

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

“In the Chinese language, the word “crisis” is composed of two characters, one representing danger and the other, opportunity.”

JOHN F. KENNEDY [KEN60]

In einer Rede aus dem Jahr 1960 spricht der ehemalige amerikanische Präsident John F. Kennedy über Krisen, Herausforderungen und Chancen, die den Amerikanern in den 1960er Jahren bevorstehen würden [KEN60]. Obwohl sich die Umstände geändert haben, ist die Erkenntnis über 60 Jahre später aktueller denn je. Damals waren es der Kalte Krieg, die Kubakrise oder der Bau der Berliner Mauer, heute dominieren der Klimawandel, der russisch-ukrainische Krieg oder die COVID-19 Pandemie die Schlagzeilen [KLE21, S. 9, 12, 15; BAS20, S. 1089; CHU22, S. 89]. Die primären Auswirkungen dieser Krisen lassen sich in Geschichtsbüchern nachlesen oder sind direkt wahrnehmbar. Schwerer zu fassen sind die sekundären Auswirkungen bspw. auf die Industrie. Verschiedene Indices geben einen Einblick in die Stabilität von Lieferketten und lassen eine Zunahme der Spannung (*Supply Chain Stability Index*) und eine historisch starke Abweichung des Drucks (*Global Supply Chain Pressure Index*) auf Lieferketten erkennen (siehe Abbildung 1-1) [ASC23; FED24].

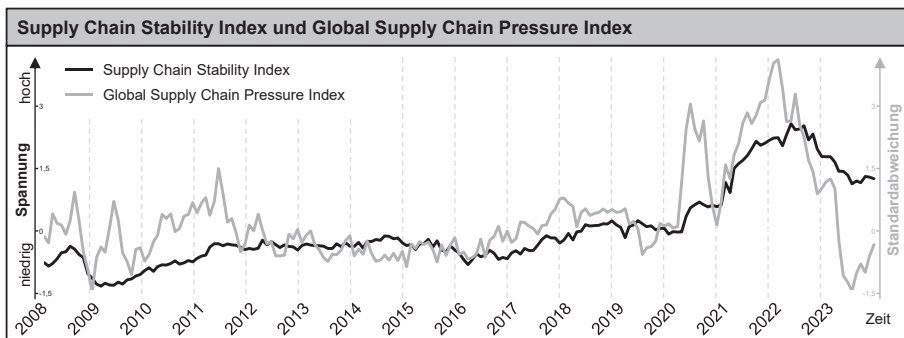


Abbildung 1-1: Supply Chain Stability Index¹ [ASC23] und Global Supply Chain Pressure Index² [FED24]

¹ Der von KPMG und ASCM erfasste Supply Chain Stability Index setzt sich aus fast 30 Schlüsselvariablen und Leistungsindikatoren – aggregiert auf Fracht, Arbeit, Kapazität und Angebot – zusammen [ASC23].

² Der Global Supply Chain Pressure Index der FEDERAL BANK OF NEW YORK hat das Ziel, einen Überblick über Lieferkettenstörungen zu schaffen und umfasst 27 Variablen wie bspw. Transportkosten, Lieferzeiten, Produktionsrückstände oder Bestände [FED24; BEN22b].

Im industriellen Kontext zeichnet sich eine verstärkte Konfrontation von Industrieunternehmen mit verschiedenartigen Krisen und der Versuch der Minimierung ihrer Auswirkungen ab [MAC13, S. 270, 284; SAH16, S. 651]. Das STATISTISCHE BUNDESAMT beziffert bspw. den Wertschöpfungsverlust in Deutschland – gemessen am Bruttoinlandsprodukt – auf 500 Milliarden Euro für die Finanzkrise (2008-2011) und auf 420 Milliarden Euro für die COVID-19 Pandemie und den russisch-ukrainischen Krieg (2020-2022) [INF22]. In steigenden Krisenhäufigkeiten und dem Zusammentreffen von sich überschneidenden Marktereignissen sehen Experten eine neue Normalität [KPM22a, S. 2; KAZ14, S. 1412; LAG12, S. 21]. Vor dem Hintergrund einer steigenden Globalisierung durch internationale Fragmentierung der Produktion in Kombination mit Unfällen, politischen Krisen und Naturkatastrophen lässt sich ein Bedarf nach Stabilisierungsmaßnahmen von Lieferketten ableiten [FLÜ18, 40; ROB20, S. 5; SAH16, S. 668]. Gleichzeitig führt eine spezialisierte Wertschöpfung zwar zu höherer Produktivität und entsprechend niedrigeren Preisen, allerdings auch zu einer starken Abhängigkeit von Herstellern bestimmter Produkte [OEC21; CON19, S. 2395; CRI17, S. 69; MIR17, S. 30].

In diesem Spannungsfeld bewegen sich resiliente Wertschöpfungssysteme, die FLÜTER-HOFFMANN ET AL. mit dem menschlichen Immunsystem vergleichen [FLÜ18, S. 40]. So dämpfen resiliente Wertschöpfungssysteme Krisen ein und reduzieren damit negative Auswirkungen, ähnlich wie ein menschlicher Organismus auf Störungen reagiert [BHA18, S. 113; WON20, S. 1; LIN20, S. 1461; JÜT11, S. 246]. Zielführend erscheinen grundlegende Anpassungen von globalen Lieferketten und Produktionsprozessen [PHI22, S. 73; OEC21], die in bisheriger Form weitestgehend auf Effizienz ausgerichtet waren. Der Gestaltungsansatz einer schlanken Produktion (*Lean Production*) steht auf der einen Seite durch die Minimierung von Verschwendung³ einer agilen oder resilienten Produktion entgegen, wirbt auf der anderen Seite damit, dass sich beide Paradigmen grundsätzlich ergänzen [BIE18, S. 128; CAR11, S. 175; CHR01, S. 245].

Neben einer schlanken Produktion zielt auch die Digitalisierung darauf ab, Produktionskapazitäten effizienter zu nutzen [WIN21b, S. 3; SHA21a, S. 1; ALE23, S. 106; GUP18, S. 245]. Eine Produktion in kollaborativen Netzwerken⁴ wäre ohne digitalisierte Prozesse nicht möglich – treibt die Komplexität und damit die Störanfälligkeit von Wertschöpfungssystemen

³ Nach OHNO liegen Verschwendungen in der Produktion bspw. in Form von Überproduktion, Wartezeit, Transport, Bearbeitung, Lager, überflüssiger Bewegung und defekten Produkten vor [ÖNO13, S. 54].

⁴ In einer kollaborativen Fertigung stellen Unternehmen gemeinsam Produkte her, indem sie ihre jeweiligen Kernkompetenzen einbringen. Dadurch wird eine höhere Netzwerkperformance erreicht, von denen die Netzwerkpartner bspw. durch Kostenersparnisse und Wettbewerbsvorteile profitieren. [FIR13, S. 6]

allerdings in die Höhe [BIE18, S. V; ROB20, S. 5]. Anspruchsvollere Kunden und eine höhere Marktdynamik steigern parallel dazu den Wettbewerbsdruck und führen in der Konsequenz zu einer in Teilen überspezialisierten Wertschöpfung [WIN21b, S. 5]. Dies hat eine wechselseitige Abhängigkeit von den Wertschöpfungspartner zur Folge, durch die *Single Points of Failure*⁵ entstehen [WIN21b, S. 5; BUL10, S. 1025]. Folglich ist eine Intelligenz des Wertschöpfungssystems notwendig, die durch Informationsaustausch die Auswirkung von Störungen frühzeitig erkennt und durch effiziente Steuerung des Netzwerks eindämmt [CHR04, S. 9; OBE19, S. 24; STE19, S. 249]. Die daraus entstehende Emergenz unterstützt Wertschöpfungssysteme, auf Veränderungen zu reagieren. Ein Wandel in der Logik industrieller Produktion (siehe Abbildung 1-2) induziert veränderte Anforderungen an die Produktion sowie eine Neuausrichtung der darauf bezogenen Handlungsfelder.

Wandel der Produktionslogik in Anlehnung an REDLICH und WULFSBERG			
Logik der industriellen Massenproduktion		Logik der Wertschöpfung in Netzwerken	
Anforderungen	Handlungsfelder	Anforderungen	Handlungsfelder
	Getaktete starre Transferstraße		Bedarfsorientierte Fertigung
Anbietermarkt	Hohe Investitionskosten	Nachfragemarkt	Hohe Flexibilität
Gleichbleibende Nachfrage	Fokus auf Massenproduktion	Diskontinuierliche Nachfrage	Fokus auf Kundennutzen
Angebot von „fertigen“ Produkten	Lagerfertigung (<i>make-to-stock</i>)	Angebot hybrider Leistungsbündel	Einzelfertigung (<i>make-to-order</i>)
Standardprodukte	Große Lose	Individualprodukte	Fertigungslosgröße mit Stückzahl 1
Lange Produktlebenszyklen	Sequentielle interne Produktentwicklung	Kurze Produktlebenszyklen	Co-Creation
Seltene Produktänderungen	Zentrale Koordination	Kontinuierliche Produktverbesserung	Dezentrale Koordination
	Vertikale Integration		Wertschöpfungssysteme
	Begrenzte externe Kommunikation		Echtzeit-Kommunikation

Abbildung 1-2: Wandel der Produktionslogik in Anlehnung an REDLICH und WULFSBERG [RED11, S. 97; MIL95, S. 192; ABE11, S. 10]

Dank zahlreicher technologischer Innovationen verliert die Ausprägung einer zentralisierten Massenproduktion ihre Bedeutung und es öffnen sich neue Wege zur Produktion in global dislozierten⁶ Wertschöpfungsnetzwerken [RED11, 3, 97].⁷ Darüber hinaus ermöglichen

⁵ Laut NASA AMES RESEARCH CENTER reicht beim *Single Point of Failure* im Vergleich zur *Common Cause Failure* der Ausfall von einem einzigen Teilsystem, um ein Gesamtsystem zum Stillstand zu bringen [JON12, S. 2].
⁶ Im Kontext von Lieferketten meint die Dislozierung eine Dezentralisierung logistischer Einheiten wie Produktionsstätten und Lagereinrichtungen auf räumlich verteilte Standorte [KIL08, S. 952; IHD01, S. 278, 318; EIS08, S. 1043].
⁷ Dieser Trend wurde in den 1990er Jahren erkannt [MIL95, S. 192] und setzt sich bis heute fort [RED11, S. 2].

technologische Innovationen, Lieferketten resilienter zu gestalten [KPM22b, S. 4; BSI19, S. 10; BSI21, S. 46]. Anstatt bei Störungen in der Lieferkette oder in Produktionsprozessen alternative Lieferanten einzusetzen, lassen sich Ausweichtechnologien wie die additive Fertigung nutzen, um vorübergehende Krisensituationen zu stabilisieren [KOH21, S. 12; IBR21, S. 212–213; BUD22, S. 12; HE21, S. 1]. Durch diesen Technologie-agnostischen Ansatz⁸ zur Nutzung der jeweils geeigneten Fertigungstechnologie bewirken die Eigenschaften der additiven Fertigung in diesem Kontext eine Veränderung ganzer Wertschöpfungssysteme sowohl im horizontalen wie auch im vertikalen Betrachtungsbereich [SCH19, S. 24; CAL23, S. 9; TOS19, S. 783; ARA21, S. 1].⁹ Dies bestätigen populäre Beispiele aus der Zeit der COVID-19 Pandemie wie bspw. medizintechnisches Equipment (Ventile, Adapter, Maskenteile u. v. m.) [CHO20].

1.2 Zielsetzung

Ein wesentlicher Treiber von Innovationsfeldern in der Produktion ist die Wandlungsfähigkeit von Wertschöpfungssystemen [WES09, S. 133; DRE19, S. 2]. Die Fokussierung von Wertschöpfungssystemen auf die Steigerung ihrer Resilienz bedarf der in Abschnitt 1.1 thematisierten Ausgangssituation sowie wirtschaftlicher¹⁰ und regulatorischer¹¹ Motivation [THO14, S. 111]. Die wissenschaftliche Motivation beschreiben bspw. ELLEUCH ET AL. nach einer Literaturanalyse mit dem Forschungsbedarf nach Strategien zur Resilienzsteigerung sowie Simulationsmodellen zur effizienten Ressourcenzuweisung und zum Monitoring der Supply Chain Performance bei der Einwirkung von Störungen [ELL16, S. 1452].

Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Forschungsarbeit einen Beitrag zur resilienten Gestaltung von Wertschöpfungssystemen unter dem Einsatz der additiven Fertigung leisten. Dieser Zielsetzung mit differierendem Lösungsweg hat sich kürzlich auch das WEIßE HAUS¹² verschrieben [THE22, S. 2]. Die additive Fertigung wird dort als Technologie mit dem Potenzial zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit bei Störungen, der Geschwindigkeit und Flexibilität in der Produktion sowie der volkswirtschaftlichen Autarkie beschrieben [THE22,

⁸ Als Technologie-agnostisch wird im aktuellen Diskurs die Erkenntnis bezeichnet, dass es nicht die eine richtige Technologie gibt [DOM17, S. 274; BUR23, S. 6].

⁹ Der horizontale Betrachtungsbereich umfasst die gesamte Wertschöpfungskette vom Materiallieferanten bis zum Kunden. In der Vertikalen beeinflusst die additive Fertigung bspw. Innovationsprozesse und Geschäftsmodelle. [SCH19, S. 24]

¹⁰ Die wirtschaftliche Motivation der Resilienzsteigerung wird mit der Prozessoptimierung und Wettbewerbsvorteilen durch hohe Produktverfügbarkeit auch in Krisensituationen in Verbindung gebracht [THO14, S. 111; STA03].

¹¹ Die regulatorische Motivation wird indirekt durch die Gesetzgebung erreicht. Im Bundesdatenschutzgesetz wird die Resilienz im Bereich des Datenschutzes, in handelsrechtlichen Gesetzen die Sorgfalt zur Aufbewahrung von buchhalterischen Informationen oder im Aktiengesetz die Sicherung des Fortbestands der Gesellschaft geregelt. [THO14, S. 111–112]

¹² Offizieller Amts- und Regierungssitz des Präsidenten der Vereinigten Staaten in Washington, D.C.

S. 2]. Die Unterstützung der Regierung auf dem Weg zur Resilienzsteigerung von Wertschöpfungssystemen durch verschiedene Programme soll u. a. kleine und mittlere Unternehmen erreichen [THE22, S. 3–4]. Dieser Ansatz setzt verstärkt auf eine flächendeckende, branchenübergreifende Technologiediffusion und -implementierung in die Industrieunternehmen und auf die Nutzung additiver Fertigung für die Herstellung bestimmter Produkte. Darin unterscheidet sich die Betrachtungsweise dieser Arbeit, in der die additive Fertigung darüber hinaus als Ausweichtechnologie in Krisensituationen eingesetzt werden soll. MEYER ET AL. sprechen in diesem Zusammenhang auch von *Hedging*¹³, indem die additive Fertigung ergänzend zur konventionellen Fertigung eingesetzt wird, um die Resilienz zu steigern [MEY22b, S. 233; MEY22a, S. 1].

Folglich soll in der vorliegenden Arbeit die Frage nach einer Eignung der additiven Fertigung zur Steigerung der organisationalen Resilienz von Wertschöpfungssystemen beantwortet werden. Aus dieser Frage ergibt sich das in Abbildung 1-3 aufgeführte Ziel, welches den Rahmen um die zu erreichenden Teilziele spannt. Die inhaltliche Fokussierung der Arbeit greift der Eingrenzung des Betrachtungsraums vor und setzt die Präzisierung der behandelten Themen- und Anwendungsfelder fort. Zur Erreichung der gesetzten Ziele werden die wesentlichen Anforderungen an die Ergebnisse der Arbeit definiert.

Zielsetzung, inhaltliche Fokussierung und Anforderungen		
Ziel	Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur resilienzorientierten Gestaltung von Wertschöpfungssystemen durch die additive Fertigung	
Teilziele	1	Identifikation organisationaler Resilienzindikatoren und resilienzrelevanter Einflussgrößen der additiven Fertigung auf Wertschöpfungssysteme
	2	Entwicklung einer adaptiven analytischen Systematik zur qualitativen Bewertung und Operationalisierung des Einflusses additiver Fertigung auf die Resilienz von Wertschöpfungssystemen
	3	Entwicklung eines Simulationsmodells zur Quantifizierung und Unterstützung der Gestaltung resilienter Wertschöpfungssysteme mit additiver Fertigung
Inhaltliche Fokussierung	Industrielle Produktion in interagierenden Systemen	
	Nutzung der additiven Fertigung als Ausweichtechnologie in Stör- und Krisensituationen zur Aufrechterhaltung der Produktions- und Liefernetzwerke	
	Berücksichtigung der Dynamik interdependenter Wertschöpfungspartner bei Einwirkung vielschichtiger Störereignisse	
Anforderungen	Erweiterbares Indikatorensystem und anwendungsfallbezogene Kennzahlen zur Operationalisierung der Resilienz von Wertschöpfungssystemen in Unternehmen	
	Adaptiv ausgelegte Systematik zur Integration spezifischer Konfigurationen der betrachteten Wertschöpfungssysteme	
	Übertragbare Grundstruktur des Simulationsmodells auf verschiedenartige Wertschöpfungssysteme mit unterschiedlicher Verortung und Ausprägung der Störereignisse	

Abbildung 1-3: Zielsetzung, inhaltliche Fokussierung und Anforderungen

¹³ *Hedging* bezeichnet die Kombination negativ korrelierter Risikopositionen bspw. zur Absicherung von Lieferketten [MEY22c].

Das übergeordnete Ziel umfasst die Entwicklung einer anwendungsorientierten methodischen Vorgehensweise, in der die Veränderung der Resilienz bei Einwirkung von Störereignissen visualisiert und mit verschiedenen Systemkonfigurationen der Wertschöpfung verglichen werden kann. Hierfür sollen geeignete Indikatoren zur Beschreibung der Resilienz und industriell etablierte Kennzahlen zur Bewertung der Leistung von Wertschöpfungssystemen identifiziert und mithilfe einer Systematik operationalisiert werden. Der darin ermittelte qualitative Einfluss der additiven Fertigung auf die Resilienz von Wertschöpfungssystemen soll mithilfe geeigneter Simulationsexperimente quantifiziert und vergleichbar gemacht werden. Die Arbeit ist auf die industrielle Produktion von Unternehmen ausgerichtet, die vielschichtigen Störungen in verschiedenen Bereichen interagierender Wertschöpfungssysteme ausgesetzt sind und die additive Fertigung potenziell zur Resilienzsteigerung nutzen können. Begleitend zur Erreichung der Zielsetzung sollen das System der Resilienzindikatoren und der Wertschöpfungskennzahlen anpass- und erweiterbar gestaltet werden, um die Ergebnisse dieser Arbeit einer möglichst großen Bandbreite verschiedenartiger und -großer Unternehmen zugänglich zu machen. Dieser Grundanforderung folgend sollen darüber hinaus die Bewertungssystematik und das Simulationsmodell ausgelegt werden.

1.3 Eingrenzung des Betrachtungsraums

Mit diesen Vorüberlegungen lässt sich die vorliegende Arbeit der Produktionswissenschaft als Teil der Ingenieur- oder Technikwissenschaften zuordnen. Wertschöpfungssysteme als Untersuchungsobjekt lassen sich nur mithilfe interdisziplinärer Ansätze von Ingenieurwissenschaften, Betriebswirtschaftslehre und Sozialwissenschaften präzise verstehen. Demgemäß ist diese Arbeit das Ergebnis eines Forschungsprozesses aus dem Bereich anwendungsorientierter Forschung als Teil der Realwissenschaften (siehe Abbildung 1-4). [RED11, S. 8]

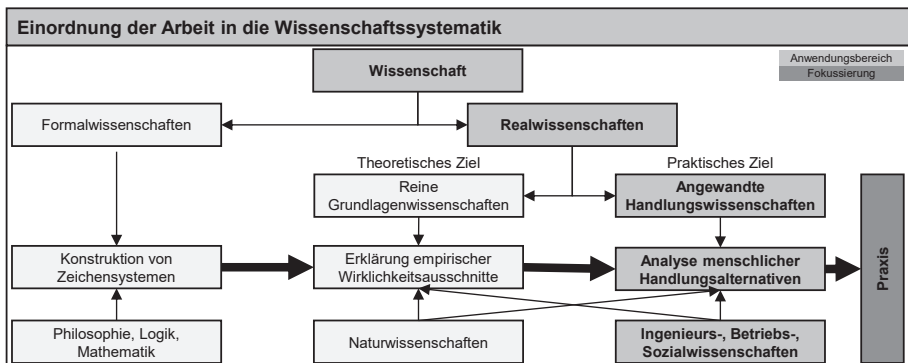


Abbildung 1-4: Einordnung der Arbeit in die Wissenschaftssystematik in Anlehnung an [RED11, S. 7; ULR76, S. 305; GEI01, S. 45]

Diese Arbeit fokussiert sich auf Wertschöpfungssysteme (Makroperspektive) aus unternehmensinterner Sicht unter Einbeziehung vor- und nachgelagerter Wertschöpfungspartner (unternehmensextern). Der Wirkfokus liegt auf der vorwiegend ökonomischen Resilienz, die durch additive Fertigungsverfahren in Einzel- oder Kleinserienfertigung beeinflusst werden kann. Durch die Anwendung verschiedener Methodenarten trägt ein analytisches Modell zur qualitativen und ein Simulationsmodell zur quantitativen Bewertung des Einflusses additiver Fertigungsverfahren auf die Resilienz von Wertschöpfungssystemen anhand von praktischen Fallstudien bei. Dabei handelt es sich um eine Neuentwicklung der Modelle zur organisatorischen Gestaltung¹⁴ von Technologiestrategien. In Anlehnung an COOPER stellt Abbildung 1-5 eine morphologische Übersicht zur Eingrenzung und Konkretisierung des Betrachtungsraums anhand der Ausprägung definierter Merkmale dar [COO88, S. 109].

¹⁴ Im Vergleich zu beschreibenden (deskriptiven), erklärenden (explikativen) oder Entscheidungsmodellen (normativ) sind Gestaltungsmodelle Darstellungen komplexer Systeme mit den für das Systemverhalten relevanten Komponenten zur Visualisierung der voraussichtlichen Systemwirkung. Deskriptive und explikative Modelle bilden lediglich die bestehende Wirklichkeit, Entscheidungsmodelle eine spezifische Problemsituation ab. Gestaltungsmodelle visualisieren demnach eine noch nicht existierende Wirklichkeit. [RED11, S. 60; ULR01, S. 185]

Einleitung

Durch die kompakte Darstellung ist eine direkte Konfrontation der Merkmalsausprägungen gegeben [GER02, A-71].

Eingrenzung des Betrachtungsraums						
Merkmal		Merkmalsausprägung			Möglicher Anwendungsbereich	
					Fokussierung	
Unternehmensperspektive	Prozess		Produktion		System	
Betrachtungshorizont	unternehmensintern			unternehmensextern		
Betrachtungsebene	Mikro		Meso		Makro	
Fertigungsart	Einzelfertigung		Serienfertigung		Massenfertigung	
Fertigungsverfahren	Formativ			Subtraktiv		Additiv
Wirkungsfokus	Soziales		Ökologie	Ökonomie	Resilienz	
Methodenart	Vulnerabilitätsanalyse	Risiko-management	Analytische Modelle	Simulation	Fallstudien	
Ansatz des Simulationsmodells	Neuentwicklung		Evaluierung und Adaption		Anwendung des Status quo	
Verwendungszweck des Modells	Erklärung		Beschreibung	Entscheidung		Gestaltung
Planungsebene	operativ (kurzfristig)		taktisch (mittelfristig)		strategisch (langfristig)	
Maßnahmenfokus	technisch		technologisch		organisatorisch	

Abbildung 1-5: Eingrenzung des Betrachtungsraums

1.4 Lösungsweg

Durch eine strukturierte Vorgehensweise sollen die in Abschnitt 1.2 beschriebenen Ziele erfüllt werden. In Abbildung 1-6 ist der Aufbau der vorliegenden Arbeit im Überblick dargestellt und dient als systematischer Lösungsweg.

Struktureller Aufbau der vorliegenden Arbeit						
Kapitel 1		Einleitung				
Abschnitt 1.1		Abschnitt 1.2	Abschnitt 1.3	Abschnitt 1.4		
Ausgangssituation und Motivation		Zielsetzung	Eingrenzung des Betrachtungsraums	Lösungsweg		
Kapitel 2		Stand der Erkenntnisse und thematische Ausrichtung				
Abschnitt 2.1		Abschnitt 2.2	Abschnitt 2.3	Abschnitt 2.4		
Resilienz		Wertschöpfungssysteme	Additive Fertigung	Fazit zum Stand der Erkenntnisse und der thematischen Ausrichtung		
Kapitel 3		Konkretisierung des Forschungsbedarfs und thematische Einordnung				
Kapitel 4		Entwicklung der methodischen Vorgehensweise zur resilienzorientierten Gestaltung von Wertschöpfungssystemen durch die additive Fertigung				
Abschnitt 4.1		Abschnitt 4.2	Abschnitt 4.3	Abschnitt 4.4		
Anforderungsspezifikation		Ansätze bestehender Forschungsarbeiten zur Gestaltung resilienter Wertschöpfungssysteme	Methodenspezifikation	Fazit zur methodischen Vorgehensweise		
Kapitel 5		Modul I: Analyse des Status quo und Identifikation der Gestaltungselemente				
Abschnitt 5.1		Abschnitt 5.2	Abschnitt 5.3	Abschnitt 5.4	Abschnitt 5.5	
Identifikation des Betrachtungsraums		Identifikation geeigneter Resilienzindikatoren des Wertschöpfungssystems	Identifikation resilienzrelevanter Eigenschaften der additiven Fertigung	Identifikation resilienzrelevanter Kennzahlen des Wertschöpfungssystems	Zusammenfassung des heuristischen Bezugsrahmens	
Kapitel 6		Modul II: Entwicklung einer konzeptionellen Bewertungssystematik zur qualitativen Analyse der Systemresilienz				
Abschnitt 6.1		Abschnitt 6.2		Abschnitt 6.3		
Entwicklung des Indikatorensystems		Entwicklung der metamodellierten Resilienzfunktion		Sensitivitätsanalyse		
Kapitel 7		Modul III: Entwicklung eines Simulationsmodells zur quantitativen Analyse der Systemresilienz				
Abschnitt 7.1		Abschnitt 7.2	Abschnitt 7.3	Abschnitt 7.4	Abschnitt 7.5	Abschnitt 7.6
Beschreibung des Wertschöpfungssystems		Modellierung des Wertschöpfungssystems	Szenarioentwicklung und -analyse	Systemimplementierung und Simulationsexperimente	Rückkopplung des Indikatorensystems und Optimierung Simulationsmodell	Simulationsergebnisse und strategische Handlungsoptionen
Kapitel 8		Industrielle Erprobung				
Kapitel 9		Zusammenfassung und Ausblick		Kapitel 10	Summary and Outlook	

Abbildung 1-6: Aufbau der Arbeit

Dieser Lösungsweg orientiert sich am *Design Science Research Paradigma* nach PEFFERS ET AL. (siehe dazu Abbildung 1-7) als Basis eines wissenschaftlichen Vorgehens praxisnaher Forschung zur Entwicklung und Nutzbarmachung neuartiger Lösungen (sogenannter Artefakte) für real existierende Probleme [PEF07, S. 54, 72].

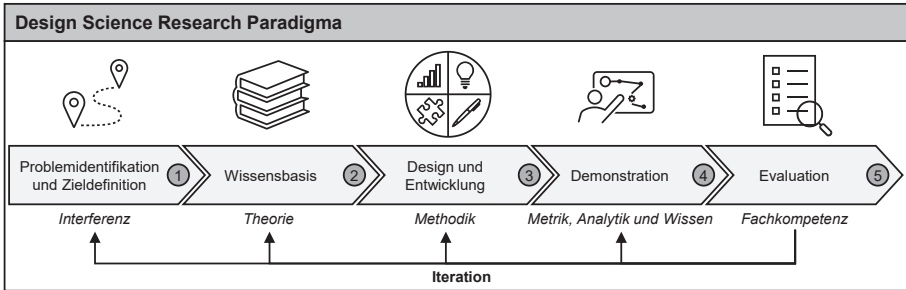


Abbildung 1-7: Design Science Research Paradigma in Anlehnung an PEFFERS ET AL. [PEF07, S. 54]

Das Design Science Research Paradigma beginnt im Schritt 1 mit der Problemidentifikation und Zielsetzung, die analog in der Einleitung (**Kapitel 1**) mit der Beschreibung der Ausgangssituation und Motivation, der Zielsetzung und des nach Eingrenzung des Betrachtungsraums darauf ausgerichteten Lösungswegs umgesetzt werden. Den Erfolg des Design Science Research Paradigmas bestimmt eine fundierte Wissensbasis in Schritt 2 [GRE13, S. 343], die zunächst im Stand der Erkenntnisse und in der thematischen Ausrichtung (**Kapitel 2**) sowie in der anschließenden Konkretisierung des Forschungsbedarfs durch eine systematische Literaturanalyse (**Kapitel 3**) aufgebaut wird. Auf Basis dieses theoretischen Wissens erfolgt die Entwicklung der methodischen Vorgehensweise anhand spezifischer Anforderungen im Schritt 3 (**Kapitel 4**). Diese werden in Schritt 4 zur Identifikation geeigneter Forschungsansätze genutzt, aus denen Elemente adaptiert werden oder von denen sich diese Arbeit abgrenzt. Unter Einbeziehung bestehender Ansätze wird in Abschnitt 4.3 die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit entwickelt. Das erste Modul der methodischen Vorgehensweise wird in der Analyse der Eigenschaften der additiven Fertigung, Kennzahlen von Wertschöpfungssystemen und Indikatoren der Resilienz (**Kapitel 5**) umgesetzt (*Teilziel 1*). Diese Informationen werden als Grundlage zur Entwicklung einer konzeptionellen Bewertungssystematik zur qualitativen Analyse der Systemresilienz herangezogen (**Kapitel 6**), welche sich aus der Entwicklung eines Indikatorensystems und einer bewertenden meta-modellierten Resilienzfunktion mit Sensitivitätsanalyse zusammensetzt (*Teilziel 2*). Für die quantitative Analyse der Systemresilienz (*Teilziel 3*) wird ein Modell zur Simulation ausgewählter Operationalisierungskennzahlen entwickelt (**Kapitel 7**). Schritt 5 mit gleichzeitiger Rückkopplung in iterativen Schleifen stellt nach dem Design Science Research Paradigma die Evaluation dar, welche in einer industriellen Erprobung geeigneter Fallstudien auf quali-

tativer und quantitativer Ebene umgesetzt wird (**Kapitel 8**). In diesem Schritt wird die methodische Vorgehensweise getestet und die praktische Anwendbarkeit durch eine Ableitung strategischer Handlungsempfehlungen überprüft. Abschließend wird eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick zukünftiger Forschungsinhalte in deutscher (**Kapitel 9**) und englischer Sprache (**Kapitel 10**) gegeben.