäß deutschem Standard zu entsprechen, wobei ein Nitrifikationsindex nahe der Einheit und eine Atemaktivität (AT4) signifikant unter 6 mg O₂/g TS liegen. Die Konzentrationen schwerer Metalle werden durchgehend innerhalb der von tunesischen und deutschen Vorschriften festgelegten Grenzwerte nachgewiesen. Diese Ergebnisse bestätigen die Möglichkeit, qualitativ hochwertigen, pathogenfreien Kompost durch optimierte Windrow-Kompostierung zu erzeugen, und präsentieren dadurch eine tragfähige und nachhaltige Lösung für das Abfallmanagement in Tunesien.

Aufbauend auf dieser grundlegenden Untersuchung wird die Forschung auf die Evaluation des Food-Food Waste-Energy-Ecosystem Nexus ausgeweitet, indem das Potenzial der anaeroben Ko-vergärung (ACoD) zur erneuerbaren Energieerzeugung untersucht wird. Es werden semi-kontinuierliche

ACoD-Experimente durchgeführt, bei denen FW, Weizenstroh (WS) und Rindermist (CM) als Rohstoffe verwendet und organische Beladungsraten (OLRs) von 2,0 bis 3,6 kg VS/m³.d systematisch variiert werden, um die Biogas- und Digestatproduktion zu optimieren. Das optimale Rohstoffverhältnis für die Biogasproduktion wird als 75:25 für FW zu CM identifiziert, was zu einer Verbesserung der spezifischen Biogasernte um 62% im Vergleich zur Mono-Vergärung von FW bei einer OLR von 2,4 kg VS/m³.d führt. Die Prozessstabilität, bewertet anhand der Verhältnisse von flüchtigen Fettsäuren zu Gesamtalkalinität (VFA:TAC), wird für OLRs bis 2,8 kg VS/m³.d für alle Mischungen als optimal (unter 0,3) aufrechterhalten; Instabilität wird jedoch bei erhöhten Beladungsraten für die Kombination FW₇₅WS₂₅ festgestellt. Das resultierende Digestat wird umfassend charakterisiert und offenbart sein Potenzial als Bodenverbesserungsmittel und Bio-Dünger.

Das letzte Forschungsziel integriert Erkenntnisse aus den vorangegangenen Analysen im Kontext einer zirkulären Wirtschaft und bietet eine umfassende Bewertung des (FWE)² Nexus. Die komplexen Zusammenhänge zwischen FW-Management, Energieerzeugung, Wasserverwendung und Ökosystemdienstleistungen werden modelliert. Die Eignung des Digestats als unkonventionelles Befeuchtungsmittel für die anschließende aerobe Kompostierung wird untersucht und demonstriert seine Fähigkeit zur erheblichen Wassereinsparung, während die Leistung in Bezug auf wesentliche Überwachungsparameter und die Gesamtqualität des Endprodukts verbessert wird.

Im abschließenden Kapitel wird eine detaillierte techno-ökonomische Analyse durchgeführt, um die Skalierbarkeit und Kostenwirksamkeit sowohl der Kompostierungs- als auch der anaeroben Vergärungsstrategien zu bewerten. Eine Kompostieranlage mit einer jährlichen Verarbeitungskapazität von 10.000 Tonnen wird skizziert, wobei Kapitalkaufwendungen auf etwa 2 Millionen Euro geschätzt und die jährlichen Betriebskosten auf ca. 285.400 Euro projiziert werden. Bei einem angenommenen Verkaufspreis von 30 Euro pro Tonne Kompost und einer Investitionsförderung von 30% wird erwartet, dass das Projekt eine Rückzahlungsdauer von zwei Jahren erreicht. Für das anaerobe Vergärungsmodell wird eine Biogasanlage mit einer Verarbeitungskapazität von 30.000 Tonnen/Jahr eingerichtet, wobei sowohl die Kapital- als auch die Betriebskosten sowie die Valorierungsstrategien für das Digestat—entweder als Bodenverbesserungsmittel/Bio-Dünger zu einem Preis von 20 Euro pro Tonne oder als Kompostierungsagent—untersucht werden. Zudem wird das Potenzial von Einnahmen aus der Stromerzeugung bei unterschiedlichen Marktpreisen (0,08–0,18 Euro/kWh) bewertet. Diese techno-ökonomischen Erkenntnisse verdeutlichen das Potenzial finanziell tragfähiger und umweltfreundlicher Abfallmanagementlösungen in Tunesien und unterstreichen die Notwendigkeit strategischer politischer Interventionen zur Förderung ihrer Umsetzung.

Zusammenfassend wird durch diese Forschung eine robuste theoretische und praktische Basis geschaffen, um FW als strategische Ressource neu zu definieren, die für die nachhaltige Entwicklung

Tunesiens von zentraler Bedeutung ist. Anhand signifikanter Nachweise von Verbesserungen in der Ressourceneffizienz, ökologischen Integrität und wirtschaftlichen Tragfähigkeit durch optimierte Kompostierung und ACoD wird das transformative Potenzial eines integrierten Rahmens aufgezeigt. Die Analyse hebt nicht nur die wirtschaftlichen und ökologischen Implikationen nachhaltiger Abfallmanagementpraktiken hervor, sondern stellt den politischen Entscheidungsträgern auch wichtige Einblicke und spezifische Empfehlungen zur Verfügung, um erneuerbare Energien zu fördern, die Wasserversorgung zu sichern, nachhaltige Landwirtschaft voranzutreiben und die Gesundheit der Ökosysteme zu schützen. Abschließend präsentiert diese Forschung eine transformative Vision für die nachhaltige Entwicklung Tunesiens, die die Bedeutung vernetzter Lösungen betont, die FW als wertvolle Ressource nutzen. Während Tunesien voranschreitet, bietet der integrierte (FWE)² Nexus-Ansatz eine umfassende Roadmap, um den Übergang zu nachhaltigen Praktiken und Politiken zu erleichtern. Diese Strategien sind darauf ausgelegt, die dringenden Herausforderungen der Lebensmittelsicherheit, Wasserknappheit und Energieabhängigkeit anzugehen und gleichzeitig die ökologische Gesundheit zu fördern.