

# Abstract

Zero-carbon power systems of the future will be dominated by renewable energy sources. In this context, significant operational flexibility will be required to cope with the variability and uncertainty inherent to variable renewable energy sources. Therefore, flexibility options such as transmission grid enhancements, energy storage systems, and demand response resources are crucial for a cost-efficient and secure transition to a zero-carbon power system.

This thesis proposes a stochastic planning framework for designing a cost-efficient and secure transition to a zero-carbon power system. Firstly, an integrated generation, transmission, and short-term energy storage planning model is proposed. The model enables an accurate representation of both short-term flexibility requirements and long-term uncertainty in a unique planning framework. The resulting planning model is a large-scale multi-stage stochastic mixed-integer programming problem (MIP). To overcome the computational burden, a distributed computing framework based on the novel Column Generation and Sharing algorithm is proposed.

Secondly, the Clean and Renewable Energy System Transition (CREST) planning tool is developed, as the core of the planning framework. The CREST planning tool integrates the optimization of the enhancements of transmission grids with the flexibilities of resources. The underlying planning model captures inter-annual variability of weather-dependent resources by considering multiple weather scenarios in a multi-horizon stochastic scenario tree. Using CREST, a modular development plan is optimized to achieve a cost-efficient operation for a 100 % renewable European energy system by the year 2040.

Finally, the benefits of a flexible operation of electric space heating systems in a 100 % renewable European energy system are investigated. The CREST planning tool is extended to consider the flexibility potential of electric space heating systems in residential buildings. The proposed model enables optimizing the consumption of space heating systems endogenously while maintaining the thermal comfort of users.

The planning framework proposed in this thesis enables optimizing large-scale power systems, such as the European power system, at a high temporal and geographical resolution. In addition, different flexibility options such as short-term energy storage systems, long-term energy storage systems, and demand response resources can be considered. Thus, a cost-efficient and secure power system transformation can be designed while taking advantage of all available sources of flexibility.

# Zusammenfassung

Die klimaneutralen Energiesysteme der Zukunft werden von erneuerbaren Energiequellen dominiert. In diesem Zusammenhang wird eine erhebliche Flexibilität für den Systembetrieb erforderlich sein, um mit den Schwankungen und Unsicherheiten der variablen erneuerbaren Energiequellen zurechtzukommen. Daher sind Flexibilitätsoptionen, wie der Übertragungsnetzausbau, Energiespeichersysteme und Laststeuerung entscheidend für einen kosteneffizienten und sicheren Übergang zu einem klimaneutralen Energiesystem.

In dieser Arbeit wird ein stochastischer Planungsansatz entwickelt, der einen kosteneffizienten und sicheren Übergang zu einem klimaneutralen Energiesystem gewährleistet. Zunächst wird ein integriertes Planungsmodell für Energieerzeugung, -übertragung und Kurzzeitspeicherung erarbeitet. Das Modell gewährleistet eine präzise Darstellung sowohl von kurzfristigen Flexibilitätsanforderungen als auch von langfristigen Unsicherheiten. Das resultierende Planungsmodell ist ein großes, mehrstufiges, stochastisches, gemischt-ganzzahliges Programmierungsproblem (MIP). Mit Hilfe des vorgeschlagenen, verteilten Berechnungsmodells, das auf dem neuartigen „Column Generation and Sharing“-Algorithmus basiert, wird die Rechenlast reduziert.

Danach wird das Planungstool „Clean and Renewable Energy System Transition (CREST)“ als Kern des Planungsansatzes entwickelt. Das Planungstool CREST kombiniert die Flexibilitäten von Ressourcen mit der Optimierung des Übertragungsnetzausbaus. Das zugrunde liegende Planungsmodell erfasst die Variabilität wetterabhängiger Ressourcen zwischen verschiedenen Jahren, indem mehrere Wetterszenarien in einem „multi-horizon“ stochastischen Szenariobaum berücksichtigt werden. Mit CREST wird ein modularer Entwicklungsplan optimiert, um bis zum Jahr 2040 eine kosteneffiziente europäische Energieversorgung mit 100 % erneuerbaren Energien zu erreichen.

Abschließend werden die Vorteile eines flexiblen Betriebs elektrischer Raumheizungssysteme in einem zu 100 % erneuerbaren europäischen Energiesystem untersucht. Das Planungstool CREST wird erweitert, um das Flexibilitätspotenzial elektrischer Raumheizungssysteme in Wohngebäuden zu berücksichtigen. Das vorgeschlagene Modell ermöglicht eine endogene Verbrauchsoptimierung von Raumheizungssystemen unter Berücksichtigung des thermischen Komforts der Nutzer.

Der in dieser Arbeit vorgeschlagene Planungsansatz ermöglicht die Optimierung großer Energiesysteme, wie das europäische Energiesystem, mit hoher zeitlicher und geografischer Auflösung. Darüber hinaus können verschiedene Flexibilitätsoptionen, wie Kurzzeit-Energiespeichersysteme, Langzeit-Energiespeichersysteme und Laststeuerung in Betracht gezogen werden. Somit kann eine kosteneffiziente und sichere Energiesystemtransformation unter Berücksichtigung aller verfügbaren Flexibilitätsquellen gestaltet werden.