

Abstract

This thesis investigates the evolving landscape of low-emission energy systems through the lens of three distinct yet interrelated research areas: decentralized energy communities, European energy infrastructure modeling, and nuclear power economics. Each part contributes to understanding the challenges and trade-offs involved in transitioning towards a sustainable and secure energy future.

Part I explores the integration of decentralized renewable energy systems into national grids, focusing on the Global South. Using the case study of a solar swarm grid in Pirgacha, Bangladesh, the concept of *Community Power Purchase Agreements (CPPAs)* is introduced as a novel policy and regulatory tool. These agreements allow prosumers to collectively feed electricity into the grid, ensuring mutual benefits for prosumers, grid operators, and state utilities. The modeling approach, combining linear and mixed complementarity techniques, demonstrates that grid extension costs can be reduced while enhancing prosumer inclusion and energy access.

Part II addresses the complexities of planning and operating interconnected energy infrastructure in Europe. The first study evaluates *energy islands* in offshore wind regions, comparing the viability of electricity vs. hydrogen transmission. It finds that hydrogen electrolysis is cost-effective for remote islands, while cable connections are preferred for near-shore projects. The second study examines *flexible electrification* strategies—particularly demand-side flexibility in heating, transport, and industry. A capacity expansion model for Europe reveals that demand flexibility significantly reduces residual load, curbs excess generation, and minimizes reliance on thermal backup and storage, with electrolyzers playing a pivotal role.

Part III analyzes the economic and financial viability of nuclear energy, with a focus on contemporary and emerging technologies. The first paper outlines the *financing models for large-scale nuclear power plants* in Europe, highlighting that most projects are only feasible with substantial public risk guarantees. The second paper examines the *uncertainties in production cost estimates* for small modular reactors (SMRs), applying production theory and Monte Carlo simulations. Despite SMRs' conceptual advantages, none of the reviewed

projects achieve cost competitiveness with renewables, underscoring the importance of context-specific cost modeling and institutional factors.

Together, these studies contribute novel methodologies and policy insights to guide the design, integration, and financing of sustainable energy systems under varying technical, economic, and political constraints.

Keywords: decentralized energy systems; community power purchase agreements (CPPAs); energy system modeling; flexible electrification; energy infrastructure planning; hydrogen and offshore integration; small modular reactors (SMRs); nuclear power financing; renewable energy integration; sustainable energy transitions

Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die sich entwickelnde Landschaft der emissionsarmen Energiesysteme durch die Linse von drei verschiedenen, aber miteinander verbundenen Forschungsbereichen: dezentrale Energiegemeinschaften, europäische Energieinfrastrukturmodellierung und Kernkraftwirtschaft. Jeder Teil trägt zum Verständnis der Herausforderungen und Kompromisse beim Übergang zu einer nachhaltigen und sicheren Energiezukunft bei.

Teil I erforscht die Integration dezentraler erneuerbarer Energiesysteme in nationale Netze und konzentriert sich dabei auf den globalen Süden. Anhand der Fallstudie eines Solar-schwarmnetzes in Pirgacha, Bangladesch, wird das Konzept der *Community Power Purchase Agreements (CPPAs)* als neues politisches und regulatorisches Instrument vorgestellt. Diese Vereinbarungen ermöglichen Prosumern die kollektive Einspeisung von Strom in das Netz, wodurch ein gegenseitiger Nutzen für Prosumer, Netzbetreiber und staatliche Versorgungsunternehmen gewährleistet wird. Der Modellierungsansatz, der lineare und gemischte Komplementaritätstechniken kombiniert, zeigt, dass die Kosten für den Netzausbau gesenkt und gleichzeitig die Einbindung von Prosumern und der Energiezugang verbessert werden können.

Teil II befasst sich mit den komplexen Aspekten der Planung und des Betriebs miteinander verbundener Energieinfrastrukturen in Europa. Die erste Studie bewertet *Energieinseln* in Offshore-Windregionen und vergleicht die Rentabilität der Übertragung von Strom und Wasserstoff. Sie kommt zu dem Ergebnis, dass die Wasserstoff-Elektrolyse für abgelegene Inseln kosteneffizient ist, während Kabelverbindungen für küstennahe Projekte bevorzugt werden. Die zweite Studie untersucht Strategien für eine *flexible Elektrifizierung*, insbesondere die nachfrageseitige Flexibilität in den Bereichen Heizung, Verkehr und Industrie. Ein Modell zur Kapazitätserweiterung in Europa zeigt, dass die Nachfrageflexibilität die Residuallast erheblich reduziert, die Überschusserzeugung eindämmt und die Abhängigkeit von thermischer Reserve und Speicherung minimiert, wobei Elektrolyseure eine zentrale Rolle spielen.

Teil III analysiert die wirtschaftliche und finanzielle Tragfähigkeit der Kernenergie, wobei der Schwerpunkt auf aktuellen und neuen Technologien liegt. Das erste Papier umreißt

Finanzierungsmodelle für große Kernkraftwerke in Europa und hebt hervor, dass die meisten Projekte nur mit erheblichen öffentlichen Risikogarantien realisierbar sind. Der zweite Beitrag untersucht die *Unsicherheiten bei den Produktionskostenschätzungen* für kleine modulare Reaktoren (SMRs) unter Anwendung der Produktionstheorie und Monte-Carlo-Simulationen. Trotz der konzeptionellen Vorteile von SMRs erreicht keines der untersuchten Projekte die Kostenwettbewerbsfähigkeit mit erneuerbaren Energien, was die Bedeutung kontextspezifischer Kostenmodellierung und institutioneller Faktoren unterstreicht.

Zusammengenommen liefern diese Studien neuartige Methoden und politische Erkenntnisse für die Gestaltung, Integration und Finanzierung nachhaltiger Energiesysteme unter unterschiedlichen technischen, wirtschaftlichen und politischen Bedingungen.

Schlagwörter: dezentrale Energiesysteme; kommunale Stromabnahmeverträge (CPPAs); Modellierung von Energiesystemen; flexible Elektrifizierung; Planung von Energieinfrastrukturen; Wasserstoff- und Offshore-Integration; kleine modulare Reaktoren (SMRs); Finanzierung von Kernkraft; Integration erneuerbarer Energien; nachhaltige Energiewende