

1 Einleitung

Introduction

Zu den größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts gehören der Klimawandel und seine Folgen¹. Die Politik sieht sich durch zunehmenden öffentlichen Druck gezwungen, stets neue Klimaschutzziele auszurufen und weitere Klimaschutzmaßnahmen zu beschließen^{2,3}. Innerhalb des sogenannten „Green Deal“ hat die europäische Union (EU) deshalb beschlossen, bis zum Jahre 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen⁴. Bis spätestens 2060 soll auch in anderen Regionen der Welt, zum Beispiel in China, Japan oder den USA Klimaneutralität erreicht werden^{5,6,7}. Die Schaffung von emissionsfreien und energieeffizienten Möglichkeiten der Energiegewinnung, -speicherung und -nutzung ist dabei ein wesentlicher Schritt zur Klimaneutralität⁸.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Initial situation and problem definition

Die Brennstoffzellentechnologie gilt insbesondere für die Dekarbonisierung von Nutzfahrzeugen, Schiffen, Zügen und auch großen Personenkraftwagen (PKW) als eine vielversprechende Option⁹. Alternativ zu Brennstoffzellenfahrzeugen („Fuel Cell Electric Vehicle“, FCEV) ermöglichen auch batterieelektrisch-betriebene Fahrzeuge („Battery Electric Vehicle“, BEV) emissionsfreien Transport¹⁰. Aufgrund ihrer niedrigeren Anschaffungs- und Unterhaltskosten verzeichnen BEVs aktuell einen größeren Marktanteil und ein schnelleres Marktwachstum. Die Nachfrage nach FCEVs ist deutlich geringer, obwohl höhere Reichweiten und kürzere Auftank- bzw. Ladezeiten realisierbar sind.^{11,12} Hohe Kosten bei der Herstellung der benötigten Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEM-Brennstoffzellen) werden häufig als Ursache für die geringe Nachfrage aufgeführt.¹³ PEM-Brennstoffzellen müssen zur Erzielung einer signifikanten Marktdurchdringung somit langfristig kostenseitig konkurrenzfähig sein^{14,15}.

Trotz der bisher geringen Nachfrage ist die globale jährliche Produktion von PEM-Brennstoffzellensystemen im Bereich Transport nach Angaben der Londoner Strategieberatung E4TECH seit dem Jahr 2015 von 114 MW/Jahr um das Achtfache im Jahr 2020 auf 994 MW/Jahr

¹ Vgl. EU Commission (Europe's 2030 Climate Ambition), 2020, S. 1.

² Vgl. Carrington (UN Global Climate Poll), 2021, S. 1ff.

³ Vgl. Hydrogen Council (Path to Hydrogen Competitiveness), 2020, S. iv.

⁴ Vgl. EU Commission (The European Green Deal), 2019, S. 2.

⁵ Vgl. BBC News (China Aims for Carbon Neutrality by 2060), 2020, S. 1ff.

⁶ Vgl. Joe Biden for President (Plan for Climate Change and Environmental Justice), 2020, S. 1.

⁷ Vgl. The Guardian (Japan will Become Carbon Neutral by 2050), 2020, S. 1f.

⁸ Vgl. Töpler et al. (Wasserstoff und Brennstoffzelle), 2017, S. 64.

⁹ Vgl. FCH2JU (Hydrogen Roadmap Europe), 2019, S. 25.

¹⁰ Vgl. Tuan et al. (Vehicles with Alternative Energy Sources), 2018, S. 2536f.

¹¹ Vgl. NOW GmbH (Factsheet: Hydrogen and Fuel Cell Technology in China), 2020, S. 1.

¹² Vgl. Olabi et al. (Fuel Cell Application in the Automotive Industry), 2021, S. 7.

¹³ Vgl. Wang et al. (Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization), 2018, S. 355.

¹⁴ Vgl. Kampker et al. (Challenges towards Large-Scale Fuel Cell Production), 2020, S. 29292.

¹⁵ Vgl. James et al. (Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems), 2018, S. 5.

gestiegen^{16,17,18}. Dies entspricht einer Erhöhung der jährlichen Fahrzeugneuzulassungen um 300%. Zukünftige Marktentwicklungen lassen sich aus öffentlich verfügbaren Strategiepapieren globaler Regierungen ableiten. So legt beispielsweise die HYDROGEN ROADMAP EUROPE Ziele für brennstoffzellenbetriebenen Verkehr bis zum Jahr 2030 für PKW, Nutzfahrzeuge und Züge in Europa fest. Es werden Flottengrößen von 3,7 Mio. PKW, 500.000 leichten Nutzfahrzeugen, 45.000 schweren Nutzfahrzeugen und 570 Zügen prognostiziert, woraus sich bis 2030 ein mittlerer Bedarf von ca. 425.000 neuen Brennstoffzellensystemen jährlich in Europa ableiten lässt.^{19,20} In Japan werden bis zum Jahre 2030 800.000 PKW und 1.200 Busse angestrebt, während in Korea bis zum Jahre 2040 rund 3 Mio. Fahrzeuge mit Wasserstoff betrieben sein sollen. China hat das Ziel von 1 Mio. FCEV bis zum Jahre 2030 ausgerufen.^{21,22,23} In den USA geht die FUEL CELL & HYDROGEN ENERGY ASSOCIATION (FCHEA) von 1,5 Mio. jährlich produzierten Wasserstofffahrzeugen im Jahre 2030 aus.²⁴ Auf Basis dieser öffentlich verfügbaren Informationen scheint bereits in wenigen Jahren ein Weltmarkt von einigen hunderttausend verkauften Brennstoffzellensystemen pro Jahr realistisch.

Aus den oben genannten Ausführungen der Firma E4TECH geht hervor, dass zum aktuellen Zeitpunkt jährlich im Bereich Transport umgerechnet ca. 10.000 Brennstoffzellensysteme mit einer Leistung von je 100 kW gefertigt werden. Die zugrundeliegenden Produktionsprozesse der Hersteller basieren dabei noch maßgeblich auf manuellen Vorgängen²⁵. Aktuelle Modellierungen der Kosten von Brennstoffzellensystemen zeigen darüber hinaus, dass Kostensenkungen in hohem Maße mit der Steigerung produzierter Stückzahlen einhergehen. So prognostizieren JAMES ET AL. Kostenersparnisse von 6% durch die Aktualisierung des Produktdesigns, während durch die Steigerung der Ausbringungsmenge von 1.000 auf 20.000 Brennstoffzellensysteme pro Jahr laut Angaben eine Senkung der Produktkosten um 65% möglich ist (siehe Abbildung 1.1).

¹⁶ Der Begriff „Brennstoffzellensystem“ wird in Kapitel 2.1.1 erläutert.

¹⁷ „Transport“ beinhaltet hier Unmanned Aircraft Vehicle (UAV), PKW, Busse und Flurförderfahrzeuge.

¹⁸ Vgl. E4tech Ltd (The Fuel Cell Industry Review), 2020, S. 40.

¹⁹ Vgl. FCH2JU (Hydrogen Roadmap Europe), 2019, S. 9.

²⁰ Da sich die Leistungsklassen der Brennstoffzellensysteme je Anwendung unterscheiden, ist hier lediglich eine ungefähre Angabe möglich.

²¹ Vgl. Ministry of Economy, Trade and Industry (Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells), 2019, S. 2.

²² Vgl. Ministry of Trade, Industry and Energy (Hydrogen Economy Roadmap of Korea), 2019, S. 7f.

²³ Vgl. NOW GmbH (Factsheet: Hydrogen and Fuel Cell Technology in China), 2020, S. 3.

²⁴ Vgl. FCHEA (Road Map to a US Hydrogen Economy), 2019, S. 74.

²⁵ Vgl. Kampker et al. (Challenges towards Large-Scale Fuel Cell Production), 2020, S. 29293.

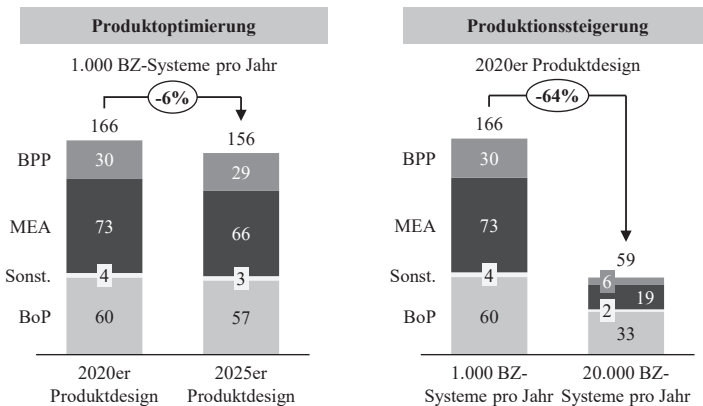


Abbildung 1.1: Prognostizierte Kostensenkung von Brennstoffzellensystemen nach Produktoptimierung und Produktionssteigerung²⁶

Diese Kostensenkungen durch Steigerung der Produktionsmenge werden gemeinhin auch als „Economies of Scale“ oder „Skaleneffekte“ bezeichnet.²⁷ So rechnen PORSTMANN ET AL. mit einer Reduktion der Kosten von Brennstoffzellenstacks um 50% durch Skaleneffekte.^{28,29} Auch MAYYAS ET AL. und BERNHART ET AL. schreiben Skaleneffekten im Bereich der Brennstoffzellenproduktion Kostensenkungen zu.^{30,31} Da eine Steigerung der Produktionsmengen jedoch unmittelbar mit der Nachfrage verbunden ist, existiert ein sogenanntes „Henne-Ei-Problem“. Solange eine wirtschaftliche Nutzung von Brennstoffzellensystemen nicht möglich ist, existiert keine ausreichende Nachfrage. Ist die Nachfrage nicht ausreichend, werden Produktionskapazitäten nicht erhöht.³² Zur Lösung dieses Problems können zum einen finanzielle Anreize seitens staatlicher Einrichtungen zum Kauf der Produkte geschaffen oder zum anderen Weiterentwicklungen des Produktes oder der Produktionstechnik durch Forschung und Entwicklung durchgeführt werden.

In der Praxis fehlen Ansätze zur Veränderung aktueller Fertigungstechnologien von Brennstoffzellensystemen hinsichtlich größerer Stückzahlen und der frühen Erzielung von Skaleneffekten. Für eine beschleunigte Erzielung von Skaleneffekten ist es einerseits notwendig, die Hauptkostentreiber von Brennstoffzellensystemen zu kennen und andererseits technische Maßnahmen abzuleiten, die entsprechend individuellen Ausbringungsmengen höchste Kosteneinsparungen versprechen. An diesen Stellen setzt die vorliegende Arbeit an und betrachtet neben einer techno-ökonomischen Modellierung Möglichkeiten zur Ableitung von technischen

²⁶ Vgl. James et al. (Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems), 2018, S. 39ff.

²⁷ Für die Begriffsdefinition „Skaleneffekte“ siehe Kapitel 2.3.2.

²⁸ Der Begriff „Brennstoffzellenstack“ wird in Kapitel 2.1.1 erläutert.

²⁹ Vgl. Porstmann et al. (Mass Manufacturing Machine for the Assembly of PEMFC Stacks), 2019, S. 66.

³⁰ Vgl. Mayyas et al. (Emerging Manufacturing Technologies for Fuel Cells and Electrolyzers), 2019, S. 510.

³¹ Vgl. Bernhart et al. (Fuel Cells), 2014, S. 9.

³² Vgl. Dolci et al. (Incentives and Legal Barriers for Power-to-Hydrogen Pathways), 2019, S. 11397.

Änderungsmaßnahmen im Sinne der beschleunigten Nutzung von Skaleneffekten in der Produktion von PEM-Brennstoffzellensystemen.

1.2 Zielsetzung

Objective

Auf Grundlage der formulierten Ausgangssituation und Problemstellung ist das Ziel dieser Arbeit, die Kosten individueller Brennstoffzellensysteme zu modellieren und technische Änderungsmaßnahmen in der Produktion zur Nutzung von Skaleneffekten abzuleiten. Anwendende sollen die Ergebnisse dieser Arbeit durch die Bereitstellung einer Methodik für eigene Anwendungsfälle nutzen und somit einen Beitrag zur Kostensenkung von Brennstoffzellensystemen leisten können. Die übergeordnete Zielsetzung lautet folglich:

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist, am Beispiel von PEM-Brennstoffzellensystemen eine Methodik zur systematischen Veränderung von Fertigungstechnologien hinsichtlich der beschleunigten Nutzung von Skaleneffekten zu erstellen und somit einen Beitrag zu deren Kostensenkung zu leisten.

Die entwickelte Methodik adressiert technische und ökonomische Entscheidungsträger innerhalb von Unternehmen, die sich entlang der Wertschöpfungskette von Brennstoffzellensystemen positionieren oder noch positionieren möchten. So können Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus die Methodik zur Entwicklung innovativer Anlagentechnik nutzen und somit einen Marktvorteil gegenüber ihrem Wettbewerb erlangen. Produzierende Unternehmen innerhalb der Brennstoffzellenbranche können die Methodik darüber hinaus nutzen, um die eigene Produktion hinsichtlich sinkender Kosten zu optimieren. Zur Erarbeitung der übergeordneten Zielsetzung sind folgende Teilziele zu erreichen:

- Formulierung des praktischen Handlungsbedarfes durch Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Herstellung von Brennstoffzellensystemen und ihren Kosten.
- Aufbereitung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse und Methoden aus den Bereichen Kostenmodellierung und Ableitung innovativer Prozesstechnologien.
- Erstellung einer Aufbau- und Ablaufstruktur zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für die zu entwickelnde Methodik.
- Entwicklung eines strukturierten Lösungsvorgehens zur techno-ökonomischen Modellierung von Brennstoffzellensystemen und zur systematischen Ableitung technischer Änderungsmaßnahmen.
- Validierung der Ergebnisse im Rahmen einer praktischen Anwendung.

Im Sinne einer zielgerichteten Forschung empfiehlt KUBICEK die Formulierung grundlegender Forschungsfragen.³³ Die Hauptforschungsfrage für diese Arbeit lautet demnach wie folgt:

³³ Vgl. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen), 1976, S. 14f.

Wie können zunehmende Skaleneffekte in der Brennstoffzellensystemproduktion mittels technischer Änderungsmaßnahmen beschleunigt werden?

Abbildung 1.2: Handlungsleitende Forschungsfrage

1.3 Forschungsansatz

Research approach

Den wissenschaftstheoretischen Grundlagen nach ULRICH UND HILL folgend wird Wissenschaft in Formal- und Realwissenschaften unterteilt. Dabei bestehen die Realwissenschaften aus „reinen“ Grundlagenwissenschaften und „angewandten“ Handlungswissenschaften, siehe Abbildung 1.3. Die Formalwissenschaften widmen sich dabei der Gestaltung und Verwendung von Zeichensystemen, die innerhalb der Philosophie, der Logik und der Mathematik zu finden sind. Die Realwissenschaften behandeln die Erklärung wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte ebenso wie die Analyse menschlicher Handlungsalternativen. „Reine“ Grundlagenwissenschaften haben die Erklärung empirischer Wirklichkeitsausschnitte zum Ziel, während „Angewandte“ Handlungswissenschaften die Analyse menschlicher Handlungsalternativen verfolgt.³⁴ Die Naturwissenschaften Biologie, Chemie und Physik werden dabei den Grundlagenwissenschaften zugeordnet, während die Sozialwissenschaften und die Betriebswirtschaftslehre den Handlungswissenschaften entsprechen.³⁵ Die Ingenieurwissenschaften werden nach ULRICH UND HILL den Handlungswissenschaften zugeordnet, gelten jedoch teilweise auch als Schnittstelle zwischen den Grundlagen- und Handlungswissenschaften.^{36,37}

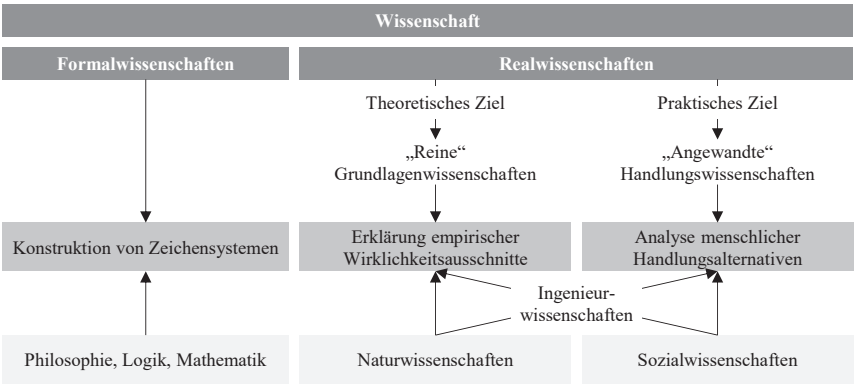


Abbildung 1.3: Wissenschaftssystematik nach ULRICH UND HILL³⁸

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht aus der systematischen Ableitung technischer Änderungsmaßnahmen mit Hinblick auf die Erzielung von Skaleneffekten in der Produktion. Die

³⁴ Vgl. Ulrich et al. (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305.
³⁵ Vgl. Schön (Skalierbare Technologieketten für die Großserienproduktion von Brennstoffzellen), 2022, S. 7.
³⁶ Vgl. Ulrich et al. (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305.
³⁷ Vgl. Wessel (Prüfprozess zur Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess der Li-Io-Batterie), 2020, S. 5.
³⁸ Vgl. Ulrich et al. (Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre), 1976, S. 305f.

Methodik unterstützt dabei einerseits die Erklärung empirischer Wirklichkeitsausschnitte durch mathematische Modellierung und andererseits die Analyse menschlicher Handlungsalternativen durch eine systematische Priorisierung der Änderungsmaßnahmen. Da ein starker Bezug zu den Ingenieurwissenschaften besteht, ist diese Arbeit den Realwissenschaften zuzuordnen. Dementsprechend wird dieser Arbeit der wissenschaftstheoretische Ansatz nach ULRICH zugrunde gelegt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Thesis structure

Der Grobaufbau der vorliegenden Arbeit basiert auf den sieben Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH. Abbildung 1.4 zeigt diesen Aufbau.

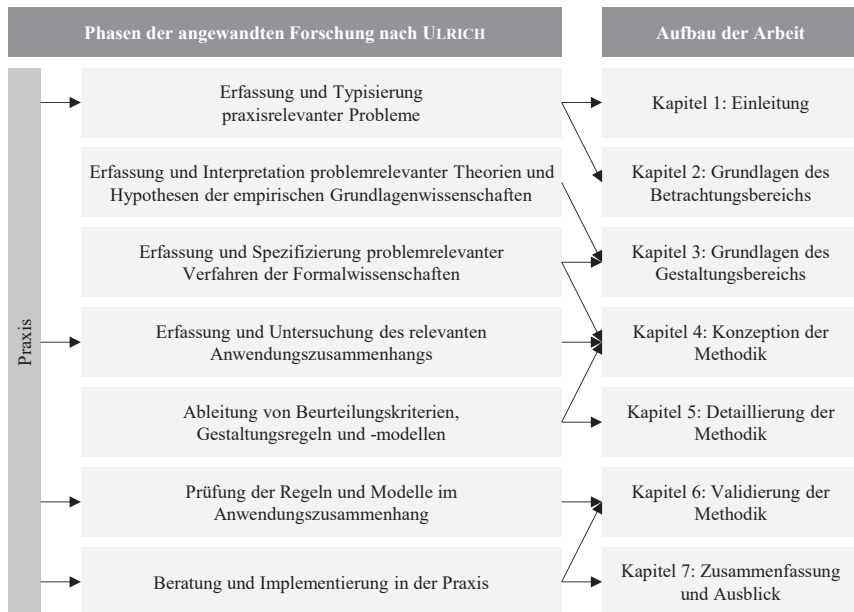


Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit

Kapitel 1 beinhaltet die Einleitung des Themenfeldes und die Zielsetzung der Arbeit. Des Weiteren wird die Forschungsmethodik dargestellt, die übergeordnete Forschungsfrage formuliert und eine Übersicht der Inhalte gegeben. In Kapitel 2 erfolgt die Erläuterung der Grundlagen des Betrachtungsbereiches und die Herleitung des Praxisbedarfes. Nach der Definition der Wertschöpfungskette von PEM-Brennstoffzellensystemen werden Grundlagen zur Kostenrechnung sowie Skaleneffekte in Produktionssystemen erläutert. Es werden die Kernherausforderungen der Praxis beschrieben und schließlich der praktische Handlungsbedarf abgeleitet. Dieser wird in Kapitel 3 in Anforderungen an die Theorie überführt, woraufhin die Analyse bestehender Ansätze in der Literatur folgt. An dieser Stelle werden insbesondere Ansätze der

Bereiche Produktionskostenschätzung sowie -degression und Ableitung innovativer Produktionstechnologien behandelt. Nach Formulierung des Handlungsbedarfes aus der Theorie erfolgt die Detaillierung der in der Einleitung gestellten Forschungsfrage. Kapitel 4 dient der Erstellung des Grobkonzeptes der Methodik. Im Anschluss an die Betrachtung methodischer Grundlagen wird das Grobkonzept durch Erstellung einer Aufbau- und Ablaufstruktur definiert. Ein Zwischenfazit dient der kritischen Reflexion erfüllter Anforderungen an die Theorie aus dem vorigen Kapitel. Kapitel 5 beinhaltet die Detaillierung des Grobkonzeptes durch Ausarbeitung der vier Kernmodule zur Initiierung, Analyse, Gestaltung und Bewertung. Die Inhalte dieses Kapitels erläutern die mathematische Struktur eines techno-ökonomischen Modells sowie das methodische Vorgehen zur Ableitung und Bewertung von Technologieveränderungen im Sinne der Nutzung von Skaleneffekten. In Kapitel 6 wird die Methodik anhand eines beschriebenen Anwendungsfalls validiert und kritisch reflektiert. Es erfolgt die Ableitung erster Handlungsempfehlungen zur Veränderung der Technologien innerhalb des Anwendungsfalls. Die Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und die Beschreibung weiterer Forschungsbedarfe schließen die vorliegende Arbeit in Kapitel 7 ab.