

# Kapitel 1

## Einleitung

In den folgenden vier Abschnitten dieses Kapitels erfolgt zunächst eine Kontextualisierung des Forschungsprojekts, die das Aufzeigen der gegenwärtigen wie auch der zukünftigen Eigenschaften von Produktionsversorgungs- respektive Produktionsumgebungen umfasst. Diese Eigenschaften bilden die Grundlage für die Darlegung der Herausforderungen, die aus dem Aufeinandertreffen der durch dynamische sowie komplexe Umfelder gekennzeichneten Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme resultieren. Geleitet durch den Anspruch, sich mit diesem Forschungsprojekt diesen Herausforderungen zu stellen, zielt die zentrale These auf ein innovatives innerbetriebliches Produktionsversorgungskonzept ab, das als Ansatz zukunftssträchtige Eigenschaften bei der Bewältigung dieser kritischen Aufgaben aufzeigt. Die Derivation einer entsprechenden Zielsetzung, einschließlich der Zielgrößen, ebenso wie die Formulierung von vier Forschungsfragen basieren auf dieser These.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird im Interesse einer besseren Lesbarkeit nicht ausdrücklich in geschlechtsspezifische Personenbezeichnungen differenziert. Die gewählte männliche Form schließt eine adäquate weibliche Form gleichberechtigt ein.

## 1.1 Ausgangssituation

Als Henry Ford 1913 das Fließband einführte, konnte der Automobilpionier den Paradigmenwechsel, der sich aus der Massenproduktion ergab, noch nicht erahnen. Allerdings war eine solch ausgelegte Massenproduktion nur mit der Erfindung der dafür speziell entwickelten Fertigungsstraßen realisierbar, auf welcher Motoren, Getriebe und Hauptkomponenten von Automobilen hergestellt wurden. Derartig dedizierte Fertigungslinien weisen eine überaus hohe Produktionsrate für die Herstellung vereinzelter Teiltypen auf und sind darüber hinaus bei einer hohen Nachfrage besonders gewinnbringend. Die Charakteristik solcher Fertigungsstraßen machten sie insbesondere für die Produktion großer Produktmengen bis Mitte der 1990er Jahre zu den rentabelsten Systemen [KS10, S. 1].

Einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Produktion in Richtung höherer Qualität und Flexibilität bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten leistete Taiichi Ohno mit dem Toyota-Produktionssystem. Die sogenannte *Lean Production* ermöglicht eine strukturierte Herangehensweise zur Anpassung an eine kundenorientierte Produktion und wurde im Laufe der Zeit immer weiter optimiert [Dic15, S. 4 ff.].

Die seit Jahren weitergehenden Entwicklungen wie auch die *Globalisierung* bedingen dabei grundlegende Modifikationen der Produktionssysteme in der industriellen Produktion. So machten sich schon 2011 Megatrends bemerkbar, welche einen Ausblick auf die zukünftige Produktion boten [AR11, S. 10]. So zeichnete sich schon der Trend ab, dass eine steigende Nachfrage nach kundenspezifischen Produkten durch eine kumulative Verkürzung der Produktlebenszyklen begleitet wird [AR11, S. 15]. Weitere Herausforderungen, die mit der Globalisierung einhergehen, sind beispielsweise ein starker und insbesondere weltweiter Wettbewerb, zunehmende Kaufkraft der Kunden sowie steigende Prozessgeschwindigkeiten [Vec06, S. 274], [Sch06, S. 745], [SSB12, S. 426], [AR11, S. 15].

Insbesondere die erwähnten Kundenwünsche nach individuellen Produkten haben einen signifikanten Einfluss auf den Markt: Der einstige Verkäufermarkt wurde abgelöst durch einen Käufermarkt, in dem die *Kundenorientierung* einen maßgeblichen Wettbewerbsfaktor darstellt [Vec06, S. 274], [Sch06, S. 745], [SSB12, S. 426], [Zei19, S. 1]. Unternehmen wollen erwartungskonform bei diesem Wettbewerb mithalten und ihre Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis stellen. Dabei sehen sie sich gezwungen, zum einen die individuellen Kundenwünsche zu erfüllen und zum anderen die sich ständig ändernden Kundenanforderungen zu berücksichtigen [Däu17, S. 11], [Kor10, S. 375], [SM15, S. 70]. Dieses Phänomen wird durch die Möglichkeit des Kunden forciert, über das Internet jederzeit Produkte verschiedener, internationaler Anbieter zu vergleichen. Das führt zu einer Abnahme der Kundenloyalität und der Bedeutung des Markenimage. Den Zuschlag erhält eher der Anbie-

ter, der den Kundenbedürfnissen frühestmöglich sowie mit den geringsten Kosten gerecht wird [Bus17], [GH10, S. 10], [VBH17, S. 67].

Besonders in den letzten zehn Jahren führten diese Tendenzen zu einer signifikanten Zunahme der Anzahl von Produktvarianten, während das Gesamtabsatzvolumen weitgehend unverändert bleibt [GFL11, S. 204], [Hüt]. Eine derartige Entwicklung im Bereich der Produktindividualisierung wird ferner durch ein Zitat von Prof. Hubert Walzl, einem Vorstandsmitglied aus der Produktion und Logistik der Audi AG, bezüglich der theoretisch gegebenen  $1,1 \cdot 10^{38}$  Konfigurationsmöglichkeiten beim Modell A3 verdeutlicht [Los16], [Zei19, S. 2 f.], [Küp+20]: „Jeder soll so einzigartig sein wie ein Maßanzug.“

Die steigenden Variantenzahlen führen gleichzeitig zu einer Senkung der Produktionsmenge pro Variante und so insgesamt zu einer zunehmenden **Dynamik und Komplexität** [BHV14, S. 13]. Im Umgang mit dieser Situation obliegt es Unternehmen, eine häufige Umgestaltung ihrer Struktur der globalen Ressourcen vorzunehmen und die Supply Chain in ihren Produktionsstätten anzupassen [Kor10, S. 377]. Dabei ist die Erhöhung der Anzahl von Produktneu- und -weiterentwicklungen je Zeitintervall erforderlich, damit Unternehmen den Kundenwünschen gerecht werden können. Zugleich schließt dies eine Verkürzung der Time-to-Market sowie der Produktlebenszyklen ein [GFL11, S. 204], [PMB12, S. 160], [Böc+17, S. 541], [Zei19, S. 5].

Damit Unternehmen konkurrenzfähig sein können, müssen sie mit kurzzyklischen, schwankenden Märkten umgehen können. Mit diesen Anforderungen ist der Erfolg in solch einem Markt von der **Wandlungsfähigkeit und Flexibilität** eines Unternehmens abhängig [Wie+07, S. 1], [ALW06, S. 1], [VK18, S. 1], [Win+17, S. 2 und S. 22], [SF07, S. 1], [Win+17, S. 1 und S. 14], [BHV14, S. 13]. Dies wird auch von Bauernhansl et al. [BHV14] affirmiert: Er konstatiert, dass Unternehmen erst durch die Erhöhung ihrer Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Lage sind, Veränderungen umsetzen zu können. Eine vollständige Definition aller Produkte sowie Prozesse werden somit insbesondere Unternehmen in der Produktion nicht länger vornehmen können. Diese als Schwelle zwischen **Kompliziertheit und Komplexität** benannte Gegebenheit [BHV14, S. 13] führt zur Konklusion, dass die äußere Komplexität mit der inneren Komplexität vereinbart werden muss.

In diesem Kontext sieht Ashbys Gesetz vor, dass ein System gleichermaßen komplex sein muss wie sein Umsystem [KS14, S. 28]. Demnach kann ausschließlich Komplexität mit Komplexität umgehen [BHV14, S. 14], [Spa13, S. 19].

Diese Gegebenheiten führen zur Anforderung einer **dezentralen, autonomen Intelligenz**, welche imstande ist sich selbst zu organisieren [Spa13, S. 19], [BHV14, S. 21], [Weh20, S. 131], [SF07, S. 14], [Boc18, S. 3], [Neu18, S. 198], [KWR06]. Dazu wurde auf der Hannover Messe 2011 der Terminus „Industrie 4.0“ eingeführt, der die vierte industrielle Revolution durch den

Einsatz von *cyberphysischen Systemen* (CPS) beschreibt. Werden CPS in der Produktion eingesetzt, wird auch von *cyberphysischen Produktionssystemen* (CPPS) gesprochen [DH14, S. 56], [Win+17, S. 1 und S. 24], [AH17, S. 4].

Bei einem CPPS handelt es sich um ein System aus autonomen und kooperativen Elementen, welche situationsbezogen über alle Produktionsebenen hinweg miteinander interagieren – von den Prozessen über die Maschinen bis hin zu den Produktions- und Logistiknetzwerken [Mon14, S. 10], [Car19, S. 10 und S. 13], [BHV14, S. 146], [Rot16, S. 23]. Ein CPPS ermöglicht das Aufbrechen klassischer Produktionsstrukturen, sodass alternativ ein flexibler Produktionsraum mit skalierbaren Produktionsmodulen geschaffen wird. In Abhängigkeit von der Variante werden im genannten System die Produktionsmodule flexibel anvisiert [BHV14, S. 21], [AH17, S. 61], [BSR19, S. 74], [Bro10, S. 19].

Der Zusammenhang dieser Entwicklungen wird in der folgenden Abb. 1.1 zusammengefasst. Dadurch wird verdeutlicht, dass sich die Faktoren gegenseitig bedingen.

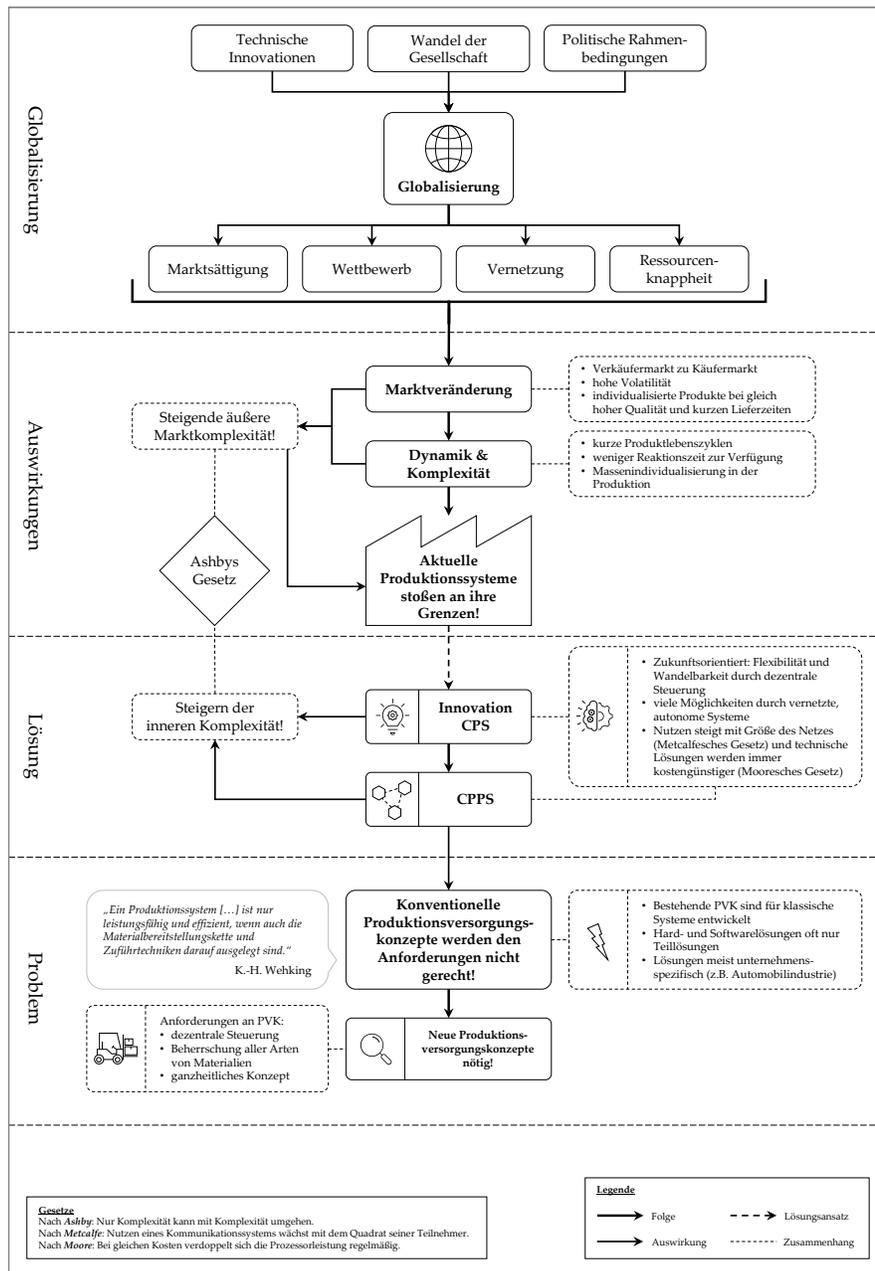


Abb. 1.1 Schaubild einer Argumentationskette zur Einführung von CPPS bzw. Darlegung der Forschungslücke (in Anlehnung an Hildebrand et al. (s. Anhang A.4, S. 229))

Resultierend daraus ist ein zunehmendes Bestreben nach einer *Neuausrichtung der Produktions- bzw. Logistikprozesse* zu verzeichnen, welches

zunehmend auf eine rationellere und effizientere Herstellung eines breiten, zugleich stark ausdifferenzierten Produktspektrums abzielt [Weh20, S. 269], [Spa13, S. 23], [BHV14, S. 11 f.], [VBH17, S. 173].

## 1.2 Problemstellung

Aus dem zuvor beschriebenen Abschnitt geht hervor, dass Unternehmen in der Produktion aufgrund der Entwicklungen hin zu einem dynamischen und komplexen Umfeld vor neuen Aufgaben stehen. In diesem Abschnitt liegt der Fokus in erster Linie auf der Darlegung eminenten Herausforderungen im Hinblick auf innerbetriebliche Produktionsversorgungsbedingungen mit diskreter Fertigung, welche im Zusammenhang der vorliegenden Forschungsarbeit stehen. Infolge der steigenden Tendenz kundenindividueller Produktion, nehmen die Anforderungen an die Produktionsversorgung im Hinblick auf sinkende Losgrößen, häufige Produktwechsel und das Erfordernis der Rücklagerung von Anbruchmengen zu [WSM19, S. 167]. Ungeachtet der eingangs beschriebenen *flexiblen Produktionsräume* ist überdies zu erkennen, dass auch bewährte *Logistikkonzepte an ihre Grenzen* stoßen. Folglich ist es auch in der Logistik erforderlich auf Flexibilisierung hinzuwirken. Dies wird durch die Aussage von Günthner et al. [Hom10, S. 3], [Wes13, S. 1 und S. 7 ff.], [VK18, S. 3], [Gol14, S. 19], [Weh20, S. 49 und S. 130], [BHV14, S. 10] hervorgehoben:

„[...] individualisierte Produkte erfordern vielmehr auch eine maßgeschneiderte Logistik. [...] Schwerfällige, zentral gesteuerte Produktionen werden dieser Anforderung jedoch nicht gerecht.“

Eine derartige Individualisierung im Hinblick auf personalisierte Produktion hat zur Folge, dass neue Ansprüche an die Produktionslogistik aufkommen, wofür ereignisgesteuerte Logistiksysteme benötigt werden. So wird einerseits die Erhöhung der logistischen Effizienz angestrebt, während andererseits die Individualisierung sichergestellt werden muss. Dieses Dilemma setzen Günthner et al. [Hom10, S. 4] als maßgebliche Herausforderung fest, welche es nicht zu vernachlässigen gilt. Zusätzlich zu den oben genannten Modifizierungen bildet *„eine gesamte [...] Anpassung der Produktion [...] einschließlich der Logistik, der Montage und sogar des Geländes [...]“* eine notwendige Bedingung, damit ein flexibles Reagieren möglich ist [Wie+07, S. 803]. Daraus kann konkludiert werden, dass *starre, verkettete Maschinen und Materialflusssysteme* hinsichtlich der individualisierten Produktion *keine adäquate Lösung* vorweisen können [BHV14, S. 621]. Die Auflösung des klassischen Fließprinzips zugunsten einer taktzeitfreien Produktion mit einer Matrixanordnung der Maschinen bietet Potenziale hinsichtlich der Auslastung bei variantenspezifischen Bearbeitungszeiten und der Reaktionszeit der Produktion [Ker+15, S. 3 ff.]. Vor allem bei der Montage muss auf kurzzeitige Änderungen der Kundenwünsche eingegangen und entsprechend gehandelt

werden, sodass die *Produktionsversorgungskonzepte eine wichtige Komponente* darstellen: Sie bestimmen die Liefertreue sowie die Lieferzeit [NWW12, S. 285 f.].

Für die Fähigkeit zur Beherrschung der Variantenvielfalt ist ein hohes Maß an Transparenz innerhalb der Materialströme erforderlich, wofür *Produktionsversorgungskonzepte die Grundlage bilden* [NWW12, S. 290]. In der Fachliteratur wird hinsichtlich wirkungsvoller produktionslogistischer Prozesse auf die Dezentralisierung von Steuerungs- und Produktionsplanungssystemen hingewiesen [Bra15]. *Derzeitige Produktionsversorgungskonzepte werden diesen neuen Anforderungen nur ansatzweise gerecht und müssen flexibler gestaltet werden* [GH10, S. 15ff.], [VK14, S. 1], [Gol14, S. 19], [Weh20, S. 290], [VK18, S. 6].

So ist deutlich erkennbar, dass die Planung von Systemen der Produktionsversorgung ein hohes Maß an Komplexität aufweist und damit in einer von starken Veränderungen geprägten Umwelt eine kritische Aufgabe darstellt. Der Aspekt der Personalintensität führt dabei vor allem in dem Falle, dass Kommissioniertätigkeiten ausgeführt werden müssen, selbst im Regelbetrieb zu hohen Kosten. In diesem Zusammenhang konstatieren Wildraut et al. [WSM19, S. 167]:

„[...] Relevanz des Themas/Problemstellung für jede Form von Produktion ist die Versorgung der Arbeitsplätze in der Fertigung und Montage mit dem benötigten Material eine elementare und notwendige Aufgabe. [...] Alte Konzepte sind dafür oftmals nicht geeignet.“

Die Methodik in der Planung ist hinsichtlich der Klarheit über die Optionen in der Gestaltung, der Bewertbarkeit von Alternativen sowie systematischer Verbesserung auszubauen und zu optimieren. Im Hinblick auf die Produktionsversorgung erscheint die Planung aufgrund unterschiedlicher Faktoren eine kritische Aufgabe zu sein. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, dass in der Literatur eine hohe Intransparenz in Bezug auf die maßgeblichen Inhalte nebst der Vorgehensweise und Entscheidungsfindung vorhanden ist. Während einerseits keine umfassende Übersicht der Produktionsversorgungskonzepte vorliegt, ist andererseits kein allgemeingültiges Verständnis der grundlegenden Zielgrößen vorhanden. Folglich sind in der Gesamtheit kaum Kriterien beschrieben, welche ein Produktionsversorgungssystem allumfassend spezifizieren und bewerten. In der Literatur ist ein intensives Bestreben nach der Entwicklung einer Methode zur Unterstützung des Planungsprozesses vorhanden. Gleichwohl existiert bislang noch keine weitreichende und allgemeingültige Vorgehensweise zur Planung von Produktionsversorgungssystemen [WSM19, S. 167 f.].

In diesem Zusammenhang existieren zwar verschiedene Planungsansätze ([Sto88], [BL94], [Ric95], [Ess96], [Eic01], [Grü04], [Gün+08], [RI10], [Dur14]), doch ihr Vergleich zeigt hochgradige Unterschiede im Hinblick auf ihre Planungsinhalte auf (s. Tabelle A.1, S. 216). So ist kein Ansatz ersichtlich, der

zum einen alle potenziellen Konzepte der Produktionsversorgung im festgesetzten Betrachtungsbereich einbezieht und zum anderen mit der logistischen Problemstellung angemessen umgeht [WSM19, S. 170].

Aus der oben beschriebenen Problemdarlegung lässt sich resümieren, dass die bisher bestehenden Planungsansätze auf einer Zusammenstellung verschiedener Produktionsversorgungskonzepte beruhen und für eine spezifische Anwendung ausgelegt sind. Darüber hinaus erfolgt die Planung nicht im Hinblick auf das dynamische Umfeld eines CPPS.

### 1.3 Ziel der Arbeit

Nach der Darlegung der Problematiken Einsatz klassischer deterministischer, auf hierarchischen Architekturen stützender Produktionsversorgungskonzepte in einer dynamischen und komplexen Produktionsumgebung mit diskreter Fertigung wird im Folgenden die **Zielsetzung** definiert, die im Kontext dieser Forschungsarbeit anvisiert ist:

„Modellierung eines allgemeingültigen Konzeptes zur dezentral gesteuerten Produktionsversorgung in CPPS mit autonom agierenden Einheiten. Das zu entwickelnde Steuerungskonzept soll die Abläufe der Produktionsversorgung ganzheitlich betrachten. Hierzu zählen die Steuerung, Auslösung und Durchführung der Produktionsversorgung sowie die flexible Gestaltung des Bereitstellungsortes.“

Aus dieser Zielsetzung heraus soll nun ein Produktionsversorgungskonzept entwickelt werden, das die Fähigkeit aufweist, sein Verhalten autonom sowie schnell reagierend an unerwartete Veränderungen im Umfeld zu adaptieren. Mit dieser Fähigkeit soll die vom Kunden gewünschte Produktvariante nebst der richtigen Menge und Qualität auch rechtzeitig und kosteneffizient hergestellt werden können. Hierbei trägt das zu entwickelnde Produktionsversorgungskonzept aufgrund seiner eminenten Merkmale die Bezeichnung *Real Time Production Supply Concept* (Echtzeit-basiertes Produktionsversorgungskonzept) und wird zur Erleichterung des Leseflusses mit dem Akronym *RealProS* abgekürzt. Mit dem Fokus auf die oben formulierte Zielsetzung wird im Zuge der Forschungsarbeit versucht, vier fundamentale Fragestellungen zu beantworten, welche im Folgenden mit aufsteigender Nummerierung genannt werden.

#### **Forschungsfrage 1:**

*Mit welcher Vorgehensweise kann die Entwicklung eines innovativen Produktionsversorgungskonzeptes unter Berücksichtigung klassischer und neuartiger Anforderungen strukturiert begleitet werden?*

Da agentenbasierte logistische Prozesse aufgrund ihrer Komplexität eine gesonderte Form der Modellierung erfordern, thematisiert Forschungsfrage 1 die Konzipierung einer Entwicklungsmethode, die die spezifischen Ziele der Produktionsversorgung berücksichtigt. Diese Ziele umfassen dabei sowohl

die klassischen, logistischen Zielkonflikte als auch noch herauszuarbeitende Anforderungen neuer Produktionssysteme.

**Forschungsfrage 2:**

*Wie baut sich die Morphologie der Produktionsversorgungsprinzipien auf und welche Prozesse sind dafür notwendig?*

Forschungsfrage 2 zielt auf die allgemeingültige Beschreibung der Produktionsversorgungsprinzipien in dem zu entwickelnden Konzept ab, einschließlich der Definition der zugehörigen Abläufe, die eine einfache Umsetzbarkeit anwendungsunabhängig ermöglichen.

**Forschungsfrage 3:**

*Welche Elemente und Eigenschaften sind für die Ausgestaltung der Produktionsversorgungsprinzipien notwendig, damit alle Arten von Materialien in einer Symbiose mit dynamischer und komplexer Produktionssteuerung entsprechend der 5R angeliefert werden können?*

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 soll die Berücksichtigung von material- und produktionsspezifischen Einflussfaktoren stattfinden und in das zu entwickelnde Konzept einfließen.

**Forschungsfrage 4:**

*Welche Robustheit lässt sich bei einer experimentellen Implementierung des zu entwickelnden Produktionsversorgungskonzepts zeigen, bei der dies unter Berücksichtigung der klassischen Ziele und Herausforderungen der neuen Produktionsumgebung beurteilt wird?*

Im Hinblick auf Forschungsfrage 4 soll im Rahmen einer experimentellen Untersuchung die Erfüllung der Produktionsversorgungsaufgabe des neuartigen Produktionsversorgungskonzeptes stattfinden und dies mithilfe der dargestellten, spezifischen Zielgrößen erfolgen.

## 1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit ist in sechs Kapitel unterteilt. Nach diesem ersten Kapitel behandelt Kapitel 2 die für das Verständnis erforderlichen Grundlagen und die Einordnung in die Forschungsarbeit. An dieser Stelle werden grundlegende Terminologien erklärt und die für die Forschungsarbeit relevanten Zielgrößen abgeleitet. In Kapitel 3 erfolgt eine Analyse des Standes der Technik und Wissenschaft in Bezug auf die Produktionsversorgung, welche auf eine systematische Ableitung des Forschungsbedarfs abzielt. Hierbei wird eine Grundlage geschaffen, um zum einen die Notwendigkeit der vorliegenden Forschungsarbeit zu legitimieren und zum anderen eine bestimmte Auswahl bereits vorhandener Produktionsversorgungskonzepte vorzustellen und sie zu analysieren. Abschließend erfolgt eine kri-

teriengeleitete Bewertung dieser selektierten Produktionsversorgungskonzepte. Kapitel 4 bildet den Kern der Forschungsarbeit, in welchem es die Forschungslücke zu schließen gilt. An dieser Stelle wird das Produktionsversorgungskonzept *RealProS* entwickelt und formal beschrieben. In diesen drei Kapiteln erfolgt die Beantwortung der ersten drei Forschungsfragen. Die Herleitung der Zielgrößen in Kapitel 2 und die Erkenntnisse der Ermittlung der Forschungslücke in Kapitel 3 dienen zur Behandlung von Forschungsfrage 1, die mit der Auswahl der Modellierungsmethode in Kapitel 4 komplementiert wird. Die Ergebnisse der Forschungsfrage 1 fließen in Kapitel 4 ein, bei der die Beantwortung der zweiten und dritten Fragestellung im Fokus steht.

Schließlich wird in Kapitel 5 das entwickelte Produktionsversorgungskonzept *RealProS* empirisch auf seine Validität hin untersucht und die Erfüllung der Produktionsversorgungsaufgabe quantitativ und qualitativ ermittelt. Die Untersuchungsergebnisse werden dargelegt und evaluiert, wodurch die letzte Fragestellung beantwortet wird. Schließlich wird im letzten Kapitel reflektierend ein Fazit aus dem Ergebnis der Forschung gezogen und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben.

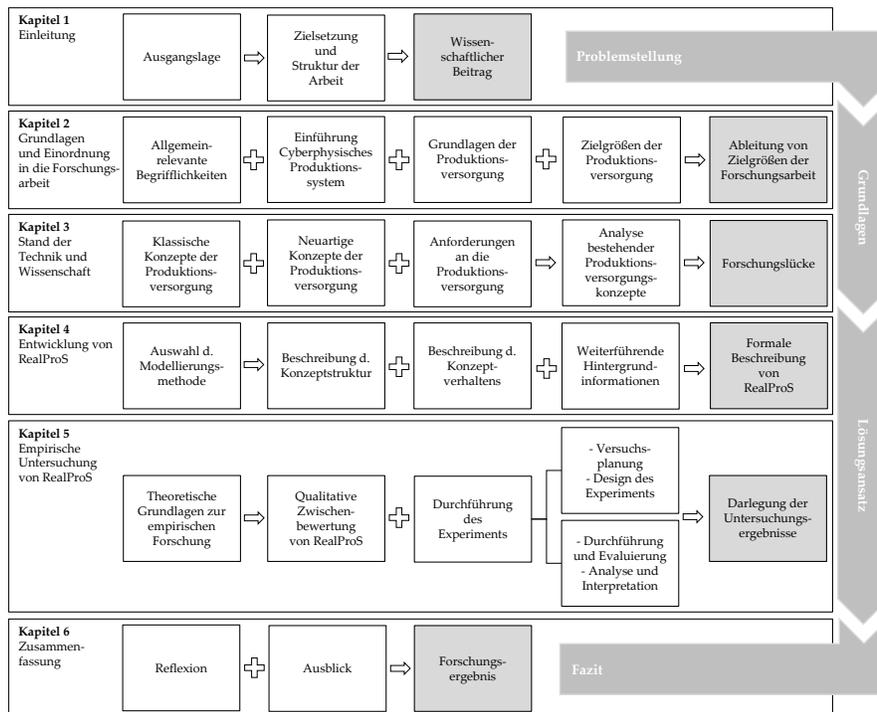


Abb. 1.2 Struktur der Forschungsarbeit (eigene Darstellung)