

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat Wasserstoff aufgrund seines Potenzials, die Energiewende voranzutreiben und Energiesicherheit zu gewährleisten, als Energieträger und Kraftstoff erheblich an Bedeutung gewonnen. Dieses Potenzial hat zahlreiche Länder und Regionen weltweit dazu veranlasst, Wasserstoffstrategien und -politiken zu verabschieden. Diese skizzieren Pfade hin zur Wasserstoffwirtschaft, welche die breite Einführung von Wasserstofftechnologien mit unterschiedlichen sektoralen und Nachhaltigkeitszielen in den jeweiligen Ländern und Regionen beschreibt. Wasserstofftechnologien sind bereits Gegenstand erheblicher Forschungs- und Innovationsaktivitäten gewesen, bevor durch Wasserstoffstrategien auf die politische Agenda gesetzt wurden. Bei der Transformation hin zu einer Wasserstoffwirtschaft sind diese Aktivitäten von großer Bedeutung, um Wasserstofftechnologien weiterzuentwickeln und deren Markteinführung zu erleichtern. Während die bisherige Forschung den Zusammenhang zwischen Forschung und Innovation zu Wasserstofftechnologien und deren Markthochlauf adressiert hat, wurde dieser Zusammenhang noch nicht ausreichend durch empirische Evidenz gestützt. Zudem wurde Sicherheit als Voraussetzung für die Transformation hin zu einer vertrauenswürdigen Wasserstoffwirtschaft nicht ausreichend in die Innovationsforschung integriert.

Daher zielt die vorliegende Dissertation darauf ab, diese Forschungslücke durch eine F&E-zentrierte Analyse des *Technologischen Innovationssystems* (TIS) für Wasserstofftechnologien zu schließen, die den Sicherheitsaspekt mittels eines Mixed-Methods-Ansatzes integriert. Dieses übergeordnete Ziel wird durch drei primäre Forschungsziele spezifiziert: 1.) Die Bestimmung der Lebenszyklusphase des globalen (Kapitel 2-4) und zweier nationaler TIS (Kapitel 5) für Wasserstofftechnologien; 2.) Die Anwendung eines Mixed-Methods-Designs mit Fokus auf F&E-zentrierte TIS-Performanz; 3.) Die Inkorporation des Konzeptes der *Qualitätsinfrastruktur* (QI) in den TIS-Rahmen aufgrund ihrer Bedeutung für die Sicherheit, das Vertrauen, die Akzeptanz und letztlich die Markteinführung von Wasserstofftechnologien. Durch die Umsetzung dieser Forschungsziele trägt die vorliegende Dissertation zu einem besseren Verständnis der Transformation hin zu einer Wasserstoffwirtschaft bei und leistet einen konzeptionellen und methodischen Beitrag zur Anwendung des TIS-Rahmens.

Die vorliegende Arbeit setzt sich aus sechs Kapiteln zusammen. Das einleitende Kapitel 1 stellt die Motivation, den empirischen Rahmen, die Literaturübersicht, das TIS und die QI als primäre konzeptionelle Rahmen, den methodischen Hintergrund, die übergreifenden Forschungsziele und die Zusammenfassung und Übersicht über die einzelnen Studien dieser Dissertation vor. Die Kapitel 2-5 beinhalten die einzelnen Studien dieser Dissertation. Letztlich bildet Kapitel 6 das abschließende Kapitel.

## Abstract

In recent years, hydrogen has gained significant importance as an energy carrier and fuel, which has the potential to drive the clean energy transition and address energy security concerns. This potential has led numerous countries and regions worldwide to adopt hydrogen strategies and policies. These outline pathways to the hydrogen economy – a concept describing the widespread adoption of hydrogen technologies with different sectoral and sustainability targets across the accordant countries and regions. Hydrogen technologies have been subject to substantial research and innovation activities, even before they were put on the political agenda in the form of hydrogen strategies. In the transition to a hydrogen economy, these activities are of great significance to advance hydrogen technologies and facilitate their market entry. While previous research has addressed the relationship between research and innovation in hydrogen technologies and market formation, this relationship has not been supported by sufficient empirical evidence. Furthermore, safety as a prerequisite for the transition to a trustworthy hydrogen economy has not been sufficiently integrated into this field of innovation research.

Therefore, this thesis aims to address this research gap by offering an R&D-centered analysis of the *Technological Innovation System* (TIS) for hydrogen technologies that incorporates safety using a mixed-methods research design. This overarching aim is specified in three primary research objectives: 1.) To assess the life-cycle phase of the global (Chapters 2-4) and two national TISs (Chapter 5) for hydrogen technologies; 2.) Integrating mixed methods with a focus on R&D-centered TIS performance; 3.) Incorporating the concept of *Quality Infrastructure* (QI) into the TIS framework, given its importance for safety, trust, acceptance, and eventually, the market ramp-up of hydrogen technologies. By implementing these research objectives, this thesis contributes to a better understanding of the transition to a hydrogen economy while making conceptual and methodological contributions to the application of the TIS framework.

This thesis consists of six chapters. The introductory Chapter 1 introduces the motivation, the empirical setting, the literature review, the identified research gaps, the TIS and QI as the primary conceptual frameworks, the methodological background, the overarching research objectives, and a summary and overview of each study in the thesis. Chapters 2-5 represent the individual studies of this thesis. Finally, the Conclusion section is presented in Chapter 6.