1 Einleitung

Produzierende Unternehmen sind heute immer stärker dynamischen und unvorhersehbaren Umfeldveränderungen ausgesetzt [ACKERMANN et al. 2013, S. 4618; WESTKÄMPER 2006, S. 5; CHRYSSOLOURIS 2006, S. 22 f.; HENKE u. HEGMANNS 2017, S. 341 f.]. Die Trends der Globalisierung, Individualisierung und Beschleunigung führen zu häufigeren Veränderungen der Rahmenparameter von langfristig ausgelegten Produktionssystemen [KAMPKER 2016, S. 192; SCHRAFT et al. 2003, S. 316; ELMARAGHY et al. 2011, S. 2]. Die Lebenszyklen von Produktionsanlagen übersteigen bei Weitem die Produktlebenszyklen [MÜLLER et al. 2009, S. 53 f.]. Fertigungssysteme müssen mehrere Generationen und Varianten von Produkten mit unterschiedlichen marktseitigen Anforderungen bewältigen und trotzdem wirtschaftlich bleiben [WESTKÄMPER 2000, S. 92; NYHUIS et al. 2007, S. 286 f.]. Produktionssysteme müssen daher regelmäßig verändert und angepasst werden [WIENDAHL u. HERNÁNDEZ 2002, S. 133; KAMPKER et al. 2014, S. 192; ENDERLEIN 2003, S. 282]. Dieser Anpassungsdruck spiegelt sich in Projekten der Strukturänderung von Unternehmen wider – mehr als 41 Prozent der Unternehmen haben in den letzten fünf Jahren häufiger als sechs Mal eine gezielte Veränderung der Anordnung der Anlagen/Maschinen der Produktion vorgenommen [LUCKERT et al. 2016, S. 14].

Gerade kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind geprägt von gewachsenen Fertigungsstrukturen, in denen immer wieder Bereiche ergänzt oder für einzelne Produkte umgeplant wurden, ohne dabei das Produktionssystem ganzheitlich zu betrachten [BRACHT 2002, S. 154]. Diese unterschiedlichen Strukturen gefährden die Erreichung der logistischen Ziele bezüglich Durchlaufzeit, Lieferzeit, Beständen und Kosten [PAWELLEK 2008, S. 122], die sich jedoch zu zentralen Einflussgrößen für die Kaufentscheidung des Kunden entwickelt haben [HÄRTEL et al. 2017, S. 238; BROSZE et al. 2011, S. 18; KUYUMCU 2013, S. 16]. Bei der Neuplanung einer Fabrik werden heute alle Planungsaspekte genau betrachtet und größtenteils sogar simuliert [DOMBROWSKI et al. 2001, S. 97] – die Planungshäufigkeit nimmt dabei stark zu und gleichzeitig nimmt die für die Planung verfügbare Zeit ab [NYHUIS et al. 2004, S. 95; WIENDAHL u. HERNÁNDEZ 2000, S. 37 f.]. Die meisten Planungsaufgaben innerhalb der Produktion sind allerdings regelmäßig wiederkehrende Planungsprobleme, bei denen einzelne Bereiche umgeplant oder ergänzt werden [LÜBKEMANN et al. 2015, S. 71; BRACHT 2002, S. 154; SCHRAFT et al. 2004, S. 59]. Diese Herausforderungen sind neben dem Tagesgeschäft besonders für KMU mit wenig Fabrikplanungserfahrung und ohne eigene Planungsabteilung schwer zu bewältigen [NYHUIS et al. 2004, S. 95; BRACHT u. ECKERT 2004, S. 141; DOMBROWSKI u. TIEDEMANN 2004, S. 137; BUSSEMER et al. 2017, S. 215].

Eine Auslegung von Produktionssystemen für eine aufwandsarme Veränderungsfähigkeit für zukünftige Anpassungen an Markt- und Umfeldfaktoren wird daher unter dem Begriff der Wandlungsfähigkeit immer wichtiger [NYHUIS et al. 2010, S. 4 ff.; KAMPKER et al. 2013, S. 291 ff.; HEINEN et al. 2010, S. 407; TEN HOMPEL u. HENKE, S. 250 ff.]. Die Gestaltungsfelder Technologie, Organisation und Logistik von Produktionssystemen stellen dabei die Veränderungsbereiche für Unternehmen dar. Gerade die Fertigungsstrukturen, also die Organisationsprinzipien und die logistischen Prozesse, Planungs- und Steuerungsregeln, die alle Elemente eines Produktionssystems verbinden, bieten ein großes Potenzial für investitionsarme Anpassungen und determinieren die mögliche Leistung des Gesamtsystems [LÜBKEMANN et al. 2015, S. 71; SCHULZE 2013, S. 2 f.; MÜNZBERG et al. 2009, S. 392; REUTER et al. 2016b, S. 42; SCHUH et al. 2017, S. 384]. Um die Fertigungsstrukturen zielgerichtet anzupassen, ist eine strukturelle Wandlungsfähigkeit notwendig, die zur organisatorischen Veränderung und Anpassung von Organisationsprinzipien befähigt [WIENDAHL u. HERNÁNDEZ 2002, S. 137]. Dazu müssen die komplexen Wirkzusammenhänge der Fertigungsstrukturen bewertbar gemacht und der Einfluss auf die Leistung des Produktionssystems quantifiziert werden.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Strukturplanung von Produktionssystemen ist eine Aufgabe der Fabrikplanung. In dieser Aufgabe werden die qualitativen und quantitativen Beziehungen zwischen den Ressourcen des Produktionssystems festgelegt und damit die produktionslogistische Organisation bestimmt. Die Fragestellungen, welche Produkte wie hergestellt werden (Prozessplanung) und welche Maschinen und weiteren Ressourcen dabei zum Einsatz kommen (Ressourcenplanung), werden nicht betrachtet. Der Gestaltungsraum wird auf die produktionslogistische Organisation beschränkt, deren Gestaltungselemente klar definiert werden müssen. Es fehlt eine Merkmalssystematik, die jedoch weder in der Literatur noch in der Praxis existiert [SCHULZE et al. 2010, S. 818].

Es existieren verschiedene etablierte und effiziente Ausprägungen der Struktur von Produktionssystemen, die jeweils einzelne Teilbereiche der Struktur sinnvoll ausprägen können. Allerdings sind die Gestaltungsmerkmale unabhängig voneinander definiert und in ihren Wechselwirkungen zueinander nicht eindeutig beschrieben [SCHUH et al. 2007, S. 195]. Jede Ausprägung kann nur unter den richtigen Rahmenbedingungen und synergetisch wirkenden anderen Teilstrukturelementen das gewünschte Ergebnis ermöglichen. Die existierenden Ansätze betonen, dass der Einfluss der Fertigungsstruktur auf die Leistung unterschätzt wird [SCHUH et al. 2014, S. 469 f.].

Für die zielgerichtete Ausprägung einzelner Gestaltungsmerkmale existieren in der Literatur Handlungsempfehlungen und einzelne quantitative Indikatoren, die jedoch nur eine vage und qualitative Entscheidung für bestimmte Ausprägungen erlauben. Weiterhin ist es in der Regel sinnvoll, in einem Produktionssystem verschiedene Bereiche mit unterschiedlichen Strukturen zu gestalten, um ein stark inhomogenes Produktionsprogramm wirtschaftlich fertigen zu können [MÜNZBERG u. NYHUIS 2009, S. 1376]. Die quantitative Definition der Struktur wird häufig durch Segmentierungs- und Teilfamilienbildungsverfahren vorgenommen [WILDEMANN 1992, S. 238 ff.]. Auch hier können wieder nur Indikatoren eingesetzt werden, um homogene Teilbereiche, meist mit Heuristiken, zu schaffen. Die mögliche qualitative Struktur wird dabei nicht ausreichend berücksichtigt und das Zusammenwirken verschiedener Strukturen vernachlässigt.

Die Bewertung der damit qualitativ und quantitativ definierten Struktur des Produktionssystems wird nur im Gesamtzusammenhang aller weiteren Planungsergebnisse durchgeführt. Die Auswirkungen der konkreten Ausprägungen der Fertigungsstrukturen können somit nicht mehr quantifiziert werden [SCHULZE et al. 2011, S. 117; SCHULZE et al. 2012, S. 212]. Im Planungsfall der Anpassungsplanung, also der Umplanung von bestehenden Produktionssystemen, hat die Fertigungsstruktur eine besondere Bedeutung, da Veränderungen (Fertigungsstrukturwandel genannt) keine größeren Investitionen in Anlagen erfordern und gleichzeitig die Leistung der vorhandenen Ressourcen bestimmen [REUTER et al. 2016b, S. 42]. Weiterhin werden dadurch die Analyse und die Berücksichtigung des Ist-Zustands zu einem relevanten Planungsschritt [KOHLER 2007, S. 19; KETTNER et al. 1984, S. 17].

Die Problemstellung lässt sich damit auf den Fertigungsstrukturwandel bestehender Produktionssysteme einschränken. Die Fragestellung, die damit in diesem Kontext beantwortet werden muss, ist:

Wie können alternative und multiple Fertigungsstrukturen in ihrem Einfluss auf die logistische Leistung für ein bestehendes Produktionssystem bewertet werden? (forschungsleitende Frage)

Aus dem modellbasierten Bewertungsansatz und der Anwendung auf bestehende Produktionssysteme ergeben sich die untergeordneten Forschungsfragen:

- Welche Gestaltungsfelder der Produktionslogistik sind durch die Organisation direkt beeinflussbar, determinieren die logistische Leistung und lassen sich als Fertigungsstruktur definieren? (Forschungsfrage 1 – FF1)

- Wie können multiple Fertigungsstrukturen auf ein bestehendes Produktionssystem projiziert werden? (Forschungsfrage 2 – FF2)
- Wie lassen sich die Ausprägungen von multiplen Fertigungsstrukturen vollständig modellieren? (Forschungsfrage 3 – FF3)
- Wie können multiple Fertigungsstrukturen quantitativ in ihrer logistischen Leistung bewertet werden? (Forschungsfrage 4 – FF4)

Die Herausforderung in der Beantwortung dieser Fragen liegt in der Positionierung zwischen der Gestaltung von Produktionssystemen bzw. der Fabrikplanung und dem Betrieb von Produktionssystemen. Die Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung der Fertigungsstruktur und dem resultierenden Verhalten des Produktionssystems im Betrieb müssen betrachtet und auf die Veränderungen der logistischen Leistung bezogen werden [REUTER et al. 2016a, S. 2072]. Es existiert bislang keine Vorgehensweise, diese Fragestellungen in der Anpassungsplanung eines Produktionssystems, also vor der Realisierung der Veränderungen, zu beantworten. Dabei stellt die Entwicklung von Modellen und Vorgehensweisen ein Kernthema der Fabrikplanungsforschung dar [ACKERMANN u. BÖRNER 2017, S. 225; ACKERMANN 2007, S. 53]. Diese Lücke soll durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden.

Die Zielsetzung ist daher, ein Vorgehen zur quantitativen Bewertung des Fertigungsstrukturwandels von Produktionssystemen zu definieren. Es muss vollständige Ausprägungen von multiplen Fertigungsstrukturen, nicht nur einzelne Elemente, einbeziehen. Die Veränderung der Fertigungsstruktur wandelt sich immer mehr von dem heute einmaligen Anpassungsprojekt zu einem permanent ausführbaren und bewertbaren operativen Prozess. Um eine Anwendbarkeit des Vorgehens in der Praxis zu gewährleisten, darf der Aufwand der Anwendung nicht zu hoch sein. Das Vorgehen muss sich auf Daten beschränken, die in üblichen betrieblichen Informationssystemen vorhanden und verfügbar sind, um den notwendigen Aufwand der Datenerfassung zu begrenzen [NYHUIS et al. 2015, S. 178]. Es müssen ein abgegrenztes Produktionssystem mit seinem gesamten Produktspektrum untersucht werden können und gleichzeitig sinnvolle Segmentierungen und Gruppenbildungen ermöglicht werden, um verschiedene Fertigungsstrukturen innerhalb des Systems zu berücksichtigen. Eine rein qualitative Analyse der fabrikplanerischen und logistischen Eignung von Fertigungsstrukturen ist nicht ausreichend. Eine quantitative Analyse des Fertigungsstrukturwandels bezogen auf die logistische Leistung ist notwendig, um wirtschaftlich relevante Potenziale für Veränderungsperspektiven aufzuzeigen.

Der Bereich der Leistungsbewertung von zukünftigen produktionslogistischen Systemen stellt damit das wissenschaftliche Themenfeld der Arbeit dar. Ein besonderer Fokus liegt auf der produktionslogistischen Organisation.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Zielstellung erfordert ein strukturiertes Vorgehen, das sich im Aufbau der Arbeit widerspiegelt (Abbildung 1). Aufgrund der praxisinduzierten Problemstellung lehnt sich das Vorgehen an den Forschungsprozess für angewandte Forschung an [ULRICH 1984, S. 193].

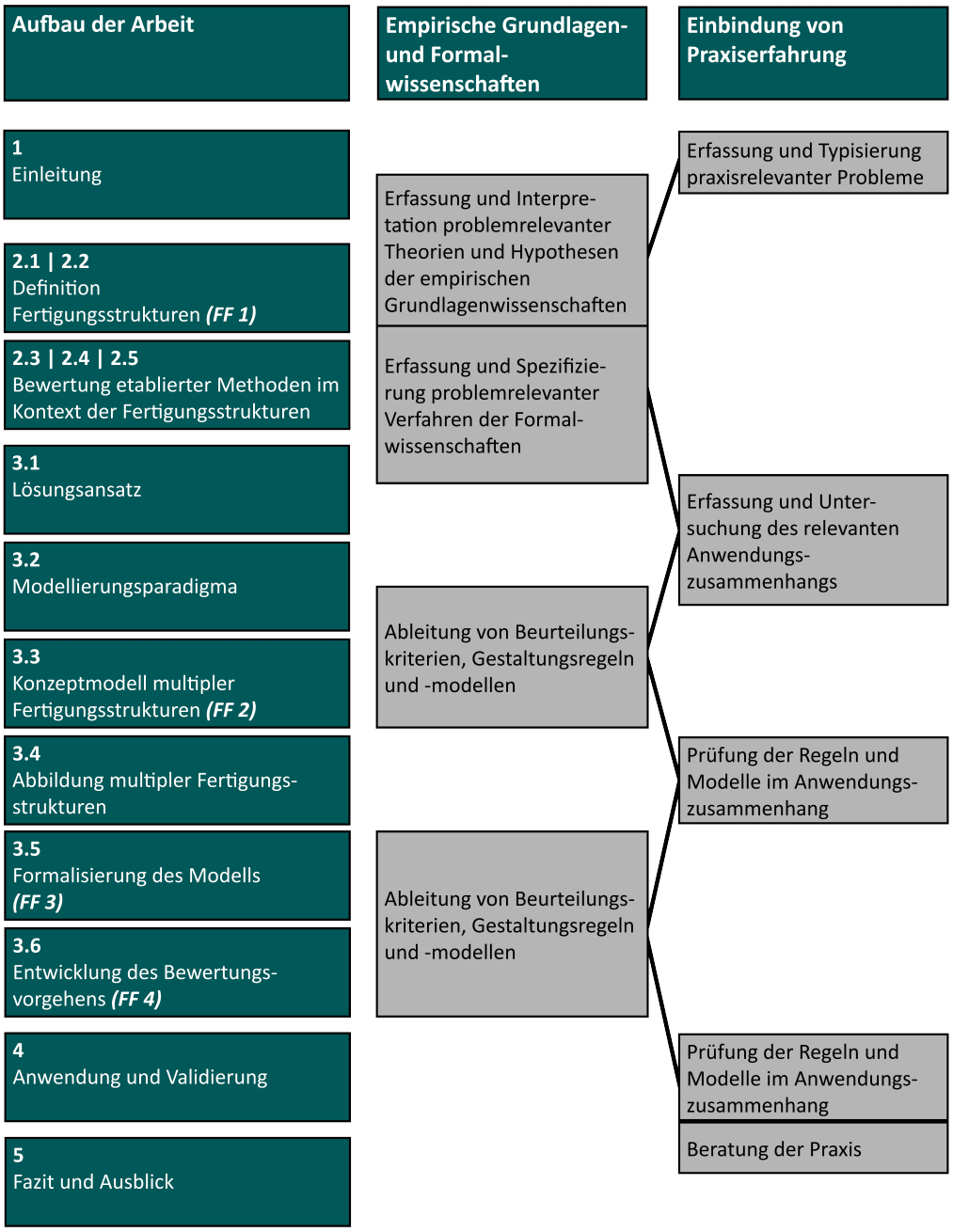

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit und Forschungsprozess nach *Ulrich* [ULRICH 1984, S. 193]

Im ersten Kapitel werden die praxisrelevante Problemstellung und die Zielsetzung der Arbeit dargestellt. Das zweite Kapitel beschreibt und analysiert den Stand der Technik auf dem Gebiet der Fertigungsstrukturen und der relevanten Fachgebiete. Zuerst wird eine systemtheoretische Definition von Produktionssystemen und ihren Elementen gegeben und der Gestaltungsraum der produktionslogistischen Organisation, die Fertigungsstruktur, vorgestellt. Damit wird der Betrachtungsraum definiert und die erste Forschungsfrage beantwortet. Es folgt eine Beschreibung der einzelnen Elemente und Merkmale der Fertigungsstruktur und der existierenden Methoden und Vorgehen zur zielgerichteten Ausprägung dieser Merkmale, die mit einer zusammenfassenden kritischen Würdigung abschließt. Die Einbindung der Fertigungsstruktur als Gestaltung der Struktur von Produktionssystemen in die Vorgehensweisen der Fabrikplanung und Planung von Produktionssystemen wird nachfolgend beschrieben, und die dazu verwendeten Methoden werden vorgestellt und bewertet. Als letztes Themenfeld im zweiten Kapitel wird die Modellierung und Bewertung von Produktionssystemen dargelegt und die Bewertung von Produktionssystemen mithilfe von Simulation, insbesondere der automatischen Simulationsmodellerzeugung, erläutert und diskutiert. Im zweiten Kapitel werden damit die problemrelevanten Theorien und Verfahren dargestellt, deren Beitrag zur Zielsetzung der Arbeit analysiert, der verbleibende Handlungsbedarf aufgezeigt und durch Anforderungen spezifiziert.

Im dritten Kapitel wird unter Berücksichtigung der Anforderungen ein Modell zur quantifizierten Bewertung multipler Fertigungsstrukturen in einem Produktionssystem aufgestellt. Der Abschnitt 3.1 beschreibt zusammenfassend, wie dem aufgezeigten Handlungsbedarf durch den entwickelten Lösungsansatz begegnet werden soll, und stellt die Vorgehensweise der anschließenden Lösungsentwicklung dar. Abschnitt 3.2 stellt das grundlegende Paradigma der Modellierung vor, mit dem eine anforderungsgerechte Abbildung von multiplen Fertigungsstrukturen durch die Trennung von Steuerungslogik und Steuerungsobjekten ermöglicht wird. Anschließend wird in Abschnitt 3.3 ein Konzeptmodell eines Produktionssystems mit multiplen Fertigungsstrukturen mit vier Teilmodellen entworfen, das die datengetriebene Modellgenerierung aus vorhandenen Datenquellen berücksichtigt. Abschnitt 3.4 zeigt, dass alle Elemente der Fertigungsstruktur in ihren möglichen Ausprägungen mit dem aufgestellten Modell abbildbar sind. Damit wird der Anwendungszusammenhang bestätigt und die zweite Forschungsfrage beantwortet. In Abschnitt 3.5 wird das Konzeptmodell formalisiert und in einem Simulationsmodell implementiert. Es wird ein experimentierbares Modell dargestellt, das mit Daten aus betrieblichen Informationssystemen für ein bestehendes Produktionssystem konfiguriert werden kann und die Messung der logistischen Leistungsgrößen integriert. Das formale Modell

beantwortet die dritte Forschungsfrage. Abschließend wird in Abschnitt 3.6 das Modell in ein vierstufiges Bewertungsvorgehen eingeordnet, das die quantitative Bewertung des Fertigungsstrukturwandels ermöglicht und damit die vierte Forschungsfrage beantwortet.

Im vierten Kapitel wird das Bewertungsvorgehen in einem praktischen Anwendungsfall eingesetzt und damit im Anwendungszusammenhang validiert und kritisch reflektiert.

Das fünfte Kapitel fasst die Vorgehensweise der gesamten Arbeit und die Ergebnisse zusammen und bietet einen Ausblick auf weitere und angrenzende Forschungsfelder.