

1 Einleitung

Die fortschreitende Verknappung fossiler Ressourcen, welche zudem bei ihrer Verbrennung klimaschädliche Emissionen freisetzen, führen zu einer stark ansteigenden Bedeutung der Dekarbonisierung durch Elektrifizierung von bisher fossil-basierten Technologien.¹ Eine der größten Herausforderungen, vor der unser Planet heute steht, betrifft die anthropogene Klimakrise und deren untrennbaren Zusammenhang mit dem gegenwärtigen und zukünftigen Energiebedarf der Menschheit.² Der Verkehrssektor ist für ca. ein Fünftel der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich, wovon ca. 45% auf den straßengebundenen Personen- und 29% auf den Gütertransport zurückgehen.³ Insgesamt wird demnach ein Anteil von ca. 15% der gesamten CO₂-Emissionen vom straßengebundenen Verkehr verursacht, sodass der Bedarf nach neuen, sauberen Antriebstechnologien offensichtlich ist. Hinzu kommen höhere Anforderungen und Regulierungen in Bezug auf Luftqualität in den wachsenden und sich verdichtenden Städten. Daher sprechen neben der durch den exzessiven Ausstoß von Treibhausgasen vorangetriebenen Erderwärmung weitere Vorteile für emissionsfreie Fahrzeuge.⁴ Nicht zuletzt ist von hoher Bedeutung, inwiefern sich die Industrie auf neue Technologien einstellen und hieraus neue Wertschöpfungsketten entwickeln kann, um auch sozioökonomische Hürden zu überwinden.⁵ Die Welt braucht ein Gesamtkonzept nachhaltiger Mobilität.⁶

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Als die beiden aussichtsreichsten Technologien im Bereich der alternativen Fahrzeugantriebe werden batteriebetriebene Fahrzeuge (engl. „battery electric vehicles“, BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (engl. „fuel cell electric vehicles“, FCEV) gesehen.⁷ Da FCEV im Betrieb außer Wasser keinerlei Abgase ausstoßen, ist ihr Potenzial in Bezug auf CO₂-Reduktion und Verbesserung der innerstädtischen Luftqualität dem der BEV gleichzusetzen.⁸ Vorteilhaft erweisen sich FCEV in der höheren Energiespeicherdichte des Wasserstoff-Tanksystems im Vergleich zu Batteriesystemen in BEV, für das zudem die Betankungszeit nur wenige Minuten beträgt.⁹ Für

¹ Vgl. Kampker (Elektromobilproduktion) 2014, S. 1.

² Vgl. Edwards et al. (Hydrogen and fuel cells) 2008, S. 1.

³ Vgl. Ritchie (CO₂ emissions from transport) 2020, S. 1.

⁴ Vgl. Bollmann et al. (From CO₂ neutral fuels to emission-free driving) 2017, S. 10f.

⁵ Vgl. Edwards et al. (Hydrogen and fuel cells) 2008, S. 1.

⁶ Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 15.

⁷ Vgl. Adolf et al. (Energie der Zukunft) 2017, S. 45f.

⁸ Vgl. Miotti et al. (Integrated environmental and economic assessment) 2017, S. 95; vgl. Salchenegger (Emissionen von Wasserstofffahrzeugen) 2006, S. 13.

⁹ Vgl. Adolf et al. (Energie der Zukunft) 2017, S.45.

beide Arten von Elektrofahrzeugen gilt, dass der Markterfolg im Wesentlichen von ihrer Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb abhängt.¹⁰ Für mobile Anwendungen sind aufgrund ihrer Eigenschaften wie Betriebstemperatur und Effizienz nahezu ausschließlich Polymer-Elektrolyt-Membran(PEM)-Brennstoffzellen relevant, andere Typen von Brennstoffzellen spielen hier eine stark untergeordnete Rolle.¹¹ Potenziale innerhalb der mobilen Anwendungen ergeben sich dabei im straßengebundenen Verkehr zum einen für den Bereich der PKW, insbesondere in der Oberklasse, sowie für leichte und schwere Nutzfahrzeuge, da hier auch größere Reichweiten emissionsfrei zu realisieren sind, welche rein batterieelektrisch aus Gewichtsgründen in absehbarer Zukunft nicht erreichbar erscheinen.¹²

Die Brennstoffzellentechnologie ist Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten der vergangenen Jahrzehnte,¹³ und die Zahl der veröffentlichten Patente ist stetig gestiegen: Insgesamt wurden im Jahr 2019 oder früher 839.367 Patente mit dem Stichwort „fuel cell“ beim Europäischen Patentamt veröffentlicht, was gegenüber der Anzahl von 633.160 Patenten mit dem Stichwort „lithium ion battery“ im identischen Zeitraum hoch erscheint. Trotz der Stärken der FCEV konnten sie jedoch bisher keinen signifikanten Marktanteil erreichen.¹⁴

Bestehende Hemmnisse für einen großflächigen Durchbruch der Brennstoffzellentechnologie wurden am Chair of Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen in einer Expertenstudie untersucht. Aus qualitativen Experteninterviews identifizieren KAMPKER ET AL. organisatorische, ökonomische und technologische Faktoren, die die Marktdurchdringung einer Brennstoffzelle hemmen.¹⁵ Um die technologischen Faktoren tiefer zu verstehen, wurde aufbauend auf den Erkenntnissen eine quantitative fragebogenbasierte Erhebung mit $n = 54$ Teilnehmenden aus Industrie und Forschung durchgeführt.

Aus Sicht der technologischen Hemmnisse kann zwischen produkt- und prozessbezogenen Faktoren unterschieden werden. Auf der Produktseite steht die für die Marktdurchdringung erforderliche Funktionalität der Brennstoffzellen im Vordergrund, zunächst ohne Berücksichtigung der kostengünstigen Herstellbarkeit. Auf der Prozessseite ist die Herstellbarkeit von Brennstoffzellen von besonderem Interesse, da diese für eine Großserienproduktion gegeben sein muss.

Produktseitig haben viele Herausforderungen, die für eine zuverlässige und alltagstaugliche Brennstoffzelle relevant sind, in den letzten Jahren erhebliche Entwicklungsfortschritte erfahren. Das Problem des Einfrierens von Restwasser in der Brennstoffzelle bei Temperaturen unter $0^\circ C$, das zu irreversiblen Schäden an der Membran führen kann, ist heute weitgehend gelöst.¹⁶ Auch das in den letzten Jahren häufig zitierte Problem eines hohen Edelmetallanteils im Katalysator, der sich auch deutlich auf die Kosten auswirken würde, ist nicht mehr die zentrale Herausforderung: So gibt Daimler an, dass der Platingehalt des Stacks im GLC F-Cell ab 2018 um 90% geringer gegenüber dem Stack der B-Klasse aus dem Jahr 2010 ausfällt,¹⁷ sodass dieser in der

¹⁰ Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2018, S. 1.

¹¹ Vgl. Abschnitt 2.1.

¹² Vgl. Bollmann et al. (From CO2 neutral fuels to emission-free driving) 2017, S. 26f.

¹³ Vgl. Pollet et al. (Current status) 2012, S. 239–242.

¹⁴ Vgl. Kampker et al. (Challenges towards large-scale fuel cell production) 2020, S. 29289.

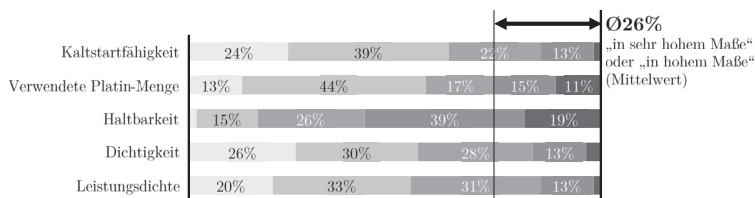
¹⁵ Vgl. ebd. 2020, S. 29291.

¹⁶ Vgl. Wang et al. (Progress on design and development) 2018, S. 205–2013.

¹⁷ Vgl. Daimler AG (Mobility of the Future) 2016, S. 6.

gleichen Größenordnung liegt wie die Platinmenge in konventionellen Verbrennungsfahrzeug-Abgasreinigungsanlagen. Die Korrosionsbeständigkeit von metallischen Bipolarplatten liegt auf einem Niveau, das die in Automobilanwendungen geforderte Lebensdauer von 5.000 – 6.000 Betriebsstunden voll erfüllt und je nach Auslegung auch für im Nutzfahrzeubbereich deutlich höhere Lebensdauernforderungen von ≥ 20.000 Betriebsstunden ausreichend erscheint.¹⁸ Somit sind produktseitige Hindernisse nicht mehr ausschlaggebend für die Industrialisierung von Brennstoffzellen. Diese Schlussfolgerung bestätigen die Ergebnisse der quantitativen Befragung und sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Fünf wesentliche Produktherausforderungen wurden hinsichtlich ihres Ausmaßes als Hemmnisse für eine Großserienproduktion von Brennstoffzellen bewertet. Im Durchschnitt sehen nur 26% der Teilnehmenden diese als „in hohem Maße“ oder „in sehr hohem Maße“ hemmend.¹⁹

Wie stark hemmen die folgenden produkttechnischen Herausforderungen Ihrer Meinung nach eine Großserienproduktion von Brennstoffzellen?



Fünfstufige Antwortskala von „gar nicht“ bis „in sehr hohem Maße“
Teilnehmerzahl n = 54

Abb. 1.1: Studienergebnis: Hemmnisse der Marktdurchdringung von Brennstoffzellen aus Produktsicht

Im Gegensatz zu den produkttechnischen Herausforderungen gibt es eine Vielzahl von ungelösten prozesstechnischen Herausforderungen, die derzeit als Hemmnisse für die Großserienproduktion von Brennstoffzellen angesehen werden können. Heutige Fertigungsprozesse für Brennstoffzellen sind oft aus dem Labormaßstab abgeleitet, wo meist nur wenige Zellen gebaut werden und daher die Geschwindigkeit der Produktion keine wesentliche Rolle spielt. Aus diesem Grund sind in vielen Produktionsschritten immer noch manuelle Prozesse erforderlich. Die Frage, welche Fertigungstechnologien tatsächlich geeignet sind, eine Großserienfertigung abzubilden, ist noch nicht systematisch beantwortet. Mit steigender Stückzahl bereits im unteren bis mittleren fünfstelligen Bereich an Stacks²⁰ pro Jahr müssen manuelle Prozesse vollständig eliminiert werden. Eine vollständig aufeinander abgestimmte Prozesskette kann durch kontinuierliche Techniken erreicht werden, wofür Rolle-zu-Rolle-Prozesse geeignet erscheinen. Zudem muss die hohe Varianz in der Qualität der Bauteile für die Großserienproduktion reduziert werden. Der Reifegrad der Produktion reicht noch nicht aus, um eine konstante Qualität zu

¹⁸ Vgl. Kampker et al. (Challenges towards large-scale fuel cell production) 2020, S. 29293.

¹⁹ Vgl. ebd. 2020, S. 29292f.

²⁰ Für Erläuterungen der Begriffe Brennstoffzellenstack und -system siehe Abschnitt 2.2.

erreichen, was unter anderem an den manuellen Prozessen liegt. Dies führt zu Inhomogenitäten in der Leistung der Zellen. Ein weiterer, oft vernachlässigter Faktor sind die notwendigen Handhabungsschritte zwischen den Wertschöpfungsprozessen: Lose Teile wie Membran-Elektroden-Einheiten oder Bipolarplatten müssen sicher gegriffen und ausreichend schnell bewegt werden, ohne die Komponenten zu beschädigen. Die quantitativen Befragungsergebnisse bestätigen, dass die Hemmnisse für den Durchbruch der Brennstoffzelle vor allem auf produktionsbezogene Herausforderungen zurückzuführen sind. Bei der Bewertung von fünf produktionsbezogenen Herausforderungen sahen durchschnittlich 45% diese als „in hohem Maße“ oder „in sehr hohem Maße“ hinderlich an, wie in Abbildung 1.2 dargestellt, was im Vergleich zu den produktbezogenen Herausforderungen 73% höher ist. Als besonders kritisch wurden die Skalierbarkeit der Produktion in Bezug auf die Stückzahl mit 62% bewertet.²¹

Wie stark hemmen die folgenden prozesstechnischen Herausforderungen Ihrer Meinung nach eine Großserienproduktion von Brennstoffzellen?

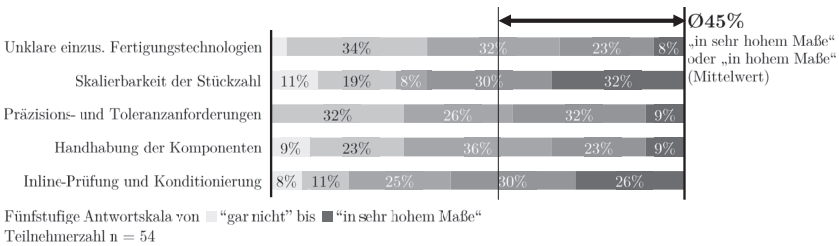
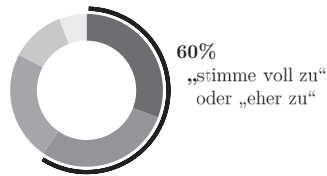


Abb. 1.2: Studienergebnis: Hemmnisse der Marktdurchdringung von Brennstoffzellen aus Prozesssicht

Bei steigender Nachfrage ist das Produkt Brennstoffzelle demnach technologisch ausreichend reif für eine Großserienproduktion, jedoch müssen Herausforderungen in der Produktion gelöst werden. Dabei ist in Industrie und Forschung kein ausreichendes Wissen vorhanden, wie die Produktionstechnik für große Stückzahlen aussehen sollte. Der Lösungsraum für die Großserienfertigung ist eingeschränkt, da dieser häufig auf Fertigungsansätzen aus dem Labormaßstab basiert, welche durch „try-and-error“ entstanden sind. Die Studienergebnisse belegen, dass die sich ergebenden Unsicherheiten, welche Technologiekette am besten für den Aufbau einer Großserienfertigung von Brennstoffzellen geeignet ist, deren Aufbau verzögern: 60% stimmen dieser Aussage voll oder eher zu, wie Abbildung 1.3 zeigt.

²¹ Vgl. Kampker et al. (Challenges towards large-scale fuel cell production) 2020, S. 29293f.

Die Unsicherheiten, welche der alternativen Technologieketten am besten geeignet ist, verzögern den Aufbau einer Großserienfertigung von Brennstoffzellen.



Fünfstufige Antwortskala von „stimme nicht zu“ bis „stimme voll zu“
Teilnehmerzahl n = 54

Abb. 1.3: Studienergebnis: Unsicherheit über Eignung alternativer Technologieketten

Für die Praxis fehlt daher ein Konzept, um systematisch die möglichen Fertigungsansätze und Technologieketten für die Herstellung des komplexen Produkts Brennstoffzelle zu gestalten. Außerdem fehlt eine Bewertbarkeit, um anschließend eine Aussage darüber zu erhalten, welche der Technologieketten und damit auch Fertigungsansätze für eine stückzahl-skalierbare Produktion in welchem Maße geeignet sind. Zusammenfassend können somit Potenziale durch eine systematische Gestaltung und Bewertung von skalierbaren Technologieketten aller Fertigungsansätze nicht genutzt werden.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Basierend auf der Ausgangssituation und der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Problemstellung ergibt sich als Ziel dieser Arbeit das Schaffen eines integrativen Verständnisses der Produktion von Brennstoffzellen sowie der Aufbau einer Methodik, die für die Anwendenden einen Mehrwert auf dem Weg zur Großserienproduktion von Brennstoffzellen bietet. Durch eine Quantifizierung und Mitigation der Unsicherheiten über die Eignung einer Technologiekette für den Aufbau einer Großserienproduktion soll ein Beitrag geleistet werden, Verzögerungen zu begrenzen und den Marktdurchbruch zu beschleunigen. Die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit lässt sich damit wie folgt formulieren:

Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist, die Potenziale einer systematischen Gestaltung und Bewertung von skalierbaren Technologieketten aller Fertigungsansätze für eine erleichterte Entscheidungsfindung zum Aufbau einer Großserienproduktion von Brennstoffzellen erkennbar und nutzbar zu machen.

Um qualifizierte Aussagen hinsichtlich der Eignung verschiedener Technologieketten in Bezug auf ihre Skalierung hin zu einer Großserienproduktion von Brennstoffzellen zu erhalten, wird in dieser Arbeit eine Methodik konzeptioniert und detailliert. Diese soll einen Leitfaden bilden, welche technische und ökonomische Entscheidungsträger:innen in Unternehmen unterstützt.

Zu den dabei adressierten Unternehmen zählen sowohl Hersteller von Brennstoffzellenstacks oder -stackkomponenten, welche vor der Aufgabe stehen, eine durchgängige Fertigungslinie zu implementieren, als auch Maschinen- und Anlagenbauer, welche sich strategisch mit ihren Kompetenzen zur Integration einzelner Fertigungsverfahren im Kontext der Brennstoffzellenproduktion positionieren möchten. Für die Erarbeitung der übergeordneten Zielsetzung lassen sich daher folgende Teilziele formulieren:

- Untersuchung des industriellen Umfelds der Brennstoffzellenproduktion zur Vertiefung des Verständnisses der Herausforderungen und Bedürfnisse.
- Identifikation und Einordnung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse sowie allgemein anerkannter Methoden und mathematischer Werkzeuge.
- Erarbeitung eines konsistenten Modells zur Verortung relevanter Informationen in einer eindeutigen Struktur.
- Entwicklung eines konsistenten Lösungsvorgehens zur Gestaltung und Bewertung alternativer skalierbarer Technologieketten.
- Unterstützung bei der Nutzung der Ergebnisse im Anwendungszusammenhang.

Für ein zielgerichtetes Forschungsvorgehen bietet sich die Formulierung einer Forschungsfrage an.²² Anhand der zuvor beschriebenen Zielsetzung wird für diese Dissertationsschrift die Hauptforschungsfrage wie folgt formuliert:

Forschungsfrage

Wie kann die Gestaltung und Bewertung von skalierbaren Technologieketten zur Herstellung des komplexen Produkts Brennstoffzelle methodisch durchgeführt werden?

1.3 Forschungskonzeption

Die wissenschaftliche Forschung ist ein strukturierter, jedoch häufig unbestimmter Prozess mit dem Ziel, neue Erkenntnisse zu gewinnen. Ein wissenschaftlicher Forschungsprozess wird häufig mit der Metapher einer Reise interpretiert.²³ Der Forschende startet an einem bekannten Ort, um zu neuen Welten aufzubrechen. Im Verlauf der Reise erkundet er so unerschlossene Gebiete und beschreitet neue Wege. Auf diese Weise wird die Wissenschaft um neue Wirklichkeiten erweitert. Im Folgenden werden einige Grundlagen kurz vorgestellt, auf denen der Forschungsprozess für diese Arbeit basiert.

1.3.1 Einordnung in die Wissenschaftssystematik

Die Systematik der Wissenschaft nach ULRICH UND HILL unterscheidet die Formal- und Realwissenschaften, wie in Abbildung 1.4 dargestellt.²⁴ In den Formalwissenschaften steht die

²² Vgl. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen) 1977, S. 14f.

²³ Vgl. Binder und Kantowsky (Technologiepotentiale) 1996, S. 3; vgl. Voet (Baukastensysteme für die Fabrikplanung), S. 6; vgl. Schumacher (Proaktive Resequenzierung) 2019, S. 7.

²⁴ Vgl. Ulrich und Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen) 1976, S. 305f.

Konstruktion von Sprachen im Vordergrund, „d.h. von Zeichensystemen mit Regeln zur Verwendung dieser Zeichen“²⁵. Hierzu zählen die Philosophie, die Logik und die Mathematik. Die Realwissenschaften widmen sich hingegen wahrnehmbaren Wirklichkeitsausschnitten mit dem Ziel, diese zu beschreiben, zu erklären und zu gestalten. Diese lassen sich weiter unterteilen in die „reinen“ Realwissenschaften, bei denen als Grundlagenwissenschaften die Erklärung von empirischen Wirklichkeitsausschnitten im Vordergrund steht, und die „angewandten“ Realwissenschaften, welche als Handlungswissenschaften menschliche Handlungsalternativen analysieren. Die klassischen Naturwissenschaften Biologie, Chemie und Physik können dabei den Grundlagenwissenschaften zugeordnet werden, während Sozialwissenschaften und Betriebswirtschaftslehre zu den Handlungswissenschaften zählen. Im technischen Bereich umfassen die Handlungswissenschaften nach ULRICH UND HILL auch die Ingenieurwissenschaften,²⁶ je nach Zielsetzung werden die Ingenieurwissenschaften auch an der Schnittstelle zwischen Grundlagen- und Handlungswissenschaften eingeordnet.²⁷

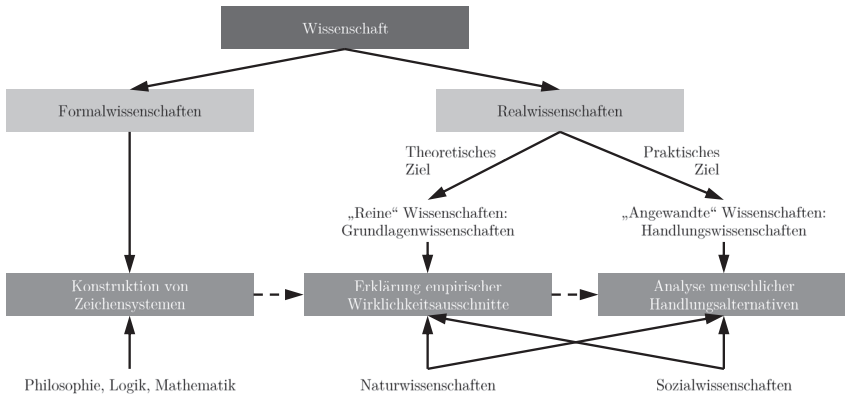


Abb. 1.4: Wissenschaftssystematik nach ULRICH UND HILL

Die zuvor erläuterte Zielsetzung dieser Arbeit liegt in der systematischen Gestaltung und Bewertung von skalierbaren Technologieketten zum Aufbau einer Großserienproduktion von Brennstoffzellen. Dabei soll die zu erarbeitende Methodik eine erleichterte Entscheidungsfindung unterstützen. Die Zielsetzung lässt einen starken Bezug zu den Ingenieurwissenschaften und der Betriebswirtschaftslehre erkennen, sodass diese Arbeit den Handlungswissenschaften zugeordnet wird. Jedoch kommen „Realwissenschaften [...] ohne Formalwissenschaften nicht

²⁵ ebd. 1976, S. 305.

²⁶ Vgl. ebd. 1976, S. 305.

²⁷ Vgl. Heimes (Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen) 2014, S. 4f.; vgl. Nowacki (Szenariobasierte Konfiguration der Produktmixflexibilität) 2015, S. 9f.; vgl. Sarovic (Gestaltung variantenrobuster Produktionsysteme) 2018, S. 4; vgl. Schumacher (Proaktive Resequenzierung) 2019, S. 7.

aus“²⁸, sodass während des gesamten Forschungsprozesses verschiedene Grundlagen und Methoden aus den Formal- und Naturwissenschaften herangezogen werden.

1.3.2 Forschungsmethodologisches Vorgehen

In der von KUHN als solche bezeichneten normalen Wissenschaft stützt sich die Forschung auf eine oder mehrere vergangene wissenschaftliche Erkenntnisse, die eine bestimmte wissenschaftliche Fachgemeinschaft eine Zeit lang als Grundlage für ihre weitere Arbeit anerkennt. Eine solche Erkenntnis bezeichnet KUHN als Paradigma, wenn sie zwei Charakteristika vereint: Zum einen eine hinreichende Einzigartigkeit, um eine dauerhafte Gruppe von Unterstützern anzuziehen, zum andere eine genügende Offenheit, um darin verschiedene Probleme lösen zu können.²⁹ Metaphorisch lösen erfolgreiche Forschende der normalen Wissenschaft demnach auf Experten-niveau Puzzle innerhalb ihrer Disziplin, verfolgen jedoch nicht das Ziel, unerwartete Neuheiten zu entdecken.³⁰ Demgegenüber werden wissenschaftliche Revolutionen durch ein wachsendes Bewusstsein eingeleitet, dass ein bestehendes Paradigma nicht länger adäquat für die Erforschung eines Ausschnitts der Wirklichkeit funktioniert, zu dem dieses Paradigma selbst zuvor beigetragen hatte. Auf diese Weise kann ein Paradigmenwechsel entstehen.³¹

Dem Forschungsprozess dieser Arbeit kann in diesem Sinne eine puzzle-lösende Tätigkeit zugeschrieben werden, sodass auch dieser auf einem Paradigma aufbauen muss. Hierzu wird der systemtheoretische Ansatz nach ULRICH ET AL. herangezogen,³² welcher für reale Problemstellungen im Umfeld der Ingenieurwissenschaften und Betriebswirtschaftslehre als wissenschaftlich anerkannte Grundlage eingestuft werden kann.³³ Nach ULRICH ET AL. beginnt und endet der Forschungsprozess in der Praxis.³⁴ Mittels eines iterativen Lernprozesses werden das theoretische Verständnis und das zurückgeführte Erfahrungswissen in neue Erkenntnisse überführt.³⁵ Der Aufbau der Arbeit folgt dabei der angewandten Wissenschaft im Theorie- und Praxisbezug und wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

1.4 Aufbau der Arbeit

In Anlehnung an die sieben Phasen der angewandten Forschung nach ULRICH ET AL. wird der Grobaufbau der Dissertation abgeleitet.³⁶ Dieser ist in Abbildung 1.5 dargestellt.

²⁸ Ulrich und Hill (Wissenschaftstheoretische Grundlagen) 1976, S. 306.

²⁹ Vgl. Kuhn (Structure of scientific revolutions) 1970, S. 10–12.

³⁰ Vgl. ebd. 1970, S. 35–37.

³¹ Vgl. ebd. 1970, S. 92–95.

³² Vgl. Ulrich et al. (Management) 1984, S. 192.

³³ Vgl. Heimes (Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen) 2014, S. 5f.; vgl. Sarovic (Gestaltung varian-tenrobuster Produkt-Produktionssysteme) 2018, S. 5; vgl. Schumacher (Proaktive Resequenzierung) 2019, S. 7.

³⁴ Vgl. Ulrich et al. (Management) 1984, S. 192.

³⁵ Vgl. Kubicek (Heuristische Bezugsrahmen) 1977, S. 12.

³⁶ Vgl. Ulrich et al. (Management) 1984, S. 193.

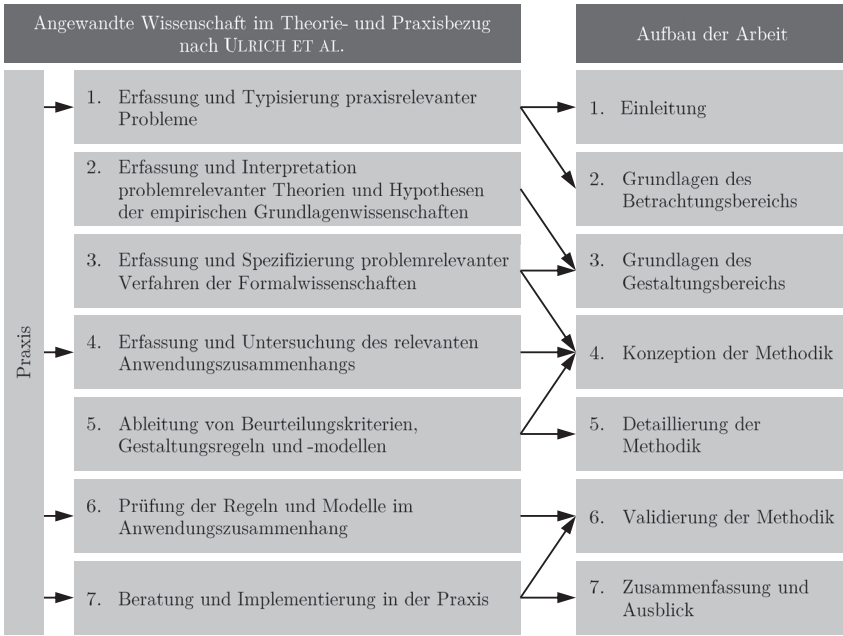


Abb. 1.5: Struktur der Arbeit

Im vorliegenden Kapitel 1 wird mit der Ausgangssituation und Zielsetzung sowie der Forschungskonzeption die weitere Bearbeitung des Themas eingeleitet. Kapitel 2 dient der Schaffung der Grundlagen des Betrachtungsbereichs und dem Aufzeigen des praktischen Handlungsbedarfs. Der Betrachtungsbereich wird auf PEM-Brennstoffzellen und ihre Anwendungen eingegrenzt. Anschließend werden die übergeordnete Wertschöpfung von Brennstoffzellen und bestehende Ansätze zu deren Fertigung auf technischer Ebene vorgestellt. In Kombination mit den dabei in der heutigen Praxis dominierenden Kosten- und Stückzahlstrukturen werden die Kernherausforderungen beschrieben. Damit ergibt sich der Handlungsbedarf aus der Praxis. In Kapitel 3 werden die allgemeinen Grundlagen des Gestaltungsbereichs herausgearbeitet. Basierend auf dem Handlungsbedarf aus der Praxis werden zunächst inhaltliche und formale Anforderungen an die Methodik abgeleitet. Nach der Erläuterung von Grundlagen zur Skalierbarkeit im Forschungsfeld der Technologieplanung werden analytische und heuristische Methoden, welche zur Lösungsfindung beitragen können, vorgestellt. Abschließend folgt eine kritische Würdigung bestehender Forschungsergebnisse, welche den aufgestellten Anforderungen gegenübergestellt werden. Damit ergibt sich der Handlungsbedarf aus der Theorie. Kapitel 4 dient der Konzeption der Methodik unter Berücksichtigung der formulierten Handlungsbedarfe und Anforderungen. Dazu werden zunächst Grundlagen der Modellbildung und des Systems Engineering als Orientierung eingeführt, um anschließend den Aufbau der Methodik zu konkre-

sieren. Abschließend werden die Lösungshypothesen vorgestellt und in einen Ablauf überführt. Kapitel 5 beschreibt die methodischen Schritte im Detail, welche in vier Module mit jeweils mehreren Phasen gegliedert sind. Besonderer Fokus liegt hierbei auf dem zweiten und dritten Modul, in denen skalierbare Technologieketten gestaltet und bewertet werden. In Kapitel 6 wird die Methodik softwareseitig implementiert und anhand eines realen Beispiels aus einem am PEM durchgeführten Industrieprojekt angewendet und kritisch reflektiert. In Kapitel 7 werden die wesentlichen Ergebnisse der Dissertation zusammengefasst sowie Limitationen und weitere Forschungsbedarfe aufgezeigt.