

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Für produzierende Unternehmen hat die Globalisierung neue Rahmenbedingungen geschaffen, wie einen intensiveren Wettbewerb auf globaler Ebene oder eine steigende Kaufkraft der Kunden. Diese Voraussetzungen stellen Unternehmen vor neue Herausforderungen, darunter eine schwankende Produktnachfrage sowie eine große Produktvielfalt [Kor10]. Gleichzeitig unterstützt die Globalisierung Unternehmen dabei, diese Herausforderungen zu bewältigen [Kor10]. Trotz des steigenden globalen Wettbewerbs und des demografischen Wandels in den Industrienationen wird es genügend Nachfrage geben, um die Produktionskapazitäten weiter auszubauen. Das Wachstum in den Entwicklungsmärkten treibt die Nachfrage zusätzlich an [Kor10]. Allerdings werden sich die Konsummuster verändern, da diese Entwicklungen zu zwei unterschiedlichen Kundenanforderungen führen: In entwickelten Ländern werden hochindividualisierte Produkte gefordert, während in den Entwicklungsmärkten stark regionalisierte Produkte gefragt sind [VBT16].

Getrieben durch gesellschaftliche Entwicklungen und neue Marktanforderungen müssen sich Produktionssysteme kontinuierlich weiterentwickeln [DM15]. Diese Entwicklungen begannen vor über 200 Jahren mit der Einzelfertigung, deren Ziel die Herstellung einzigartiger Produkte war, die den individuellen Kundenwunsch erfüllen. Über die Fließfertigung und die Massenproduktion gelangte man in den 1980er Jahren zur Massenindividualisierung, die eine große Produktvarianz bei hoher Qualität ermöglichte [BM20]. In den letzten Jahren ist der Wunsch nach immer individuelleren Lösungen bis hin zu personalisierten Produkten gewachsen, während durch die Globalisierung ein stark fluktuierender Markt entstanden ist. Diese neuen Anforderungen müssen produzierende Unternehmen bei weiterhin hoher Gesamtausbringungsmenge effizient bewältigen [JBR23].

Die Entwicklung der Fertigung hat sich dabei signifikant gewandelt: Einzelfertigungen waren darauf ausgelegt, eine Vielzahl heterogener Produkte in geringer Stückzahl zu produzieren [KM20]. Dieses Paradigma wurde durch die Massenproduktion abgelöst, die auf hohe Stückzahlen homogener Produkte fokussiert war. Mit der Einführung der Massenindividualisierung, die eine größere Produktvielfalt bei gleichbleibend hoher Ausbringungsmenge ermöglichte, wurde das Prinzip der Fließfertigung weiter angewendet [Pil00]. Allerdings stößt die Fließfertigung bei zunehmender Variantenvielfalt an ihre Grenzen.

Die in den 1980er Jahren eingeführte Massenindividualisierung wird heute zunehmend durch das Paradigma der Massenpersonalisierung ersetzt. Dieses Fertigungsparadigma führt zu einer weiteren Zunahme von Produktvarianten [Kor10]. Dabei ist zu beachten, dass diese Entwicklung zweigeteilt ist: Es gibt einerseits die Anforderung der Regionalisierung und andererseits die der Personalisierung in der Fertigung.

Regionalisierung bedeutet, dass Produkte unter Berücksichtigung von kulturellen, sozialen und rechtlichen Besonderheiten der jeweiligen Region entwickelt werden [VKK18]. Dabei werden weiterhin die Prinzipien der Massenindividualisierung angewandt. Hersteller entwickeln Varianten für die verschiedenen Regionen, aus denen der Kunde wählen kann [Kor10].

Personalisierung geht über die Massenindividualisierung hinaus: Hierbei ist der Kunde direkt in das Design seines Produkts eingebunden [ZEV12]. In der initialen Entwicklungsphase werden die allgemeine Produktstruktur sowie verschiedene Produktmodule entwickelt. Nach dem Verkauf des Produkts ist der Kunde in der personalisierten Entwicklungsphase beteiligt. Innerhalb eines vom Hersteller vorgegebenen Rahmens gestaltet der Kunde das Produkt gemäß seinen individuellen Wünschen [Kor10].

Die industriellen Revolutionen haben die von [Kor10] definierten Fertigungsparadigmen befähigt (Abb. 1.1). Gemeinsam mit der Massenpersonalisierung erhalten Cyber-Physische Systeme (CPS) Einzug in die Produktion. CPS stellen die Verbindung der drei Elemente Mechanik, Elektronik und Informatik dar [RKB16]. Das bedeutet, dass CPS zum einen physikalische Daten über Sensoren erfassen können und zum anderen mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge Einfluss nehmen. Die durch die Sensoren aufgenommenen Daten können ausgewertet und gespeichert werden, um anschließend mit der physischen oder digitalen Welt zu interagieren [aca11]. Die Basis für CPS bilden die drei Elemente Ubiquitous Computing, Internet der Dinge und Dienste sowie Cloud Computing und deren technologischen Ansätze. Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) ermöglichen eine kontextadaptive Steuerung der Produktion, sie ergeben sich aus einem Verbund von CPS in der Produktion. Damit die Vernetzung und Kommunikation zwischen allen beteiligten Entitäten funktioniert, werden geeignete Schnittstellen benötigt.

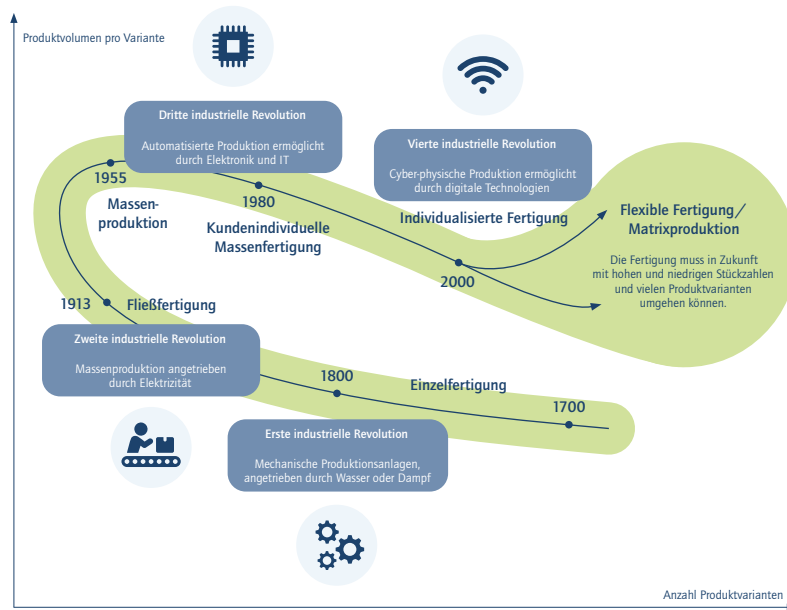


Abb. 1.1 Fertigungsparadigmen im Laufe der Zeit [Hel+22]

Es wird sowohl eine Maschine-zu-Maschine-Kommunikation als auch die Möglichkeit einer Mensch-Maschine-Interaktion erforderlich [SG16].

Aufgrund der personalisierten und regionalisierten Fertigung steigt die Produktvielfalt, wobei die Menge pro Variante hingegen sinkt. Dies führt zu einer steigenden Komplexität [VBT16]. Unternehmen benötigen eine hohe Reaktionsfähigkeit, um auf Marktveränderungen und sich ändernde Kundenanforderungen zu reagieren. Um dies zu erreichen, müssen Unternehmen so ausgelegt sein, dass sie eine häufige Umgestaltung ihrer Struktur, globalen Ressourcen, Supply Chain und Produktionsstätten bewerkstelligen können [Kor10]. Bauernhansl et al. [VBT16] sagen hierzu, dass Unternehmen ihre Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erhöhen müssen, um den Veränderungen gerecht zu werden. In der Produktion werden Unternehmen nicht mehr in der Lage sein, die gesamten Produkte und Prozesse genau zu definieren. Dies wird als Schwelle zwischen Kompliziertheit und Komplexität bezeichnet [VBT16]. Diese äußere Komplexität muss mit der inneren Komplexität in Einklang gebracht werden.

Da die neuen Anforderungen eine Kombination aus Einzelfertigung und Massenproduktion sind, gilt es, die positiven Eigenschaften dieser Fertigungsstrukturen zu kombinieren [Ble+22]. Dabei soll der evolutionäre Charakter der bisherigen Entwicklungen beibehalten werden, damit bestehende Produktionen an das neue Konzept angepasst werden können und nicht obsolet werden.

1.2 Problemstellung

Unternehmen stehen heute vor einer Vielzahl von Herausforderungen, die durch die Dynamik der Märkte, die zunehmende Variantenvielfalt und den steigenden Wettbewerbsdruck geprägt sind. Ein zentraler Treiber ist der anhaltende Trend zur Herstellung individualisierter Produkte, bekannt als Mass Customization [Kor10]. Dieser Begriff beschreibt die zunehmende Berücksichtigung von Kundenwünschen und die Entstehung immer stärker individualisierter Produkte [Hüt21].

Die steigende Individualisierung führt nicht nur zu einer wachsenden Anzahl an Produktvarianten, sondern auch zu Prozesszeitschwankungen, unterschiedlichen Prozesssequenzen und einer kontinuierlichen Integrationsplanung in der industriellen Montage. Dadurch werden bestehende Produktionssysteme vor erhebliche Herausforderungen gestellt. Dies spiegelt sich in der Einordnung bestehender Fertigungskonzepte in das Spannungsfeld von Flexibilität und Produktivität wider (Abb. 1.2).

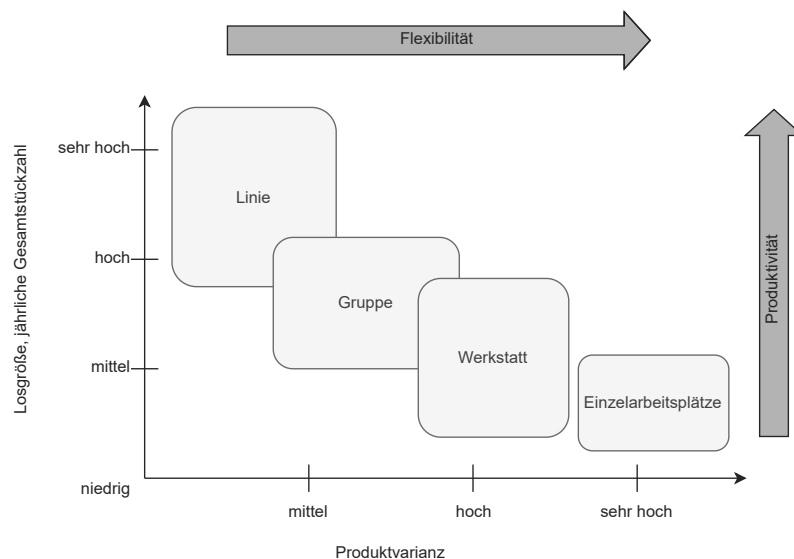


Abb. 1.2 Fertigungskonzepte im Spannungsfeld, in Anlehnung an [Hel+22]

Konventionelle, linienbasierte Montagesysteme wie die Fließfertigung sind effizient bei der Herstellung standardisierter Produkte in großen Stückzahlen, stoßen jedoch an ihre Grenzen, wenn es um die flexible Anpassung an individuelle Kundenwünsche und kurzfristige Änderungen im Produktionsprogramm geht [Hüt21]. Diese starren Strukturen sind nicht in der Lage, die Prozesskomplexität und die Anforderungen an Flexibilität und Wand-

lungsfähigkeit zu bewältigen [FEB17]. Gleichzeitig besteht der Wunsch nach einer erhöhten Automatisierung in der Montage großer und komplexer Komponenten. Diese ist jedoch im Rahmen konventioneller Montagesysteme oft nicht wirtschaftlich realisierbar, insbesondere wenn eine hohe Variantenvielfalt und eine dynamische Anpassung gefordert sind.

Darüber hinaus erschweren schwankende Absatzmengen und die schlechtere Prognostizierbarkeit von Kundenbedarfen die Produktionsplanung und -steuerung [QWS16]. Unternehmen müssen sich zunehmend an veränderte Nachfragebedingungen anpassen und dabei eine hohe Produktvielfalt bei gleichbleibender Qualität und Produktivität gewährleisten. Hinzu kommen kürzere Innovations- und Produktlebenszyklen, die den Anpassungsdruck zusätzlich erhöhen. Es werden neue Organisationsformen benötigt, die solche Herausforderungen bewältigen können [Hüt21].

Mit der Digitalisierung und den Konzepten von Industrie 4.0 bieten Cyber-Physische Matrixproduktionssysteme und fluide Produktionsansätze neue Möglichkeiten, die Vorteile von Flexibilität und Produktivität zu kombinieren [Hel+22]. Diese innovativen Ansätze erlauben die effiziente Herstellung personalisierter Produkte in hoher Stückzahl, stellen jedoch hohe Anforderungen an Unternehmen. Die technologische Komplexität solcher Systeme erfordert moderne digitale Werkzeuge und Produktionssteuerungssysteme, die in der Lage sind, flexible und hochdynamische Produktionsprozesse zu beherrschen [Küp+19]. Bestehende Systeme stoßen hierbei an ihre Grenzen. Darüber hinaus erfordert die Umsetzung solcher Konzepte eine umfassende Anpassung der Unternehmensorganisation sowie die Befähigung der Mitarbeiter für dynamische und anspruchsvolle Aufgaben. Die Integration moderner Automatisierungstechnologien in wandlungsfähige Produktionssysteme wird als Schlüssel angesehen. Gleichzeitig müssen Unternehmen sicherstellen, dass der Mensch weiterhin in die Bedienung und Steuerung solcher Systeme eingebunden bleibt [Bie+23].

Neben den organisatorischen und technologischen Herausforderungen stellen die wirtschaftlichen Aspekte ein zentrales Problem dar. Die Einführung neuer Produktionssysteme, die Flexibilität und Automatisierung vereinen, erfordert erhebliche Investitionen in Technologien und die Umrüstung bestehender Anlagen [LK13]. Gleichzeitig ist die Bewertung der Wirtschaftlichkeit solcher Systeme schwierig, da das Flexibilitätspotenzial neuer Produktionskonzepte oft schwer quantifizierbar ist und in klassischen Wirtschaftlichkeitsrechnungen nicht adäquat berücksichtigt wird. Jedoch löst auch die Matrixproduktion nicht alle Problemstellungen der Unternehmen. Stattdessen werden die gewünschten Charakteristiken von verschiedenen Fertigungskonzepten nur in Teilen erfüllt. Aus diesem Grund ist das Prinzip der Hybriden Produktion entstanden, bei dem die Linienfertigung mit der Matrixproduktion kombiniert wird. Eine Kombination der Vorteile verschiedener Fertigungssysteme ist aus den folgenden Gründen wünschenswert

[Ble+22]; [Rac+22]: Einerseits ist die Linienfertigung in der Lage, eine große Menge an Produkten profitabel zu produzieren, kann jedoch nicht gut mit Varianten umgehen. Andererseits können neu entwickelte, flexible Systeme wie die Matrixproduktion eine große Anzahl unterschiedlicher Varianten bewältigen, erreichen jedoch nicht die Produktivität der Linienfertigung. Methoden zur Kombination beider Systeme als Hybride Produktion sind daher ein lebhaftes Forschungsfeld [HG19]; [Göp+21]; [SBN24].

Aufgrund des unterschiedlichen Charakters der beiden Systeme ist die Integration des einen in das andere eine Herausforderung [Kam+20]; [SKN24]. Für eine Linienproduktion ist eine vordefinierte Reihenfolge der Produkte vorteilhaft, wenn es verschiedene Varianten zu verarbeiten gibt. Auf diese Weise können Taktverluste im Linienabschnitt reduziert und Ziele wie eine hohe Auslastung erreicht werden. In einer Matrixproduktion können Arbeitsstationen übersprungen werden und Varianten haben unterschiedliche Bearbeitungszeiten, was zu nicht-deterministischen Reihenfolgen führt. Daraus ergibt sich eine der Hauptherausforderungen in einer Hybriden Produktion [Kai+22]: die Steuerung der Ausgabereihenfolge des flexiblen Segments, um die Produktion in einer Fertigungslinie fortzusetzen. Zusätzlich ist es möglich, die Ausgabereihenfolge so zu steuern, dass sie von der Eingabereihenfolge abweicht. In diesem Fall ist nicht nur First In First Out (FIFO) möglich, sondern es kann eine optimale Reihenfolge für die folgende Produktionslinie generiert werden. Damit wird eine Re-Sequenzierung bei der Ausführung von wertschöpfenden Aufgaben möglich. Zusätzlich muss der Produktionsplan hinreichend schnell generiert werden, um die Vorteile einer Matrixproduktion voll auszuschöpfen.

1.3 Zielsetzung

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, sind bestehende Fertigungskonzepte nicht in der Lage, die unternehmerischen Herausforderungen der steigenden Individualisierung von Produkten, die damit verbundene Variantenvielfalt sowie die zunehmende Prozesskomplexität zu bewältigen, während gleichzeitig Flexibilität, Produktivität und Automatisierung wirtschaftlich vereint werden müssen. Neue Fertigungskonzepte wie die Matrixproduktion zielen darauf ab, diese Herausforderungen zu lösen. Allerdings wird in Wissenschaft und Praxis die Kombination neuartiger und bestehender Fertigungskonzepte als vielversprechende Alternative gesehen [Hel+22]; [Kam+19]. Dadurch sollen die Vorteile beider Fertigungskonzepte kombiniert werden, um alle Herausforderungen zu adressieren.

Die Hybride Produktion beschreibt die Kombination der neuartigen Matrixproduktion mit der bestehenden Linienfertigung. Dabei werden die variantenunabhängigen Prozesse im Liniensegment und die variantenabhängigen Prozesse im Matrixsegment durchgeführt. Es besteht die Möglichkeit, bestehende Produktionsstätten mit Fließfertigung zu einer Hybriden Produktion zu transformieren. Dies würde bedeuten, dass die bestehenden Ressourcen weiterhin genutzt werden könnten und keine neuen Produktionsstätten erforderlich wären. Bei der Kombination der Systeme gilt es, die gegenseitigen Abhängigkeiten in der Gestaltung zu berücksichtigen. Bestehende wissenschaftliche Ansätze zur Hybriden Produktion untersuchen insbesondere die Layoutgestaltung und Segmentierung [Kam+20]; [HG19]. Jedoch betonen diese Veröffentlichungen die Notwendigkeit der Erforschung einer Produktionssteuerung für die Hybride Produktion, da deren Implementierung eine entsprechende Steuerung voraussetzt.

Aus den vorangegangenen Ausführungen lässt sich die hohe Relevanz einer Produktionssteuerung für die Hybride Produktion ableiten. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit die folgende Zielsetzung verfolgt:

Entwicklung eines Produktionssteuerungskonzepts für das Matrixsegment einer Hybriden Produktion, das bei der Integration des Matrixsegments in zwei Liniensegmente in der Lage ist, die durch die Schnittstellen entstehenden Anforderungen zu erfüllen.

Die zu entwickelnde Produktionssteuerung muss so gestaltet werden, dass sie die gewünschten Produktvarianten der Kunden in der richtigen Menge und Qualität, termingerecht und unter Berücksichtigung einer Zielfunktion optimiert produzieren kann.

Zur Erreichung des genannten Forschungsziels gilt es, drei grundlegende Fragestellungen zu beantworten. Aus diesen Fragestellungen lassen sich die nachfolgenden Forschungsfragen ableiten.

Forschungsfragen

- **Forschungsfrage 1**

Welche Anforderungen werden an den Produktionsplan des Matrixsegments einer Hybriden Produktion gestellt?

Im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 1 gilt es, Anforderungen zu definieren, die ein Produktionsplan in der Hybriden Produktion erfüllen muss, um umsetzbar zu sein. Die Beantwortung dieser Forschungsfrage erfolgt primär in Abschnitt 3.2.

- **Forschungsfrage 2**

Wie können generische Produktionsplanungsregeln für die Hybride Produktion logisch formalisiert werden?

Im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 2 gilt es, die zuvor definierten Anforderungen in logische Regeln zu formalisieren, sodass sie im Zusammenspiel einen validen Produktionsplan gewährleisten. Die Beantwortung dieser Forschungsfrage erfolgt in Abschnitt 4.3.2.1 und Abschnitt 4.3.3.1.

- **Forschungsfrage 3**

Auf welche Weise können die logischen Regeln genutzt werden, um ein Matrixsegment innerhalb der Hybriden Produktion zu steuern?

Im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 3 gilt es, die zuvor formalisierten Regeln in einer Produktionssteuerung zu implementieren und in einem realen System zu evaluieren. Die Beantwortung dieser Forschungsfrage erfolgt in Abschnitt 4.3.2.2, Abschnitt 4.3.3.2 und Kapitel 5.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines allgemeingültigen Verfahrens zur Produktionsplanung für das Matrixsegment einer Hybriden Produktion. Dabei soll die Steuerung der Ausgangssequenz so gestaltet werden, dass kleine Puffer an den einzelnen Arbeitsstationen ausreichen und kein zentraler Puffer zur Entkopplung der Liniensegmente erforderlich ist. Für den weiteren Verlauf der Forschungsarbeit ist anzumerken, dass das zu entwickelnde Produktionssteuerungskonzept aufgrund seiner Charakteristika als Hybrid Production – Output Sequence Control with ASP (HyPr-ClASP) (Hybride Produktion – Steuerung der Ausgangsreihenfolge mittels ASP) bezeichnet wird.

1.4 Struktur der Arbeit

Zur Lösung der zuvor definierten Zielsetzung wird das Vorgehen in dieser Forschungsarbeit in drei Bereiche unterteilt: Anforderungserhebung, Verfahrensentwicklung und Evaluierung. Die Erhebung der Anforderungen an ein solches Produktionssteuerungskonzept erfolgt mithilfe einer Literaturrecherche. Hierzu wurde zunächst die Relevanz des Themas untersucht und bisherige Forschungsarbeiten analysiert. Aus dieser Analyse wurden die Anforderungen abgeleitet und bestehende Produktionssteuerungskonzepte für Matrixproduktionen auf ihre Erfüllung hin bewertet. Abschließend wurde aus der Bewertung der bisherigen Forschungsarbeiten die Forschungslücke identifiziert.

Der zweite Bereich, die Verfahrensentwicklung, basiert auf einem mehrstufigen Ansatz. Dabei werden die Anforderungen in logische Regeln formalisiert und Eingangsparameter strukturiert definiert. Zur Umsetzung der formalisierten Regeln wurden diese in ASP implementiert. Die strukturierte Definition der Eingangsparameter ermöglicht es, Hybride Produktionen verfahrensspezifisch zu beschreiben.

Zum Abschluss wird das Verfahren anhand verschiedener Untersuchungsszenarien evaluiert. Dies erlaubt eine Bewertung des Verfahrens hinsichtlich seiner Implementierbarkeit in Realsystemen sowie seiner Skalierbarkeit.

Da dieses Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen dient, bestimmt es gleichzeitig den inhaltlichen Aufbau dieser Forschungsarbeit (Abb. 1.3). Neben den drei beschriebenen Bereichen des Vorgehens, die in Kapitel 3 bis 5 dargestellt werden, beginnt die Forschungsarbeit nach dem einleitenden Kapitel (Kapitel 1) mit einer Erläuterung der Grundlagen der Arbeit (Kapitel 2). Abgeschlossen wird die Arbeit in Kapitel 6 mit einer Ergebniszusammenfassung und einem Forschungsausblick, der auch eine kritische Reflexion der Arbeit umfasst.

Kapitel 1 Einleitung	Ausgangssituation	Problemstellung	Zielsetzung	Struktur der Arbeit
Kapitel 2 Grundlagen der Arbeiten	Fertigungskonzepte	Produktionsplanung und -steuerung	Antwortmengenprogrammierung	
Kapitel 3 Grenzen bisheriger Arbeiten	Gestaltung Hybrider Produktionen	Anforderungen an die Produktionssteuerung der Hybriden Produktion	Produktionssteuerung in der Matrixproduktion	
	Forschungslücke			
Kapitel 4 HyPr - CIASP	Ziel- und Aufgabenstellung	Struktur und Ablauf	Systembeschreibung	Produktionsplan
Kapitel 5 Empirische Evaluation des Verfahrens	Versuchsdesign	Reale Versuchsproduktionsumgebung	Simulationsumgebung	Zusammenfassende Betrachtung der Evaluierung
Kapitel 6 Ergebniszusammenfassung und Forschungsausblick	Zusammenfassung der Forschungsarbeit	Reflexion	Forschungsausblick	

Abb. 1.3 Struktur der Forschungsarbeit