
Sustainable Management, Wertschöpfung und Effizienz

Reihe herausgegeben von

Gregor Weber, Breunigweiler, Deutschland

Markus Bodemann, Warburg, Deutschland

René Schmidpeter, Köln, Deutschland

In dieser Schriftenreihe stehen insbesondere empirische und praxisnahe Studien zu nachhaltigem Wirtschaften und Effizienz im Mittelpunkt. Energie-, Umwelt-, Nachhaltigkeits-, CSR-, Innovations-, Risiko- und integrierte Managementsysteme sind nur einige Beispiele, die Sie hier wiederfinden. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Nutzen, den solche Systeme für die Anwendung in der Praxis bieten, um zu helfen die globalen Nachhaltigkeitsziele (SDGs) umzusetzen. Publiziert werden nationale und internationale wissenschaftliche Arbeiten.

Reihen herausgeber:

Dr. Gregor Weber, ecoististics.institute

Dr. Markus Bodemann

Prof. Dr. René Schmidpeter, Center for Advanced Sustainable Management, Cologne Business School

This series is focusing on empirical and practical research in the fields of sustainable management and efficiency. Management systems in the context of energy, environment, sustainability, CSR, innovation, risk as well as integrated management systems are just a few examples which can be found here. A special focus is on the value such systems can offer for the application in practice supporting the implementation of the global sustainable development goals, the SDGs. National and international scientific publications are published (English and German).

Series Editors:

Dr. Gregor Weber, ecoististics.institute

Dr. Markus Bodemann

Prof. Dr. René Schmidpeter, Center for Advanced Sustainable Management, Cologne Business School

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15909>

Robert Staiger · Adrian Tanțău

Geschäftsmodellkonzepte mit grünem Wasserstoff

Wirtschaftliche und ökologische
Auswirkungen für H₂ als nachhaltiger
Energieträger

 Springer Gabler

Robert Staiger
University of Bucharest
Buchheim, Deutschland

Adrian Tanțău
University of Bucharest
Bucharest, Rumänien

ISSN 2523-8620 ISSN 2523-8639 (electronic)
Sustainable Management, Wertschöpfung und Effizienz
ISBN 978-3-658-30575-8 ISBN 978-3-658-30576-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-30576-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort: Dr. Georg Kobiela

Die heraufziehende Klimakrise verlangt nach raschen, tiefgreifenden und vielgestaltigen Lösungen. Die Dramatik und notwendige Veränderungsdynamik wie auch die Tiefe der Transformation wird im ökonomischen Mainstream erst langsam realisiert.

Grüner Wasserstoff als nachhaltiger sekundärer Energieträger für die unterschiedlichen Anwendungen in den drei Energiesektoren Wärme, Strom und Mobilität wird zukünftig eine Schlüsselrolle in der Energieversorgung spielen. Der Umfang aktueller nationaler und internationaler Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten und spricht eine ebenso deutliche Sprache wie vielfältige politische Bekundungen.

Energiewende und Industrietransformation auf europäischer Ebene können zu positiven Gesamtwirtschaftlichen Effekten führen. Wasserstoff als nachhaltiger sekundärer Energieträger wird dabei ein wichtiges Bindeglied in den drei Energiesektoren Elektrizität, Wärme und Mobilität spielen, aber auch für die energieintensive Grundstoffindustrie zu einem bedeutenden eigenständigen Energieträger werden. Zum erfolgreichen Aufbau einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieinfrastruktur bedarf es der umfassenden Betrachtung der mikro- und makroökonomischen Zusammenhänge. Nationale wie transnationale Märkte müssen entsprechend berücksichtigt und gestaltet werden, was über ein simples Matching von Güter- bzw. Faktorpreisen hinausgeht. Der Werkzeugkasten zur Rahmengestaltung ist vielfältig und enthält neben der CO₂-Bepreisung und potentiell international heiklen Grenzausgleichsregimes auch mögliche Werkzeuge wie Zertifizierungen, Carbon Contracts for Difference, Quotierungen und Veränderungen des (öffentlichen) Beschaffungswesens.

Dieses Buch verbindet ökonomische, ökologische und technische Zusammenhänge mit dem Einsatz von grünem Wasserstoff als nachhaltiger Energieträger und stellt einige relevante Betrachtungen für den Bereich der Nutzung von Brennstoffzellen im Mobilitätsbereich dar.

Der Gesamtenergiebedarf in Form von Strom und Wasserstoff wird durch in den nächsten Jahrzehnten stark zunehmen und kumuliert ein Vielfaches des aktuellen nationalen Strombedarfs ausmachen. Hierzu wurden sowohl auf globaler, europäischer und nationaler Ebene in den letzten Jahren diverse Roadmaps erstellt. Allein die Defossilisierung der energieintensiven Grundstoffindustrie in den Bereichen Chemie, Stahl und Zement wird selbst ohne Berücksichtigung des Mobilitätssektors weitaus größere Mengen an erneuerbarer Energie benötigen, als sie in derzeitig praktizierten Ausbaupfaden in

Deutschland erreicht werden können. Die großskalige Nutzung von Biomasse stellt bei weitem keine generell klimaneutrale oder ökologisch unbedenkliche Strategie dar, hier sind die nachhaltigen Potenziale sowohl national als auch global durchaus begrenzt. Weder Elektrizität noch Wasserstoff werden insofern quasi unbegrenzt zur Verfügung stehen. Importe diverser klimaneutral bereitgestellter Energieträger werden von großer Relevanz sein und die entsprechenden Märkte können sich ähnlich umkämpft gestalten wie dies heutzutage für Erdöl, Kohle und Erdgas gilt. Eine Priorisierung des Einsatzes von Wasserstoff im Sinne einer Merit-Order für die Emissionsvermeidung erscheint hier angeraten. Mit entsprechender Marktgestaltung und -regulierung kann hierbei durchaus die Zahlungsbereitschaft diverser Anwendungsbereiche für die kostenoptimierte Umsetzung einer gelingenden Gesamttransformation nutzbar gemacht werden.

Die benötigten Energiemengen durch innerhalb Deutschlands generierte erneuerbare Energien bereitzustellen stellt eine enorme Herausforderung dar. Solch eine Abdeckung und könnte nur durch ein sehr umfassendes Maßnahmenbündel realisiert werden und verlangt zugleich nach einem schnellen Kohleausstieg. Die notwendigen starken Nachfragerückgänge lassen sich allerdings nur erreichen durch eine Kombination von Effizienz- Konsistenz- und Suffizienzmaßnahmen wie der verstärkten Nutzung direktelektrischer Systeme und Vermeidung von Verlusten, neuer Produktionsprozesse, stark erhöhten energetischen Sanierungsraten im Gebäudebereich, einer Mobilitätswende mit Wegereduktionen und einem ambitionierter Modal Shift im Mobilitätsbereich inklusive einer Abkehr vom Flug- und motorisierten Individualverkehr, aber auch Einschränkungen wie eine Reduktion der über die letzten Jahrzehnte auf das dreifach angestiegenen pro-Kopf-Fläche an Wohnraum. Auch eine Kreislaufwirtschaft mit geschlossenen Kohlenstoffkreisläufen wird den Bedarf an energieintensiven Neumaterialien senken, zugleich aber auch mit erhöhten Wasserstoffbedarfen einhergehen. Exemplarisch sei hierzu das chemische Recycling von derzeit lediglich zur Verbrennung einsetzbarer Kunststoffabfälle genannt.

Im vorliegenden Buch werden mithilfe von Geschäftsmodell-Theorien die unterschiedlichen Anwendungen und auch möglichen künftigen Märkte in den mobilen und stationären Bereichen im Wärme- und im Mobilitätssektor beleuchtet. Diese Anwendungen basieren auf den aktuellen technologischen Stand, „Breakthrough“-Technologien werden hier nicht mit betrachtet. Als Referenz hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit dienen fossile Technologien auf ihrem aktuellen Entwicklungsstand.

Hilfreich zur Einordnung der ökonomischen, ökologischen und marktrelevanten Konsequenzen ist die Beschreibung der wirtschafts- und ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen in den ersten Kapiteln. In den weiteren Kapiteln werden stationäre und mobile

Anwendungen von zumeist privaten Endkunden beschrieben, industrielle Kunden wie etwa die energieintensive Grundstoffindustrie stehen nicht im Fokus der vorliegenden Betrachtung. Mehrere Fallstudien stellen die ökologischen und ökonomischen Merkmale von grünem Wasserstoff dar und sollen an Beispielen die heute schon erreichbare Effizienz dezentraler Wasserstoffherstellung illustrieren. Insbesondere E-Fuels werden hierbei in den Fokus gestellt. Diese werden künftig sicherlich eine wichtige Rolle in der Energieinfrastruktur spielen, auch wenn noch nicht abzusehen ist, in welchen Weltregionen deren Produktion stattfinden wird.

Das Buch schließt mit einer empirischen Studie zu ökonomischen, ökologischen und technischen Fragen mit grünem Wasserstoff ab. Hierdurch vermittelt es einen interessanten Überblick der im Netzwerk „Hydrogen Ambassadors“ vorherrschenden Denkweisen, wo sicherlich eine große Kompetenz hinsichtlich des Aufbaus und der Anwendung von Wasserstoff-Brennstoffzellen versammelt ist. Hierauf aufbauend lässt sich eine außerordentlich produktive Reflexion der vorherrschenden Sichtweisen beginnen, die freilich nur einen kleinen Ausschnitt aus der Gesamtschau darstellen auf mögliche Entwicklungen der Synthese und Verwendung von Wasserstoff und inwiefern andere Energieträger teilweise konkurrierend, teilweise ergänzend in ihrer Nutzung zunehmen werden.

Mit dieser rahmenden Einordnung stellt die Arbeit einen lesenswerten Erkenntnisgewinn für Studierende und Dozent*innen in den Fachgebieten der Wirtschafts- und energiebezogenen Ingenieurwissenschaften dar und trägt dazu bei, die in unterschiedlichen Subkontexten vorherrschenden Perspektiven sichtbar zu machen. Auch Unternehmensvertreter*innen, die endkundenorientierte Geschäftsmodelle mit grünem Wasserstoff entwickeln und umsetzen möchten dürften einen Gewinn aus dem vorliegenden Buch ziehen können.

Wuppertal, Januar 2020

Dr. Georg Kobiela

Vorwort: Autoren

Dieses Buch „Geschäftsmodellkonzepte mit grünem Wasserstoff“ basiert auf der Forschungsdissertation zur Erlangung des Dokortitels von Herrn Robert Staiger.

Herr Prof. Dr. Dr. A. Tanțău war wissenschaftlicher Betreuer und Koordinator dieser Forschungsarbeit. Seine langjährige Expertise im Bereich erneuerbaren Energien und deren möglichen Geschäftsmodellstrukturen waren für die Betreuung und Koordinierung dieser Arbeit eine Bereicherung.

Das besondere Interesse in diesem Buch liegt in der Betrachtung des „nachhaltigen“ grünen Energieträgers Wasserstoff, den möglichen Anwendungen und deren heutigen und zukünftigen Geschäftsmodell Strukturen. Dabei wurden eine Vielzahl von unterschiedlichen Themenbereichen in die Forschungsarbeit mit eingebunden. Die Komplexität und die dabei notwendigen Betrachtungen über den „Tellerrand“ der Geschäftsmodelltheorien waren dabei unabdingbar. Technische, ökologische und wirtschaftswissenschaftliche Betrachtungen waren für die Beantwortung der Forschungsfragen von bedeutender Relevanz. Der Untersuchungsbereich erstreckte sich auf stationäre und mobile Anwendungen mit grünem Wasserstoff als sekundärer Energieträger.

Ziele und Aufgabe der Arbeit

Ziel und Aufgabe der Arbeit war es charakteristische Eigenschaften von bestehenden und neuen Geschäftsmodellen mit grünem Wasserstoff zu quantifizieren und auf Ihre Relevanz zu prüfen und zu beschreiben. Aus den Zielen der Arbeit wurde die Frage nachgegangen wie mit grünem Wasserstoff als nachhaltigem Energieträger die zukünftigen Anwendungen gestaltet und entwickelt werden können. Die zentrale Forschungsfrage der Arbeit lautete dabei:

Welche besonderen Eigenschaften im Geschäftsmodellbaustein Wertversprechen/ Nutzenversprechen, sind für die stationären und mobilen Anwendungen mit Wasserstoff als grünem sekundärem nachhaltigen Energieträger von besonderer Bedeutung?

Aus den verschiedenen Forschungsarbeiten der letzten Jahre werden die besonderen Eigenschaften für Geschäftsmodelle mit grünem Wasserstoff auf ihre Relevanz geprüft und dargestellt werden. Untersucht werden dabei stationäre und mobile Anwendungen mit grünem Wasserstoff.

Abbildung 1 zeigt die Haupt- und Nebenziele der Arbeit.

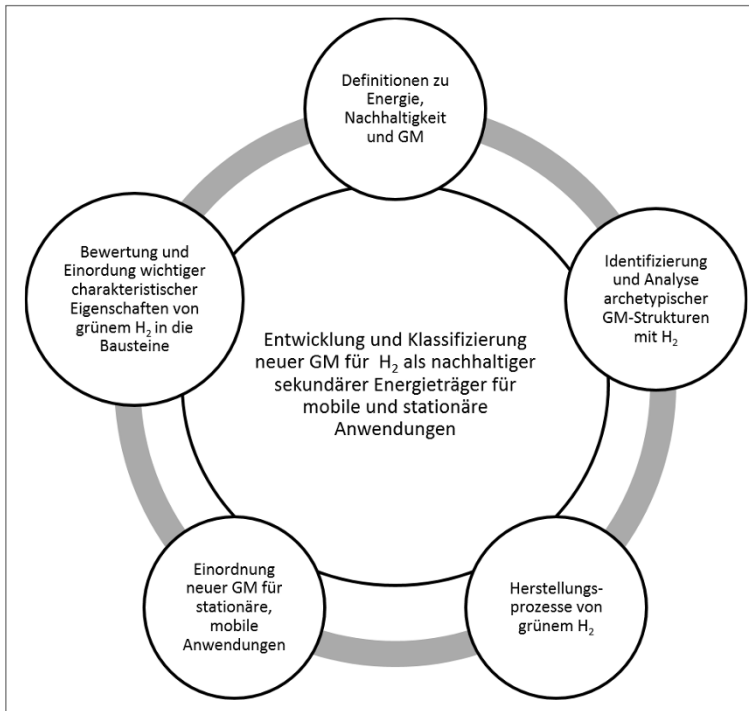


Abbildung 1: Ziele der Forschungsarbeit

Quelle: Eigene Darstellung.

Diese Ziele werden in einzelne Forschungsfragen überführt, die es gilt in dieser Arbeit zu beantworten. Dazu werden weiterer Unterteilungen in Nebenfragen vorgenommen, die in den unterschiedlichen Forschungsarbeiten in den einzelnen Kapiteln des Buches zu beantwortet. Tabelle 1 zeigt ein Auszug möglicher sekundärer Forschungsfragen.

Tabelle 1: Weitere sekundäre Forschungsfragen

Kapitel	Nebenfragen
2	<p><i>Grundlagen</i></p> <p>Was ist Energie und welche Bedeutung hat „das Gut“ in der heutigen Volkswirtschaft</p> <p>Was ist fossile Energie und erneuerbare (grüne) Energie? wo sind die Unterschiedsmerkmale?</p> <p>Welche ökologischen und ökonomische Konsequenzen hat die Nutzung fossiler Energieträger?</p> <p>Was ist grüner H₂?</p> <p>Was bedeutet Nachhaltigkeit grundsätzlich und in Bezug auf grünen Wasserstoff (H₂)?</p> <p>Was sind Geschäftsmodelle und welche Strukturen gibt es?</p> <p>Wie ist die Geschäftsmodell-Theorie von Osterwald/Pigneur aufgebaut?</p>
3	<p><i>Umwelt+ökonomische Auswirkungen mit H₂</i></p> <p>Wie sehen die Umweltauswirkungen in der heutigen Energieinfrastruktur aus?</p> <p>Welche Energiewandler gibt es heute und wo sind die Unterschiede?</p> <p>Sind Kraftwerke für erneuerbare Energien ökonomisch/ökologisch sinnvoll?</p> <p>Wie wird H₂ hergestellt und welche Auswirkungen haben die Prozesse auf Umwelt und Ökonomie?</p> <p>Was sind Stromgestehungskosten und wie werden diese für Prozesse berechnet?</p> <p>Ist es ökonomisch empfehlenswert, H₂ als grünen Energieträger einzusetzen?</p> <p>Welche Konsequenzen hat grüner H₂ für die Energieinfrastruktur/Ökologie/Ökonomie?</p> <p>Welches sind Eigenschaften von grünem H₂ für die Bausteine in einem Geschäftsmodell (Werte/Nutzenversprechen, Value Propositions)?</p>
4	<p><i>Archetypische Geschäftsmodelle</i></p> <p>Welche Marktteilnehmer gibt es mit grünem H₂, was sind Geschäftsfelder und welche Einteilung gibt es mit grünem H₂? Was sind mögliche archetypische Geschäftsmodelle und wie sind sie strukturiert? Welche archetypischen Geschäftsmodelle gibt es für die grünen H₂-Anwendungen?</p> <p>Welches sind die Eigenschaften der einzelnen Bausteine von archetypischen Geschäftsmodelle?</p>
5	<p><i>Geschäftsmodelle für stationäre Anwendungen</i></p> <p>Wie können die stationären Anwendungen eingeteilt werden?</p> <p>Wie hoch ist die Marktnachfrage nach stationären Anwendungen?</p> <p>Wie sehen die zukünftigen Potenziale für grünen H₂ im stationären Segment aus?</p> <p>Was sind Brennstoffzellen?</p> <p>Welche stationäre Systeme gibt es und wo sind die Unterscheidungsmerkmale?</p> <p>Wie können stationäre Systeme berechnet werden?</p> <p>Welche Hilfsmittel (Simulationen) gibt es und wie arbeiten diese?</p> <p>Wie sehen Vergleiche zwischen konventionellen und stationären H₂-Anwendungen aus?</p> <p>Was sind hybride Systeme?</p> <p>Wie sehen mögliche Potenziale in den noch H₂-Nischenmärkten aus?</p> <p>Welches sind die Eigenschaften der verschiedenen Bausteine von Geschäftsmodelle im stationären Anwendungsbereich?</p>

6 ***Geschäftsmodelle für mobile Anwendungen***

- Wie kann der Mobilitätssektor eingeteilt werden?
- Wie hoch ist die Marktnachfrage nach H₂ Fahrzeugen?
- Wie sehen die zukünftige Potenziale für grünen H₂ im Mobilitätsbereich aus?
- Wie sehen Vergleiche zwischen konventionellen BEV und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) aus?
- Welche Möglichkeiten mit H₂ gibt es für kommerzielle Fahrzeuge?
- Welches sind die Eigenschaften der verschiedenen Bausteine von Geschäftsmodelle im mobilen Anwendungsbereich?

7 ***Geschäftsmodelle für Power- to- X Anwendungen***

- Was sind PtX-Anwendungen? Sind diese essentiell für eine erneuerbare Energieinfrastruktur?
- Welches Potenzial wird diesem Konzept prognostiziert?
- Welche Anwendungen sind für grünen H₂ geeignet?
- Wie sehen die ökonomischen/ökologischen Vorteile gegenüber konventionellen Anwendungen aus? Welche Beispiele gibt es für H₂-Anwendungen in der Zukunft?
- Wie sehen die Eigenschaften der verschiedenen Bausteine von Geschäftsmodellen im PtX Anwendungsbereich aus?

8 ***Empirische Studie***

- Welches sind die Ziele der empirischen Studie?
 - Wie sehen mögliche Hypothesen aus?
 - Wie sieht das Fragedesign aus?
 - Wie erfolgt die Auswertung?
 - Welche Tools werden genutzt?
 - Wie können Hypothesen falsifiziert werden?
 - Wie sind die Zusammenhänge zu den unterschiedlichen Forschungsbereichen?
-

Quelle: Eigene Darstellung.

Mit Hilfe einer Expertenbefragung in einem Wasserstoffnetzwerk werden qualitative und quantitative Daten zusätzlich erfasst. Diese werden zusammen mit den einzelnen Forschungsarbeiten für die Beantwortung der Fragen zum Thema grüner Wasserstoff zusätzlich herangezogen. Von Bedeutung sind die Eigenschaften der verschiedenen Bausteine von Geschäftsmodellen. Die Informationen werden statistisch aufbereitet und als Ergebnisse dargestellt. So können die in Kapitel 8.5.1 aufgestellten Hypothesen zu H₂ als erneuerbarem Energieträger geprüft und im Kontext mit den Geschäftsmodell-Eigenschaften bewertet werden.

Die vorliegende Arbeit soll darlegen, wie GM aufgebaut sein können. Dazu wird das GM in die vier Bereiche Angebot, Infrastruktur, Kunden und Ertrag eingeteilt. Diese wiederum konstituieren sich nach Osterwalder und Pigneur in insgesamt neun Bausteinen. Diese beschreiben die Geschäftsmodelle und zeigen, auf Basis welcher Logik ein Unternehmen erfolgreich sein kann. Abbildung 2 zeigt die Struktur der Geschäftstätigkeit von Unternehmen, ausgehend von Geschäftsfeldern und den möglichen archetypischen Geschäftsmodelle.

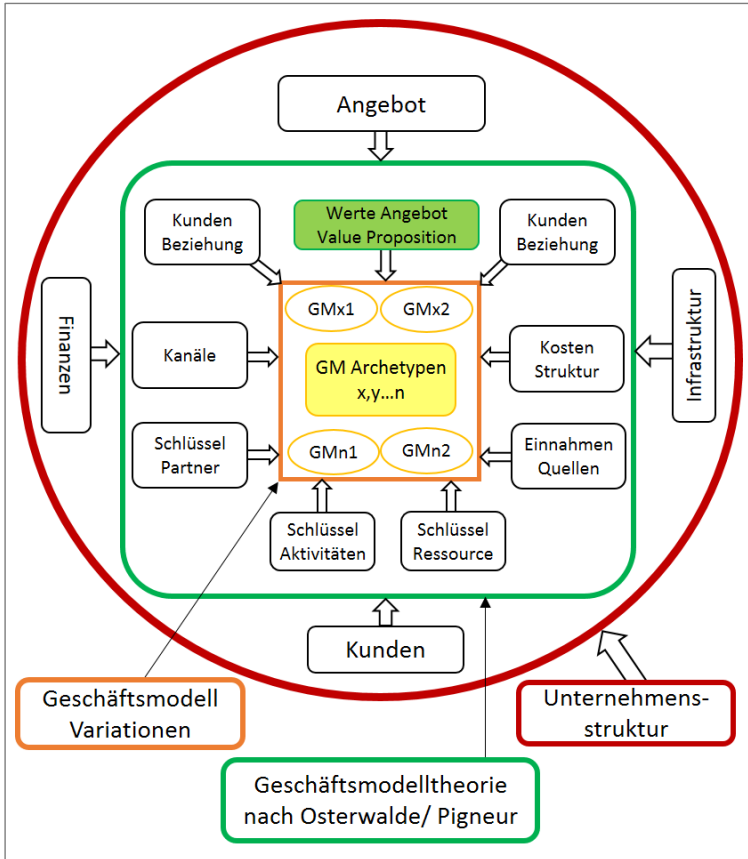


Abbildung 2: Geschäftstätigkeit von Unternehmen

Quelle: Eigene Darstellung.

Methodeneinsatz

Um die gesteckten Ziele der vorliegenden Arbeit zu erreichen, wurden unterschiedliche Instrumente und Methoden eingesetzt. Diese wurden dazu genutzt, Berechnungen, statistische Auswertungen sowie primäre und sekundäre Daten zu prüfen, zu bewerten und daraus neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen. Die Kriterien für den Methodeneinsatz richteten sich dabei nach den Fragestellungen in dieser Arbeit. Es wurden mathematische/statistische, primär und sekundäre Daten, Feldtest Daten, Fallstudien, Simulationsprogramme und eine empirische Studie (Expertenbefragung) als Methoden Wahl gewählt

Folgende Methoden und Daten kommen dabei zum Einsatz:

1. *Mathematische und statistische Methoden* werden verwendet, um beispielsweise Wirtschaftlichkeit zu berechnen, zu prüfen und zu vergleichen. Hier kommen dynamische und statische Methoden zum Einsatz.
2. Für wirtschaftliche Betrachtungen im Bereich Energie und H₂ werden *Recherchen anhand von primären und sekundären Daten* durchgeführt. Diese werden mithilfe von Datenbanken, Tabellenkalkulationen etc. auf Plausibilität und Korrektheit geprüft.
3. *Feldtest-Daten* werden zur Prüfung von wissenschaftlichen Aussagen, Plausibilitäten und Ergebnissen eingesetzt.
4. *Fallstudien* werden eingesetzt, um Daten zu bestimmten spezifischen Fragen und Problemstellungen zu gewinnen.
5. *Softwareprogramme* werden für Berechnungen, Darstellungen, grafische Darstellungen verwendet.
6. Ein weiteres Hilfsmittel zur Prüfung, Darstellung und Berechnung von Forschungsfragen sind *Simulationsmodelle*, die mithilfe von bestimmten Software-Algorithmen speziell im Bereich PV, dezentrale Energiesysteme, Gebäudehülle und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) zum Einsatz kommen, und Instrumente wie das Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS). Diese Simulationen ermöglichen es, die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen unterschiedlicher Energietransformationsprozesse mit denen von grünem H₂ zu vergleichen, um daraus Antworten auf die Forschungsfragen zu gewinnen.
7. Für zukunftsorientierte Betrachtungen werden Experten zum Thema befragt. Die *Expertenbefragung* wird über das Netzwerk „Hydrogen Ambassador“ durchgeführt. Mithilfe der dabei erhobenen *quantitativen* und *qualitativen* Daten können die aufgestellten Fragen und Hypothesen zum Nutzenversprechen (Value Proposition) für Geschäftsmodelle mit H₂ als Energieträger auf Plausibilität und Relevanz geprüft werden. Tabelle 2 zeigt, welche Instrumente für die Beantwortung der Forschungsfragen verwendet wurden.

Tabelle 2: Eingesetzte Instrumente der Arbeit

Instrumente	Aufgabe
Mathematische Methoden statisch/dynamisch	- Überprüfung von Daten und Fakten - Plausibilitätschecks, ökonomische Sinnhaftigkeit
1. Primäre/sekundäre Daten	- Zeitliche Vergleiche, Tendenzen, Korrelationen - Rückschlüsse auf Trends, Vergleich von Zuständen - Ökonomische Betrachtungen
2. Feldtests	- Aktuelle Informationen von Applikationen – Rückschlüsse auf mögliche Trends - Design- und Marketing-Betrachtungen - Marktreaktionen
3. Fallstudien	- Überprüfung von Daten und Fakten - Marketing-Untersuchung
4. Softwarepakete - Windows Programme	- Prüftools, Darstellung Diagramme, Vergleiche, Plausibilität
5. Simulation und Softwaretools - GEMIS - EnergyPro, ETU Planer, BHKW Ulimate, E!Sankey, BW MFCA, ETU Gebäudesimulation, ETU PV/Solarthermie	- Überprüfung von Daten und Fakten, - Plausibilitätschecks - Ökonomische Berechnungen - Ökologische Berechnungen - Variationen und Anzahl von Berechnungen - Variantenvergleich
6. Expertenbefragung (online)	- Statistische Auswertungen mit der Software SPSS - Varianzanalyse - Darstellungssystematik, Dokumentation

Quelle: Eigene Darstellung.

Aufbau der Arbeit

Kapitel 1 stellen die Grundlagen der vorliegenden Arbeit dar. Alle weiteren Kapitel enthalten wissenschaftliche Untersuchungen der letzten Jahre zum Thema Wasserstoff als grüner nachhaltiger Energieträger mit Ergebnissen zu spezifischen Eigenschaften von Geschäftsmodelle für mobile und stationäre Anwendungen mit grünem Wasserstoff. Eines der Hauptaugenmerk in diesem Buch gilt dem Baustein „Value Proposition/Wertversprechen/Nutzenversprechen“ mit den vier Bereichen (Kunden, Angebote, Infrastruktur und Ertrag). Diese finden in jedem der Kapitel 3–7 Anwendung und werden in Kapitel 8 anhand empirischer Daten einer Bewertung und einem Vergleich unterzogen. Im Einzelnen präsentieren die Kapitel die folgenden Inhalte:

In *Kapitel 1* werden die Grundlagen zum Forschungsgebiet herausgearbeitet und der aktuelle Stand der Forschung aufgezeigt. Abschnitt 1.1 behandelt die Grundsätze im

Umgang mit Energie und stellt damit wichtige Grundlagen für die folgenden Teile der Arbeit dar. Abschnitt 1.2 und 1.4 beschreibt die heutige ökologische und ökonomische Debatte um die Wahl zwischen konventionellen Energieträgern und grüner Energie. Auch wird auf die Notwendigkeit von nachhaltigem Handeln eingegangen und grundlegende Zusammenhänge des Nachhaltigkeitsgedankens werden gezeigt. Abschnitt 4 erläutert grünes H₂, dessen Herstellungsmöglichkeiten sowie ökonomische und ökologische Sachverhalte, die für die Nutzung von grünem H₂ von Bedeutung sind.

Kapitel 2 erklärt die strukturellen Merkmale von Geschäftsmodellen und das für die Arbeit genutzte Geschäftsmodell von Osterwalder und Pigneur.

In *Kapitel 3* werden Umwelt- und ökonomische Auswirkungen der Nutzung von grünem H₂ als erneuerbarem Energieträger untersucht. Es werden bekannte Energiesysteme umwelttechnisch und ökonomisch analysiert und mit möglichen substituierbaren H₂-Anwendungen verglichen. Auf dieser Basis werden wichtige Merkmale der Ergebnisse von grünem H₂ beschrieben und bewertet. Diese Merkmale können für unternehmerischen Erfolg bzw. Misserfolg ausschlaggebend sein. Wichtig ist die Klärung, wie grüner H₂ dazu beitragen kann, die Umwelt- und Klimaproblematik zu minimieren, und wie hoch dabei die Potentiale für die unterschiedlichen Anwendungen sind. Zugleich sollen die ökonomischen Konsequenzen im Vergleich zu den heute im Einsatz befindlichen Energieträgern aufgezeigt werden.

Kapitel 4 analysiert archetypische Geschäftsmodelle mit grünem H₂. Die Geschäftsmodelle werden dabei nach den unterschiedlichen Anwendungen unterteilt. Wichtige Eigenschaften der einzelnen Geschäftsmodell-Bausteine werden als Grundlage für die weitere Arbeit in Tabellenform dargestellt.

Kapitel 5 analysiert stationäre/portablen Anwendungen mit grünem H₂. Es wird geklärt, welche Anwendungen heute und zukünftig zur Auswahl stehen können. Dabei wird untersucht, wie stationäre H₂-Anwendungen funktionieren, welche Probleme bei der Nutzung von H₂ auftreten können und welche ökonomischen und ökologischen Vorteile solche Systeme bieten.

Zudem wird der Frage nachgegangen, welche spezifischen Geschäftsmodell-Bausteine aus den Anwendungen hervorgehen. Mithilfe von softwaregestützten Simulationsmodellen werden wichtige Erkenntnisse zu den charakteristischen Eigenschaften dieser Bausteine erarbeitet, dargestellt und verglichen. Das Ziel des Kapitels ist es, eine Systematik der heutigen stationären Anwendungen von H₂ als erneuerbarem Energieträger darzustellen. Es werden die unterschiedlichen stationären Anwendungen, technologische Gemeinsamkeiten, mögliche Risiken und disruptiven Situationen aufgezeigt.

In *Kapitel 6* werden mobile Anwendungen als Grundlage für innovative Geschäftsmodelle mit grünem H₂ analysiert. Untersucht wird, welche Chancen Wasserstoff als erneuerbarer Energieträger bietet und wie sich einschlägige Geschäftsmodelle gestalten

können. Es erfolgt eine Systematisierung der heute und zukünftig möglichen mobilen Anwendungen von grünem H₂ bzw. von auf Basis von H₂ künstlich erstellten Kraftstoffen.

Mit einem Well-to-Wheel-Modell werden die spezifischen Merkmale ökonomisch und ökologisch dargestellt. Dazu werden heutige Fahrzeuge mit E-Fahrzeugen (Battery Electric Vehicle, BEV) und Brennstoffzellen-Fahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) verglichen und bewertet. Des Weiteren werden kommerzielle mobile Anwendungen analysiert. Abschließend werden in diesem Kapitel die Bausteine und die charakteristischen Eigenschaften der unterschiedlichen GM dargestellt und beschrieben.

Kapitel 7 analysiert die neu entstehenden, noch auf Nischenmärkte beschränkten Anwendungen und Prozesse mit H₂ als Energieträger. Diese neuen Anwendungen und Prozesse gliedern sich in eine Vielzahl von Varianten, die mit dem Begriff Power to X bezeichnet werden. Es wird genauer analysiert, wie diesbezügliche Geschäftsmodelle aufgebaut sein können und wie ihre Eigenschaften zu beschreiben sind. Mithilfe von Simulationssoftware und aktuellen Case Studies werden diese Anwendungen auf ihre ökonomische und ökologische Tauglichkeit geprüft und wichtige Eigenschaften von zukünftigen GM dargestellt.

Um weitere quantitative und qualitative Informationen zu erhalten und so die aufgestellten Hypothesen bestätigen oder widerlegen zu können, wurden Experten aus einem internationalen Wasserstoffnetzwerk zur Entwicklung von GM für H₂-Nutzwerte befragt. In *Kapitel 8* werden die Ergebnisse dieser Studie beschrieben, ausgewertet und zur Hypothesenprüfung eingesetzt. Die quantitativen und qualitativen Daten werden für die Analyse möglicher Geschäftsmodelleigenschaften (insbesondere des Bausteins Value Proposition) herangezogen.

Die Ergebnisse aus den Forschungsarbeiten der Kapitel 3–8 werden in *Kapitel 9* diskutiert und es werden Schlussfolgerungen zur Beantwortung der Forschungsfragen gezogen. Zudem wird ein Ausblick auf die Möglichkeiten gegeben, die H₂ als grüner sekundärer erneuerbarer Energieträger mit Blick auf die Bausteine der Geschäftsmodellstrukturen bietet. Mögliche Einschränkungen und neue Fragestellungen werden dokumentiert, damit diese in zukünftigen wissenschaftlichen Arbeiten weiter untersucht werden können.

Inhaltsübersicht

Inhaltsverzeichnis	XXI
Abbildungsverzeichnis	XXVII
Tabellenverzeichnis.....	XXXI
Abkürzungsverzeichnis	XXXV
Zusammenfassung	XXXVII
1 Grundlagen zum Forschungsgebiet.....	1
2 Geschäftsmodelle in den Wirtschaftswissenschaften	33
3 Analyse von Umwelt- und ökonomischen Merkmalen von grünem Wasserstoff	47
4 Analyse archetypischer Geschäftsmodelle für grünen Wasserstoff	91
5 Analyse von stationären/portablen Anwendungen mit grünem Wasserstoff	123
6 Analyse von Mobilitätsanwendungen mit grünem Wasserstoff	161
7 Analyse von Power to - X -Anwendungen mit grünem Wasserstoff.....	197
8 Empirische Studie zu Geschäftsmodellen für grünen Wasserstoff.....	225
9 Hauptbeiträge und Zusammenfassung.....	287
Literaturverzeichnis	299
Anhang	317

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XXVII
Tabellenverzeichnis.....	XXXI
Abkürzungsverzeichnis	XXXV
Zusammenfassung	XXXVII
1 Grundlagen zum Forschungsgebiet	1
1.1 Energie und Energieumwandlung.....	1
1.1.1 Energiesektoren und Sektorenkopplung.....	2
1.1.2 Primärenergie, Sekundärenergie, Endenergie und Nutzenergie	4
1.2 Erneuerbare grüne Energieträger	5
1.3 Wichtigkeit des Forschungsbereichs	6
1.4 Konventionelle Energieträger	8
1.4.1 Effizienz der Energieumwandlung	8
1.4.2 Ökologische Konsequenzen mit fossilen Energieträgern.....	10
1.4.3 Ökonomische Konsequenzen mit fossilen Energieträgern	19
1.4.4 Begrenztheit und Nachhaltigkeit von fossilen Energieträgern	22
1.5 Wasserstoff als grüner Energieträger	23
1.5.1 Einleitende Bemerkungen zum grünen Wasserstoff	23
1.5.2 Wasserstoff Grundlagen.....	28
2 Geschäftsmodelle in den Wirtschaftswissenschaften	33
2.1 Begriffsdefinition Geschäftsmodell	33
2.2 Geschäftsmodell Ansätze.....	34
2.3 Ziele von Geschäftsmodelle	34
2.4 Bereiche von Geschäftsmodelle	35
2.5 Geschäftsmodellinnovationen als Reaktion auf Veränderungen der Umwelt.....	36
2.6 Geschäftsmodelltheorie von Osterwalder und Pigneur	37
2.7 Zusammenfassung	44

3	Analyse von Umwelt- und ökonomischen Merkmalen von grünem Wasserstoff	47
3.1	Hintergrund und Merkmale von grünem Wasserstoff.....	47
3.2	Energiewandler für grünen Wasserstoff	50
3.2.1	Konventionelle Kraftwerke zur Elektrizitätsgewinnung	50
3.2.2	Kraftwerke mit erneuerbarer Energie	53
3.3	Herstellungsprozesse von Wasserstoff	61
3.4	Umweltauswirkungen von grünem Wasserstoff.....	64
3.4.1	Umweltauswirkungen am Beispiel einer Fallstudie.....	64
3.4.2	Diskussion der Umweltauswirkungen im Fallstudien Beispiel	65
3.4.3	Umweltkosten als externe Kostenbestandteile bei der Energieumwandlung	65
3.5	Forschungsziele	67
3.6	Methoden	68
3.7	Fallstudien zur Herstellung von grünem Wasserstoff	71
3.7.1	Fallstudie 1: Dezentrale Anlage mit Photovoltaik	77
3.7.2	Fallstudie 2: Dezentrale Wasserstoffherstellung Laufzeit 20 Jahre	78
3.7.3	Fallstudie 3: Verifizierung Aussage CEO H. Simonsen NEL	81
3.7.4	Fallstudie 4: Dezentrale Wasserstoffherstellung Laufzeit 8 Jahre	83
3.8	Zusammenfassung.....	85
3.8.1	Grundsätzliches zur Analyse von grünem Wasserstoff	85
3.8.2	Geschäftsmodell Bausteine zur Analyse von grünem Wasserstoff	87
3.8.3	Zwischenresümee: Umwelt und ökologische Merkmale von grünem H ₂	90
4	Analyse archetypischer Geschäftsmodelle für grünen Wasserstoff.....	91
4.1	Nachfrage von Wasserstoff als grüner Energieträger	91
4.2	Markteilnehmer einer grünen H ₂ -Ökonomie	95
4.3	Archetypische Geschäftsmodelle für grünen Wasserstoff.....	96
4.3.1	Geschäftsfelder als Basis für die Geschäftsmodelle	96
4.3.2	Geschäftsfeld: Herstellung von grünem Wasserstoff.....	103
4.3.3	Geschäftsfeld: Infrastruktur mit grünem Wasserstoff	109
4.3.4	Geschäftsfeld: Anwendungen mit grünem Wasserstoff	111
4.4	Zusammenfassung.....	116
4.4.1	Grundsätzliches zu Archetypische Geschäftsmodelle	116
4.4.2	Geschäftsmodell Bausteine zu archetypischen Geschäftsmodelle	117
4.4.3	Zwischenresümee: archetypische Geschäftsmodelle mit grünem Wasserstoff	121

5	Analyse von stationären/portablen Anwendungen mit grünem Wasserstoff ..	123
5.1	Hintergrund zu stationären/portablen Anwendungen	123
5.2	Forschungsziele	130
5.3	Methodik	130
5.4	Fallstudien zu stationären Wasserstoff-Anwendungen	133
5.4.1	Heutiger Heizungsmarkt	133
5.4.2	Fallstudie 1 Berechnungen zu Kraft-Wärme-Kopplung Systeme	134
5.4.3	Fallstudie 2: Hybride Heizungssysteme	140
5.4.4	Fallstudie 3: KWK Anlagen mit Brennstoffzelle	146
5.5	Nischenprodukte	149
5.5.1	Brennstoffzellensysteme für Nischenmärkte	149
5.5.2	Energieautarke Systeme mit Fallstudie	151
5.6	Zusammenfassung	154
5.6.1	Grundsätzliche Zusammenhänge zu stationäre/portable Anwendungen	154
5.6.2	Geschäftsmodell Bausteine zu stationäre/portable Anwendungen..	155
5.6.3	Zwischenresümee: stationäre Anwendungen mit grünem Wasserstoff	158
6	Analyse von Mobilitätsanwendungen mit grünem Wasserstoff	161
6.1	Hintergrund zu Mobilitätsanwendungen	161
6.1.1	E-Fahrzeuge (BEV) versus Brennstoffzellen-Fahrzeug (FCEV)	167
6.1.2	Brennstoffzellen-Fahrzeug (FCEV)	172
6.2	Forschungsziele	173
6.3	Methoden	174
6.4	Mobilitätsanwendungen	176
6.4.1	Brennstoffzellenfahrzeuge und Elektrofahrzeuge	176
6.4.2	Trends bei E-Fahrzeugen und Brennstoffzellen-Fahrzeugen	177
6.4.3	Fallstudie 1: Verbrennungsantrieb, E- , und Brennstoffzellen Fahrzeug	179
6.5	Brennstoffzellen- versus Batteriefahrzeuge	184
6.6	Kommerzielle Fahrzeuge	184
6.7	Zusammenfassung	190
6.7.1	Grundsätzliches zu Mobilitätsanwendungen	190
6.7.2	Geschäftsmodell Bausteine zu Mobilitätsanwendungen	192
6.7.3	Zwischenresümee: Mobilitäts-Anwendungen mit grünem Wasserstoff	194

7	Analyse von Power to - X -Anwendungen mit grünem Wasserstoff	197
7.1	Hintergrund zu Power-to-X-Anwendungen.....	197
7.1.1	Power to Power (PtP).....	198
7.1.2	Power to Heat (PtH).....	199
7.1.3	Power to Gas (PtG).....	199
7.1.4	Gas to Power (GtP).....	200
7.1.5	Power to Liquid (PtL).....	201
7.1.6	Power to Fuel (PtF).....	201
7.1.7	Sun to Fuel (PtF).....	201
7.2	Forschungsziele und Methodik	202
7.3	Märkte für Power-to-X-Anwendungen mit grünem Wasserstoff	203
7.4	Power- to- X Geschäftsmodelle.....	216
7.5	Zusammenfassung.....	222
7.5.1	Grundsätzliches zu Power-to-X Anwendungen	222
7.5.2	Geschäftsmodell Bausteine zu Power to X Anwendungen	222
7.5.3	Zwischenresümee PtX-Anwendungen mit grünem Wasserstoff.....	224
8	Empirische Studie zu Geschäftsmodellen für grünen Wasserstoff	225
8.1	Hintergrund der Studie.....	225
8.2	Fragendesigns	226
8.3	Auswertungen mit SPSS.....	228
8.4	Deskriptive Ergebnisse.....	229
8.4.1	Allgemeine Ergebnisse zu Energie und Wasserstoff.....	230
8.4.2	Geschäftsmodellrelevante Faktoren.....	237
8.4.3	Stationäre Anwendungen	243
8.4.4	Mobilitätsanwendungen mit Wasserstoff	244
8.4.5	Value Proposition im Wasserstoff-Mobilitätsbereich	246
8.4.6	Brennstoffzellen und Batteriefahrzeuge.....	249
8.4.7	Power- to- X Anwendungen.....	254
8.5	Hypothesen Test.....	255
8.5.1	Abgeleitete Hypothesen	255
8.5.2	Chi -Test.....	256
8.5.3	Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson	256
8.5.4	Beispiel 1: Hypothese Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeug.....	258
8.5.5	Beispiel 2: Hypothese Umweltfreundlichkeit und FCEV	260
8.5.6	Beispiel 3: Hypothese Umweltfreundlichkeit und unbegrenzte Energiequelle	263

8.6	Bewertungen der Eigenschaften von Geschäftsmodelle mit grünem Wasserstoff	265
8.6.1	Zusammenfassung von archetypische GM und H ₂ spezifische Eigenschaften	266
8.6.2	Stationäre/portable Geschäftsmodellstrukturen	269
8.6.3	Mobile Geschäftsmodellstrukturen	274
8.6.4	PtX Geschäftsmodellstrukturen	279
8.7	Zusammenfassung	285
9	Hauptbeiträge und Zusammenfassung	287
9.1	Hauptbeiträge	287
9.2	Zusammenfassung	291
9.3	Limitationen	296
9.4	Ausblick auf weiter Forschungsarbeiten	297
	Literaturverzeichnis	299
	Anhang	317

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ziele der Forschungsarbeit	X
Abbildung 2:	Geschäftstätigkeit von Unternehmen	XIII
Abbildung 3:	Primärenergieverbrauch 2018	1
Abbildung 4:	Effizienzsteigerungen in den Energiesektoren: heute und zukünftig	4
Abbildung 5:	Primäre und sekundäre Energieträger	5
Abbildung 6:	Energieeffizienz am Beispiel eines Kohlekraftwerks.....	9
Abbildung 7:	Keeling-Kurve CO ₂ -Konzentration von 1960-2019	12
Abbildung 8:	Keeling Kurve CO ₂ Konzentration der letzten 800.000 Jahre	13
Abbildung 9:	Temperaturanstieg der letzten 100 Jahren.....	14
Abbildung 10:	Jährliche Temperaturänderungen seit 1880	14
Abbildung 11:	Meeresspiegelanstieg durch Eisschmelze	15
Abbildung 12:	Nachhaltigkeitsmodelle	23
Abbildung 13:	Grüne Herstellungsprozesse für H ₂	30
Abbildung 14:	Geschäftsmodell Charakteristika	33
Abbildung 15:	Business Model Canvas	38
Abbildung 16:	Schnittmenge Value Proposition	39
Abbildung 17:	Energieflussschema eines Kohlekraftwerks mit Anwendungsbeispiel	52
Abbildung 18:	Preisentwicklung PV-Module in Wp.....	54
Abbildung 19:	Preisentwicklung PV Anlage kWp.....	54
Abbildung 20:	Wachstumsrate PV GWp	55
Abbildung 21:	Stromgestehungskosten von offshore-Windkraftanlagen.....	58
Abbildung 22:	Externe Kosten der Stromumwandlung	66
Abbildung 23:	Energiemodell.....	70
Abbildung 24:	Berechnungsmethode für die H ₂ -Herstellung.....	75
Abbildung 25:	Geschäftsfelder mit grünem H ₂	99
Abbildung 26:	Schema für die Klassifizierung von Geschäftsmodell-Strukturen	101
Abbildung 27:	Auswertungsstruktur für Geschäftsmodelle	102
Abbildung 28:	Dezentrale und zentrale H ₂ -Herstellung	103
Abbildung 29:	Bereiche der H ₂ -Erzeugung	104
Abbildung 30:	PEMFC – chemische Reaktion	127

Abbildung 31: Marktentwicklung: Stückzahlen von Brennstoffzellen	128
Abbildung 32: Marktentwicklung: Leistung nach Anwendungen von Brennstoffzellen	128
Abbildung 33: Marktentwicklung: Brennstoffzellen Typen	129
Abbildung 34: FCH-Brennstoffzelle Modell	131
Abbildung 35: Wirkungsgrad konventioneller und KWK.....	135
Abbildung 36: Brennstoffzellenverstärker	142
Abbildung 37: Brennstoffzellen Heizungsmodell	143
Abbildung 38: Fallstudie 3: KWK Lastgang Wärme und Strom	147
Abbildung 39: Fallstudie 3: KWK Kostenverteilung Erdgas 0,045 €/kWh	148
Abbildung 40: Fallstudie 3: KWK Kostenverteilung grüner H ₂ 0,25 €/kWh	149
Abbildung 41: Dezentrale autarke Systeme	152
Abbildung 42: Energieflussdiagramm Verbrennungsantrieb.....	165
Abbildung 43: Aktuelle Wasserstofftankstellen in Europa Stand Juni 2019	166
Abbildung 44: Grundstoffe für die Batterieherstellung	169
Abbildung 45: Wirkungsgradkette batteriebetriebenen Fahrzeuge.....	170
Abbildung 46: Umweltauswirkungen von Elektroauto und Dieselauto.....	171
Abbildung 47: Wirkungsgradketten von Brennstoffzellen Fahrzeuge	173
Abbildung 48: Energiemodell Mobilität	175
Abbildung 49: Wirkungsgrad eines elektrischen Fahrzeugs	176
Abbildung 50: Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen-Autos	177
Abbildung 51: Riversimple-Brennstoffzellenfahrzeug im Vergleich	183
Abbildung 52: Dieselbus und Brennstoffzellenbus im Anschaffungskostenvergleich	187
Abbildung 53: Heutige Power-to-X-Anwendungen.....	202
Abbildung 54: Grüner H ₂ in Power-to-Gas- und Gas-to-Power Prozessen	203
Abbildung 55: Wasserstoffproduktion in den nächsten 8 Jahren.....	204
Abbildung 56: Prozesswege von grünen Energiequellen zu Anwendungen.....	204
Abbildung 57: Ist-Situation und zukünftige Entwicklung von Elektrolyse und Methanisierung	209
Abbildung 58: PtX Infrastruktur und Nutzung von H ₂	210
Abbildung 59: Bandbreite der Investitionskosten für Elektrolyseanlagen	211
Abbildung 60: Strompreisbestandteile 2018 in Deutschland	212

Abbildung 61: Dynamische Investitionsrechnung Annuitätenfaktor	215
Abbildung 62: Speichersysteme.....	219
Abbildung 63: Multifuel-Tankstelle	220
Abbildung 64: Welt ohne Kohle und Nuklearenergie.....	230
Abbildung 65: H ₂ idealer Energieträger	231
Abbildung 66: Wasserstoff wirtschaftlich nutzbar	231
Abbildung 67: Wasserstoff und Energieabhängigkeit	232
Abbildung 68: Wissen über Wasserstoff	233
Abbildung 69: Wasserstoff-Energiepreise	234
Abbildung 70: Wasserstoff Wirtschaft.....	235
Abbildung 71: Wasserstoff Herstellung mit Windenergie.....	236
Abbildung 72: Wasserstoff-Infrastruktur.....	237
Abbildung 73: Wasserstoff und Energiequellen	238
Abbildung 74: Wasserstoff und Energiekosten	238
Abbildung 75: Wertversprechen von Wasserstoff: Verfügbarkeit.....	239
Abbildung 76: Wertversprechen von Wasserstoff: Energieautarkie.....	240
Abbildung 77: Wertversprechen von Wasserstoff: Lagerfähigkeit	240
Abbildung 78: Wertversprechen von Wasserstoff: Umweltfreundlichkeit.....	241
Abbildung 79: Wertversprechen von Wasserstoff : Unabhängigkeit.....	241
Abbildung 80: Wertversprechen von Wasserstoff: lokale Produktion und Verwendung	242
Abbildung 81: Wertversprechen von Wasserstoff: Management von Überkapazitäten und Volatilität	242
Abbildung 82: Wasserstoff und dezentrale Energieversorgung.....	243
Abbildung 83: Wasserstoff und Notstromversorgungen	244
Abbildung 84: Wasserstoff und Elektrolyseur	244
Abbildung 85: Wasserstoff und Brennstoffzellen Fahrzeuge	245
Abbildung 86: Wasserstoff und Lastkraftwagen	245
Abbildung 87: Wasserstoff und Busse	246
Abbildung 88: Wertversprechen von Wasserstoff - Reichweite	247
Abbildung 89: Wertversprechen von Wasserstoff - Füllzeit.....	247
Abbildung 90: Wertversprechen von Wasserstoff - Emissionsfreiheit	248
Abbildung 91: Wasserstoff und Umweltbelastung - Feinstaub.....	248

Abbildung 92: Wasserstoff und Fahrverbote	249
Abbildung 93: Wasserstoff und Fahrzeugtypen	249
Abbildung 94: Wasserstoff und Fahrzeugtypen	250
Abbildung 95: Wasserstoff und Mobilität - Infrastruktur	250
Abbildung 96: Wasserstoff und Batterie-Infrastruktur	251
Abbildung 97: Wasserstoff - Fahrzeuge versus Batterie- Fahrzeuge	252
Abbildung 98: Speichermaterialien	252
Abbildung 99: Wasserstoff oder Batterie.....	253
Abbildung 100: Investitionskosten FCEV und BEV	253
Abbildung 101: Zukunft von Power- to-X Zukunft	254
Abbildung 102: Wasserstoff und Speicher	254
Abbildung 103: Vergleich.....	259
Abbildung 104: Linearer positiver Zusammenhang	262
Abbildung 105: Umwelt/Verfügbarkeit	265

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Weitere sekundäre Forschungsfragen	XI
Tabelle 2:	Eingesetzte Instrumente der Arbeit	XV
Tabelle 3:	Energiepotenzial erneuerbarer Energieträger	6
Tabelle 4:	Wirkungsgrade von heutigen konventionellen Kraftwerkstypen	9
Tabelle 5:	Schlüsselwerte für Klimaindikatoren	16
Tabelle 6:	Wahrscheinlichkeiten globaler Risiken	16
Tabelle 7:	Auswirkungen globaler Risiken	17
Tabelle 8:	Kohlenstoffverbrennung	18
Tabelle 9:	CO ₂ -Ausstoß pro kWh für unterschiedliche Energieträger	19
Tabelle 10:	Umweltkosten pro kWh	21
Tabelle 11:	Herstellprozess von Wasserstoff	31
Tabelle 12:	Stöchiometrische Gleichung zur Wasserstoffelektrolyse	31
Tabelle 13:	Elemente des Geschäftsmodell nach Osterwald/Pigneur	38
Tabelle 14:	Nutzenversprechen mit grünem H ₂	41
Tabelle 15:	Eckdaten konventionelle Kraftwerke	51
Tabelle 16:	Kapazität, Erzeugung und Anteil der Wasserkraft an der globalen Stromerzeugung in den Szenarien des World Energy Council	59
Tabelle 17:	Übersicht über regenerative Kraftwerke	60
Tabelle 18:	Erzeugung von H ₂	62
Tabelle 19:	Prozesswirkungsgrade	63
Tabelle 20:	Umweltfaktoren CO ₂ -Äquivalent	64
Tabelle 21:	Umweltvergleich Fallstudie 1	65
Tabelle 22:	Gestehungskosten und externe Kosten	67
Tabelle 23:	Kennzahlen von Elektrolyseverfahren	74
Tabelle 24:	Physikalische Eigenschaften von H ₂	76
Tabelle 25:	Fallstudie 1: Berechnung der primären Energieeinheit	77
Tabelle 26:	Fallstudie 2: Kosten Elektrolyse Laufzeit 20 Jahre	79
Tabelle 27:	Fallstudie 2: Kosten Verdichter Laufzeit 20 Jahre	79
Tabelle 28:	Fallstudie 2: LCOE Prozess über 20 Jahre	80
Tabelle 29:	Fallstudie 3: Kosten Elektrolyse Laufzeit 20 Jahre	81
Tabelle 30:	Fallstudie 3: Kosten Verdichter Laufzeit 20 Jahre	82

Tabelle 31:	Fallstudie 3: LCOE Prozess Laufzeit 20 Jahre	82
Tabelle 32:	Fallstudie 3: Ergebnisse.....	83
Tabelle 33:	Fallstudie 4: Berechnungen Prozess 1 Elektrolyse.....	84
Tabelle 34:	Fallstudie 4: Berechnungen Prozess 2 H ₂ verdichten und speichern ...	84
Tabelle 35:	Fallstudie 4: LCOE Prozess über 8 Jahre	84
Tabelle 36:	Nutzenversprechen mit grünem H ₂	87
Tabelle 37:	Nutzenversprechen und charakteristische Eigenschaften	88
Tabelle 38:	Bausteine und charakteristische Eigenschaften für grünen Wasserstoff	89
Tabelle 39:	H ₂ Unternehmungen	96
Tabelle 40:	Prozesse archetypischer Geschäftsmodelle	105
Tabelle 41:	Archetypische GM für das Geschäftsfeld Erzeugung dezentral	107
Tabelle 42:	Archetypische Geschäftsmodellstrukturen für das Geschäftsfeld Erzeugung zentral.....	109
Tabelle 43:	Archetypische Geschäftsmodelle für das Geschäftsfeld Infrastruktur	110
Tabelle 44:	Anwendungen mit grünem H ₂	111
Tabelle 45:	Mobilitätsanwendungen	113
Tabelle 46:	Archetypische Mobilitäts-Geschäftsmodelle	114
Tabelle 47:	Stationäre Anwendung	115
Tabelle 48:	Archetypische Mobilitäts-Geschäftsmodelle – Anwendungen	116
Tabelle 49:	Archetypische Geschäftsmodelle für alle drei Geschäftsfelder	117
Tabelle 50:	Stationäre und portable Anwendungen	123
Tabelle 51:	Brennstoffzellentypen.....	125
Tabelle 52:	2018 Wärmemarkt in Deutschland	133
Tabelle 53:	Fallstudien 1: physikalische Parameter	138
Tabelle 54:	Fallstudie 1: Ergebnisse.....	139
Tabelle 55:	Eigenschaften/Wertversprechen Mikro KWK.....	140
Tabelle 56:	Fallstudie 2: Berechnungsergebnisse FCH und FCA.....	144
Tabelle 57:	Fallstudie 2: Berechnungsergebnisse im Vergleich FCH und FCA	144
Tabelle 58:	Eigenschaften/Wertversprechen FCA.....	146
Tabelle 59:	Fallstudie 3: KWK Standard Erdgas 0,045 €/kWh	147
Tabelle 60:	Fallstudie 3: KWK Wasserstoff grüner H ₂ 0,25 €/kWh.....	148

Tabelle 61:	Sicherheitsbereiche mit Brennstoffzellen	150
Tabelle 62:	Eigenschaften/Nutzen-Wertversprechen Ersatzstromversorgung....	151
Tabelle 63:	Fallstudie dezentrales autarkes System	153
Tabelle 64:	Eigenschaften/Wertversprechen Energieautarke Systeme	154
Tabelle 65:	Zukünftige archetypische Geschäftsmodelle stationär	155
Tabelle 66:	Nutzenversprechen stationärer Systeme.....	156
Tabelle 67:	Bausteine und charakteristische Eigenschaften stationäre Anwendungen	156
Tabelle 68:	Ziele des Weltwirtschaftsforum	162
Tabelle 69:	Mobile Anwendungen	163
Tabelle 70:	Unterscheidungsmerkmale heutiger Antriebsstränge.....	164
Tabelle 71:	Hersteller von Brennstoffzellen-Fahrzeugen	178
Tabelle 72:	Stärken-Schwächen-Analyse von FCEV im Vergleich zu BEV	179
Tabelle 73:	PEE und TEI Berechnung Benzinfahrzeug.....	179
Tabelle 74:	PEE und TEI Berechnung BEV fossil	180
Tabelle 75:	PEE und TEI Berechnung BEV EEQ PV	180
Tabelle 76:	PEE und TEI Berechnung FCEV fossil	180
Tabelle 77:	PEE und TEI Berechnung FCEV EEQ PV.....	181
Tabelle 78:	Fallstudie 1: Berechnungsergebnisse.....	181
Tabelle 79:	Fallstudie 1: Ökonomische Ergebnisse.....	182
Tabelle 80:	Vergleiche der Nutzenversprechen ICE/BEV/FCEV	182
Tabelle 81:	Stärken-Schwächen-Analyse von Brennstoffzellenbussen	185
Tabelle 82:	Chancen-Risiken-Analyse von Brennstoffzellenbussen	186
Tabelle 83:	Archetypische Geschäftsmodelle Archetyp M1: Brennstoffzellen- Fahrzeuge mit Druckspeicher	191
Tabelle 84:	Wertangebot fossiler und grüner H ₂ -Energieträger.....	192
Tabelle 85:	Wertangebote Mobilitätssektor.....	193
Tabelle 86:	Bausteine und charakteristische Eigenschaften mobile Anwendungen	193
Tabelle 87:	LCOE-Berechnungen und Trends.....	215
Tabelle 88:	Geschäftsmodelle mit PtX-Anwendungen	217
Tabelle 89:	Vergleich PtX-Prozessen	218
Tabelle 90:	Nutzenwerte/Kundennutzen Power- to- X Anwendungen.....	221

Tabelle 91:	Bausteine und charakteristische Eigenschaften Power-to- X Anwendungen	223
Tabelle 92:	Hypothesen	255
Tabelle 93:	Kreuztabelle BEV/FCEV	258
Tabelle 94:	Phi Test	260
Tabelle 95:	Kreuztabelle Umwelt und FCEV	261
Tabelle 96:	Kreuztabelle Umwelt und Nachhaltigkeit	264
Tabelle 97:	Archetypische Geschäftsmodelle: Zusammenfassung	266
Tabelle 98:	Zusammenfassung: Wichtige Faktoren mit grünem H ₂	267
Tabelle 99:	Zusammenfassung: Erfolgsversprechende Eigenschaften von grünem H ₂	268
Tabelle 100:	Zusammenfassung: Nutzenversprechen Erzeugung/Infrastruktur	269
Tabelle 101:	Zusammenfassung: Eigenschaften für stationäre/portable Systeme	270
Tabelle 102:	Archetype A1 stationäre Eigenschaften für grünen H ₂	271
Tabelle 103:	Archetype A2 stationäre Eigenschaften	272
Tabelle 104:	Archetype A3 Portable Eigenschaften	273
Tabelle 105:	Zusammenfassung: Mobile Anwendungen mit grünem H ₂	275
Tabelle 106:	Bewertung Mobile BZ Fahrzeuge mit Druckspeicher	276
Tabelle 107:	Bewertung Mobile Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor mit grünem H ₂	278
Tabelle 108:	Bewertung Mobile BZ Fahrzeuge mit Druckspeicher+ Batterie	279
Tabelle 109:	Value Proposition für PtX Anwendungen	280
Tabelle 110:	Bewertung GM Bausteine für zentrale Rückeinspeisung mit PtX	281
Tabelle 111:	Bewertung GM Bausteine für zentrale Speicherung mit PtX	283
Tabelle 112:	Bewertung GM Bausteine für zentrale synthetische Treibstoffe mit PtX	284

Abkürzungsverzeichnis

ASE	Academia de Studii Economice din Bucuresti (Bucharest University of Economic Studies)
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
bdew	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BEV	Batterie Fahrzeug (Battery Electrical Vehicle)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMU	Bundesministerium für Umwelt
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BZ	Brennstoff Zelle
C	Kohlenstoff
CHP	Blockheizkraftwerk (Combined heat and power)
COP	Leistungszahl (Coefficient of Performance)
CO ₂	Kohlendioxid (Carbon dioxide)
CPC	thermischer Hochtemperatur-Solarsysteme (CPC)
DENA	Deutsche Energie Agentur
DIN	Deutsche Industrie Norm
DLR	Deutsche Luft und Raumfahrt Zentrum
DWV	Deutscher Wasserstoff Verband
e.g.	exempli gratia (zum Beispiel)
EBPD	Gebäuderichtlinie
EE	Erneuerbare Energie
EEA	European Environment Agency
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEQ	Erneuerbare Energie Quelle
EnEV	Energie Einspar Verordnung
et al.	et alii (und weiter)
etc.	et cetera (und so weiter)
EU	European Union
FCH	Brennstoffzellenheizgerät (Fuel Cell Heating)
FCEV	Brennstoffzellen Fahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle)
GEMIS	Globales Emission Modell
GM	Geschäftsmodell
GuD	Gas und Dampfturbinen Kraftwerk
GW	Gigawatt Leistung
GWh	Gigawatt Stunden
GWh/a	Gigawatt Stunden pro Jahr
H ₂	Wasserstoff (Hydronium)
ICE	Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine)
IEA	Internationale Energie Agentur
Ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Standardization Organization

K	Kelvin (Temperatur Differenz)
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm Gewicht
kJ	Kilo Joule Energieeinheit
kW	Kilowatt Leistung
kWh	Kilowatt Stunden
kWh _{el}	Kilowatt Stunden – Electric Energy
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LCOE	Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy)
LKW	Lastkraftwagen
MTOE	Mega Tons Oil Equivalent
Nm ³	Norm Kubikmeter
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
OPEC	Erdölproduzierende Staaten
ÖNV	Öffentlicher Nahverkehr
PEE	Primäre Energie Einheit
PEMFC	Proton Exchange Membrane Brennstoffzelle (Fuel Cell)
ppm	parts per million
PV	Photovoltaik
PtX	Power zu X (Umwandlung von elektrischer Energie in unterschiedliche Energieformen (Gas, Flüssige Treibstoffe, Wärme etc.))
PWh	Petawatt Stunden
RE	Renewable Energy (erneuerbare Energie)
RES	Regenerative Energie Systeme
SO _x	Schwefel Oxid
SPF	Jahresarbeitszahl (Seasonal Performance Factor)
SPSS	Statistisches Softwarepaket von IBM
SWOT	Strength-Weaknesses-Opportunities-Threats analysis
tCO ₂	tons of Carbon dioxide
TCO	Total Cost of Ownership (Lebenszykluskosten)
Toe	Tonne Öl Äquivalent
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TWh	Terrawatt Stunden
UBA	Umwelt Bundesamt (German Federal Environment Agency)
UN	United Nations (New York, USA)
ZSW	Zentrum für Solar und Wasserstoff Forschung

Zusammenfassung

Water is the Coal of the Future (Jules Verne 1870)

Ziel einer jeder Unternehmensführung ist es, das eigene Unternehmen profitabel und langfristig im Markt einzurichten. Die Funktionsweise eines Unternehmens wird in der Wirtschaftswissenschaft mithilfe von Geschäftsmodellen (GM) beschrieben. Diese beschreiben, in welcher Form ein Unternehmen für Kunden und Geschäftspartner einen Nutzen stiftet und wie die so generierten Umsätze in das Unternehmen zurückfließen, um dieses profitabel und langfristig am Markt zu halten.

Aufgabe und Ziel der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit ist es, mögliche Geschäftsmodelle für grünen Wasserstoff (H_2) im stationären und mobilen Anwendungsbereich darzustellen und bewerten.

Eine mögliche Einteilung von H_2 -Geschäftsmodellen wird aus den drei Energiesektoren Elektrizität, Wärme und Mobilität abgeleitet. Dabei werden die spezifischen Bausteine/Elemente nach dem Geschäftsmodell von Osterwalder und Pigneur verwendet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Baustein des Value Proposition oder auch Wertversprechen bzw. Nutzenversprechen. Damit können charakteristische Eigenschaften heutiger und zukünftiger innovativer Geschäftsmodelle im Bereich grüner H_2 dargestellt, beschrieben und bewertet werden, um möglichst erfolgreiche Geschäftsmodelle zu entwickeln und zu implementieren.

Ohne die Ressource Energie gäbe es die heutigen industriellen Volkswirtschaften in heutiger Form nicht. Fossile Energieträger wie Öl, Kohle und Gas gelten als wichtigstes Gut in unseren globalen Volkswirtschaften. Dabei kann H_2 als grüner sekundärer Energieträger durch die aktuell stattfindende Transformation von einer fossilen in eine erneuerbare Energieinfrastruktur eine bedeutende Rolle zukommen.

Der rasante Ausbau erneuerbarer Energiequellen in den letzten zwei Dekaden, bedingt durch technologische, politische, soziale, ökologische und ökonomische Faktoren, hat unsere Energieinfrastruktur bereits fundamental verändert. Mit dem Wandel von einer kohlenstoffgetriebenen hin zu einer dekarbonisierten, nachhaltigen und hocheffizienten Energieinfrastruktur werden auch Änderungen unserer heutigen industriellen Volkswirtschaften einhergehen, und zwar auf der mikro- wie auch makroökonomischen Ebene.

Diese Änderungen werden technische, sozioökonomische, wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen haben. Heutige wirtschaftswissenschaftliche Methoden und Modelle im Energiebereich sind überholt und müssen den zukünftigen Anforderungen angepasst werden. So wird eine neue interdisziplinäre Sichtweise benötigt, um die neuen zur Verfügung stehenden Energietechnologien ökonomisch und ökologisch in die

noch zur Verfügung stehenden Strukturen zu integrieren und zu diesem Zweck zu adaptieren.

Zwei technologische Bereiche, die im Rahmen der Energiewende eine große Rolle spielen werden, sind das Internet (Internet 4.0, Digitalisierung, Internet der Dinge) und die Dekarbonisierung, also die Umstellung der fossilen Energiesysteme, die durch die Klimakonferenz in Paris Ende 2015 vorangetrieben wurde. Beide Bereiche werden zukünftig zum *Internet der Energie* verschmelzen.

Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung werden die Energiesektoren Mobilität, Wärme und Elektrizität zukünftig grundlegend verändern. Es ist absehbar, dass die heutige konventionelle Energieumwandlung durch ineffiziente zentrale Großkraftwerke in einigen Jahrzehnten der Vergangenheit angehören werden.

Um die fossilen Energieträger zu reduzieren und den Einsatz erneuerbarer Energiequellen voranzutreiben, sind neue Energiekonzepte erforderlich. Zukünftig müssen Tausende neuer hocheffizienter dezentraler Energiesysteme, die mit erneuerbaren Energiequellen betrieben werden, installiert und vernetzt werden. Diese Systeme müssen in der zukünftigen Energieinfrastruktur organisiert und verwaltet werden. Die neuen Betreiber werden zukünftig Energie konsumieren sowie produzieren. Diese neue Klasse von Prosumenten wird auf dem Energiemarkt neu auftreten. Dabei sind in den neuen hocheffizienten dezentralen Energiesystemen Verknüpfungen über innovative Netzwerktechnologien unabdingbar. In den neuen dezentralen Systemen wird zukünftig eine Vielzahl an Daten gespeichert. Diese Informationen über Smart-X-Systeme zusammenzufassen und als Ganzes im Energienetz zu steuern und zu regeln wird künftig eine große Herausforderung sein, die aber auch enorme Chancen für Unternehmen eröffnen kann. Die großen Mengen an Daten (Big Data) erfordern neue und intelligente verbundene Kommunikationsnetze. Die sich so eröffnenden Chancen mit erfolgreichen innovativen Geschäftsmodellen zu nutzen ist die Aufgabe aller Akteure und Entrepreneurere in diesen Geschäftsfeldern.

Die unterschiedlichen erneuerbaren Energiequellen stellen volatile Energie in einer viele Tausend Mal höheren Menge zur Verfügung, als global pro Jahr benötigt wird. Die volatilen Eigenschaften der erneuerbaren Energiequellen werden durch innovative Technologien und Speicherlösungen immer effizienter, ökonomisch vorteilhafter und stabiler regelbar und damit für die Energieinfrastrukturen berechenbarer zur Verfügung gestellt. Heute können Endkunden bereits zu den aktuellen Strombezugskosten selbst Energie erzeugen, z. B. mithilfe von Photovoltaiksystemen. Diese sogenannte Netzparität (Grid Parity) ist bereits heute in mehr als 80 % der Energiemärkte global gesehen erreichbar. Studien belegen das Potenzial weiterer Kostenreduzierungen aus heutiger Sicht von über 50 % bis 2030. Dadurch sind die Stromgestehungskosten für erneuerbare Energiesysteme niedriger als für alle konventionellen Energiesysteme. Das eröffnet ein

neues riesiges Marktpotenzial für innovative und hocheffiziente Anwendungen im privaten, öffentlichen und industriellen Bereich.

Als möglicher Energieträger wird dabei grünem H₂ eine Schlüsselrolle zu kommen. H₂ als grüner nachhaltiger sekundärer Energieträger wird als *Bindeglied* zwischen den erneuerbaren volatilen Energiequellen und den hocheffizienten dezentralen Energieumwandlungssystemen fungieren. H₂ kann in beliebigen Mengen produziert, gespeichert und auf lange Strecken ohne Verluste transportiert werden.

Die primären erneuerbaren Energiequellen wie Wind- und Solarenergie stehen für jedermann *kostenlos* zur Verfügung. Seit nunmehr einigen Jahren sind durch innovativen Fortschritt und *exponentielle* Wachstumsraten Solarzellen (Photovoltaik-Systeme) und Windkraft kostengünstiger umzuwandeln, als fossile Brennstoffe in heutigen konventionellen Kraftwerken. Diese regenerativen Energiequellen wie Solar, Wind und Biomasse sind der Schlüssel für die H₂-Herstellung in der Zukunft. Damit besteht das erste Mal die Möglichkeit, H₂ als konkurrenzfähiger, alternativer und nachhaltiger grüner Sekundärenergieträger in ausreichenden Mengen zu generieren und dezentral als Substitut für die heutigen fossilen Energieträger zur Verfügung zu stellen.

Dies hat zukünftig wirtschaftliche, technische und soziale Auswirkungen auf alle Energielieferanten und Energienutzer in privaten, öffentlichen und industriellen Bereichen.

Der Einsatz von „grünem“ H₂ als Bindeglied in den drei Energiesektoren kann umwelt- und gesundheitsschädliche Emissionen von Treibhausgasen, NO_x und Feinstaub reduzieren und verhindern. Eine starke Reduzierung ist notwendig, um den Klimawandel noch zu kontrollieren und seine Folgen wie die der Energieabhängigkeit regional wie global mit allen daraus resultierenden gesellschaftlichen Konflikten (Migration, Kriege durch Energieabhängigkeiten) zu minimieren.

H₂ als grüner nachhaltiger Energieträger kann nur erfolgreich eingesetzt werden, wenn bestimmte Marktmechanismen von Angebot und Nachfrage dabei in Kraft gesetzt werden. H₂ muss somit als grüner Energieträger für Anwendungen rund um H₂ unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Markt in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen. Aus unternehmerischer Sicht können durch neue innovative Geschäftsmodelle Produkte und Dienstleistungen erfolgreich in die unterschiedlichen betrachteten Marktsegmente implementiert werden.

Für Geschäftsmodelle gilt gleichermaßen, was alle Modelle auszeichnet: Sie können aufgrund der realen Komplexität nur Teile eines gesamten Unternehmens und seiner Umwelt darstellen und beschreiben. Deshalb ist es bei der Modellierung wichtig, die Komplexität auf die wesentlichen Parameter zu reduzieren.

Diese Parameter oder Eigenschaften im grünen H₂-Kontext zu katalogisieren und zu bewerten ist die Aufgabe dieser Arbeit. Dafür werden unterschiedliche zur Verfügung stehende Instrumente angewandt. Simulationsprogramme (z. B. für PV-Systeme, Kraft-

Wärmekopplung, Gebäudehüllen, Heizungstechniken) und speziell entwickelte ökonomische und ökologische Modelle sollen helfen, Aussagen zu den charakteristischen Eigenschaften (wie Verbräuche, Energiekosten, Kundennutzen, Komplexität, Risiken, Handhabung und Umweltbelastungen) zu machen. Die Resultate werden anschließend mit unterschiedlichen Methoden ausgewertet und verglichen, um die Forschungsfragen beantworten zu können.

Neue Erkenntnisse zur Nutzung und Anwendung von grünem H₂ als sekundärem nachhaltigem Energieträger sollen helfen, bestehende und zukünftige Geschäftsmodelle auf Relevanz zu prüfen, zu überarbeiten, neu zu entwickeln, besser zu verstehen und erfolgreicher zu implementieren.