

# 1 Einleitung

Aufgrund der an den Märkten bestehenden Dynamiken und einer steigenden Komplexität müssen produzierende Unternehmen eine zunehmende Anzahl technischer Anpassungen berücksichtigen [SIPP23]. Dies führt dazu, dass sich die Anforderungen an Produkte und Bauteile häufig ändern und bestehende Bauteile anzupassen sind [HERM22]. Somit stehen Unternehmen in der Serienfertigung vor der Herausforderung, dass sich die Stückzahl gleichartiger Bauteile reduziert und zunehmend verschiedene Bauteilvarianten zu fertigen sind. Da die Installation von Fertigungsprozessfolgen mit hohen Investitionen verbunden ist, wird nicht für jede Bauteilvariante eine separate Fertigungsprozessfolge betrachtet [HERM19]. Hieraus ergibt sich, dass die Investitionsentscheidung bzgl. neuer Fertigungsmittel nicht nur unter Betrachtung aktueller Bauteilanforderungen zu treffen ist. Vielmehr sind Anforderungen zukünftiger Bauteilvarianten zu berücksichtigen, um auch zukünftige Anforderungen wirtschaftlich zu erfüllen und die Wettbewerbsfähigkeit zu garantieren. Um wirtschaftlich auf veränderte Bauteilanforderungen reagieren zu können, ist die Flexibilität der Fertigung bzgl. neuer Bauteilvarianten ein Erfolgsfaktor [VDI17], [DENK19], [PRAS19], [HAGH21]. Daraus resultiert die Forderung nach flexiblen Fertigungsprozessfolgen, die kurzfristig ohne umfangreiche Anpassungen auf geänderte Anforderungen reagieren können, um auch zukünftige Bauteilvarianten wirtschaftlich zu fertigen. Jedoch ist eine Maximierung der Flexibilität nicht automatisch wirtschaftlich, da eine höhere Flexibilität der Fertigungsmittel, bedingt durch eine höhere Leistungsfähigkeit und das Vorhalten von fixkostenintensiven Flexibilitätsspielräumen, mit höheren Investitionen und Betriebskosten verbunden ist [CLAU19, S. 89 f.] Somit stellt die Betrachtung der bedarfsorientierten Flexibilität von Fertigungsprozessfolgen, die durch potenzielle Bauteilvarianten definiert wird, und die Prognose der Wirtschaftlichkeit unter Einbeziehung potenzieller Bauteilvarianten eine Lösung dar, um eine anforderungsgerechte Nutzung der Fertigungsmittel und Sicherstellung des langfristigen Unternehmenserfolgs zu erreichen.

Zur Realisierung der genannten Potenziale ist die Modellierung potenzieller, unsicherheitsbehafteter Bauteilvarianten, die die zukünftigen Anforderungen an die Fertigung definieren, erforderlich, um diese in die Planung von Fertigungsprozessfolgen zu integrieren. Es ist zu beachten, dass die zukünftigen Anforderungen an die Bauteilvarianten zum Planungszeitpunkt nicht eindeutig bekannt sind und Unkenntnis z. B. bzgl. Eintrittszeitpunkt und Nachfragemengen bestehen. Um dies zu berücksichtigen, sind vorliegende Unsicherheiten in die Planung zu integrieren. Des Weiteren ist unter Einbezug unsicherheitsbehafteter Bauteilvarianten eine Bewertung der bedarfsorientierten Flexibilität und eine Prognose der Wirtschaftlichkeit von Fertigungsprozessfolgen umzusetzen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Fertigungsprozessfolge nicht nur für aktuell zu fertigende Bauteilvarianten eine kostengünstige Fertigung ermöglicht, sondern eine ganzheitliche wirtschaftliche Optimierung der Fertigung über die Nutzungsdauer erreicht wird. Zur Erreichung dieser Zielstellung wird in dieser Arbeit eine Methodik vorgestellt, welche Anwendenden die Planung flexibler und wirtschaftlicher Fertigungsprozessfolgen in der variantenreichen Serienfertigung ermöglicht.

## Introduction

The existing market dynamics and increasing complexity result in manufacturing companies having to take into account an increasing number of technical adaptations [SIPP23]. As a consequence, the requirements for products and components change frequently and existing components have to be adapted [HERM22]. Thus, companies in series production are faced with the challenge of reducing the number of similar components and increasingly having to produce different component variants. As the installation of manufacturing process sequences is associated with high investments, a separate manufacturing process sequence is generally not considered for each component variant [HERM19]. This means that the investment decision regarding new production equipment should not be made solely based on current component requirements. Rather, the requirements of future component variants must be taken into account in order to fulfill future requirements economically and guarantee competitiveness. In order to be able to react economically to changing component requirements, the flexibility of production with regard to new component variants is a success factor [VDI17], [DENK19], [PRAS19], [HAGH21]. This results in the demand for flexible manufacturing process sequences that can react quickly to changing requirements without extensive adjustments in order to be able to produce future component variants economically. However, maximizing flexibility is not automatically economical, as a higher flexibility of the production equipment, due to a higher performance capability and the provision of fixed-cost-intensive flexibility margins, is associated with higher investments [CLAU19, S. 89 f.] Thus, the consideration of the demand-oriented flexibility of manufacturing process sequences, which is defined by potential component variants, and an evaluation of the economic efficiency including potential component variants represents a solution to achieve a demand-oriented use of the production equipment and to ensure the long-term success of the company.

To realize the aforementioned potentials, it is necessary to model potential, uncertain component variants that define future manufacturing requirements in order to integrate them into the planning of manufacturing process sequences. It should be noted that the future requirements of the component variants are not clearly known at the time of planning and that there is a lack of certainty, e.g. with regard to the time of occurrence and demand quantities. In order to take this into account, existing uncertainties must be integrated into the planning. Furthermore, an evaluation of demand-oriented flexibility and a prognosis of the economic efficiency of manufacturing process sequences must be implemented, considering component variants subject to uncertainty, in order to ensure that the manufacturing process sequence not only enables cost-effective production for component variants currently to be produced, but also achieves a holistic economic optimization of production over the useful life. To achieve this objective, this thesis presents a methodology that enables users to evaluate demand-oriented, flexible and economical manufacturing process sequences in variant-rich series production.

## 2 Wissenschaftliche Vorgehensweise und Aufbau

### Scientific Procedure and Structure

Die dieser Arbeit zugrundeliegende wissenschaftliche Vorgehensweise folgt dem Forschungsprozess nach ULRICH [ULRI76]. Für die Ausführung der Vorgehensweise dieser Arbeit erfolgt in Abschnitt 2.1 die Erläuterung des wissenschaftstheoretischen Bezugsrahmens. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 unter Berücksichtigung des wissenschaftstheoretischen Bezugsrahmens der formale und inhaltliche Aufbau der Arbeit beschrieben.

### 2.1 Wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen

#### Scientific Reference Framework

Folgend dem Verständnis der Wissenschaftssystematik nach ULRICH wird innerhalb der Wissenschaftssystematik die Wissenschaft anhand verschiedener Kategorien untergliedert. Hierbei wird in einer ersten Gliederung die Wissenschaft in Formalwissenschaften und Realwissenschaften gegliedert. (vgl. Abbildung 2-1). [ULRI76, S. 305]

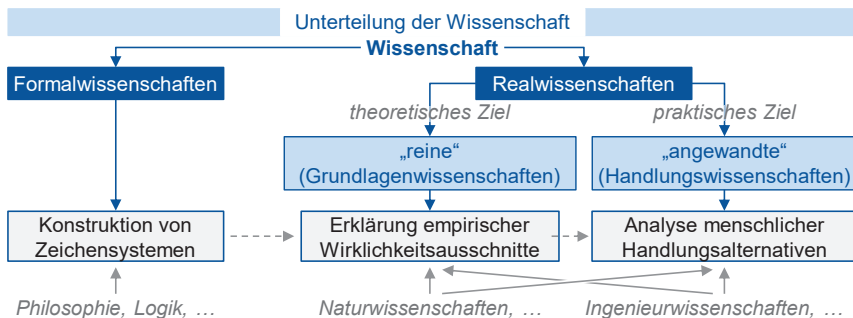


Abbildung 2-1: Wissenschaftssystematik i. A. a. Ulrich [ULRI76, S. 305]

Science systematics referring to ULRICH [ULRI76, p. 305]

Hierbei umfassen die *Formalwissenschaften* die Bildung von Sprachen, d. h. die Kombination von Zeichensystemen mit Regeln zur Nutzung dieser Zeichen. Teil der Formalwissenschaften sind bspw. die Philosophie, Logik oder Mathematik. Demgegenüber befassen sich die *Realwissenschaften* mit der Beschreibung, Gestaltung sowie Erklärung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte. Darauf aufbauend können in den Realwissenschaften Grundlagen- (nach ULRICH „reine Wissenschaften“) und Handlungswissenschaften (nach ULRICH „angewandte Wissenschaften“) unterschieden werden. Fokus der *Grundlagenwissenschaften* ist die Erklärung von wahrnehmbaren und empirischen Wirklichkeitsausschnitten sowie darauf aufbauend die Ableitung und Bildung von Erklärungsmodellen. Die *Handlungswissenschaften* befassen sich mit der Analyse (menschlicher) Handlungsoptionen zur Gestaltung sozialer und technischer Systeme. Basierend auf dieser Analyse ist es das Ziel,

Entscheidungsmodelle oder Entscheidungsprozesse zu entwickeln. Teil der Handlungswissenschaften sind die Ingenieurwissenschaften. **Die vorliegende Arbeit ist den Handlungswissenschaften zuzuordnen**, da sie Fragestellungen aus den Ingenieurwissenschaften und die methodische Unterstützung bei der Auswahl von Fertigungsprozessfolgen bei unsicherheitsbehafteten Bauteilvarianten adressiert. [ULRI76, S. 305]

## 2.2 Formaler und inhaltlicher Aufbau der Arbeit

### *Formal and Content Structure of the Thesis*

Der formale und inhaltliche Aufbau der Arbeit folgt dem Forschungsprozess nach ULRICH [ULRI76]. Grundlage des Forschungsprozesses nach ULRICH ist der Kritische Rationalismus nach POPPER [POPP45]. Fokus des Kritischen Rationalismus ist die Überprüfung von Modellen und Hypothesen auf ihre Korrektheit und Wahrheit. Dies bezieht sich einerseits auf die logische Wahrheit einer Aussage (Widerspruchslosigkeit) und andererseits auf die „faktische Wahrheit“ (empirische Gestalt). Im Allgemeinen werden verschiedene Forschungsansätze unterschieden. Beim induktiven Forschungsansatz bzw. der vollständigen Induktion erfolgt die Verifikation allgemeingültiger Aussagen über eine wiederholte Bestätigung, es wird vom Einzelfall auf das generell Gültige geschlossen. Dieser Forschungsansatz ist im Kritischen Rationalismus nicht möglich, da das n-fache Eintreffen eines Zustands oder einer Behauptung nicht die Schlussfolgerung zulässt, dass auch bei der n+1-ten Beobachtung der Zustand bzw. die Behauptung wieder eintritt. Somit können Hypothesen nie als endgültig wahr bezeichnet werden. Vielmehr gilt eine Hypothese so lange (vorläufig) als wahr, bis sie durch eine Falsifikation widerlegt wurde. [ULRI76, S. 345 f.]

Beim deduktiven Forschungsansatz wird von allgemeinen Aussagen auf Einzelfälle geschlossen („Top-Down Ansatz“). Innerhalb des deduktiven Ansatzes sollten nur Theorien oder Modelle verknüpft werden, die bislang noch nicht falsifiziert wurden oder bei denen keine Falsifikation zu erwarten ist. Innerhalb des deduktiven Forschungsprozesses ist eine empirische Überprüfung möglich, um damit mögliche Falsifikationen zu identifizieren. Bei einer Falsifikation ist zu untersuchen, ob eine Konkretisierung der Forschungshypothese möglich und sinnvoll ist. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch die Konkretisierung einer Hypothese die Allgemeingültigkeit, Aussagekraft und Informationsgehalt reduziert werden. [ULRI76, S. 346] Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Annahmen und Eingrenzungen (Konkretisierung) werden in Abschnitt 5.3 erläutert.

Dem wissenschaftlichen Vorgehen dieser Arbeit liegt der Forschungsprozess nach ULRICH zugrunde. Hierbei umfasst der Forschungsprozess die Entwicklungen, empirischen Überprüfungen und Erweiterungen sowie die verschiedenen Forschungsaktivitäten. Die spezifischen Forschungstätigkeiten sind als terminologisch-deskriptiv, empirisch-induktiv oder analytisch-deduktiv kategorisiert. Das wissenschaftliche Vorgehen und somit der Aufbau dieser Arbeit ist in Abbildung 2-2 dargestellt und basiert auf

der Abfolge der Forschungsaktivitäten entsprechend dem Forschungsprozess nach ULRICH [ULRI76, S. 347 f.]. Im Anschluss an die Einleitung wird in Kapitel 2 die wissenschaftliche Vorgehensweise erläutert. In Kapitel 3 und 4 sowie in Teilen des Kapitels 2 erfolgt eine einheitliche Definition relevanter Begrifflichkeiten sowie die Eingrenzung und Definition des Forschungsobjekts. Diese Schritte sind den *terminologischen-deskriptiven* Forschungsaktivitäten zu zuordnen. Im Weiteren folgen *empirisch-induktive* Forschungsaktivitäten in den Kapiteln 4 und 5. Dies umfasst die Analyse von beobachtbaren Zusammenhängen und Abhängigkeiten in bestehenden Forschungsarbeiten, die Identifikation von Forschungsdefiziten und basierend darauf die Ableitung der dieser Arbeit zugrundeliegenden Forschungshypothese. Zur Lösung der identifizierten Forschungsdefizite folgen in den Kapiteln 5 und 6 *analytisch-deduktive* Forschungsaktivitäten, wie die deduktive Gestaltung und Konstruktion von Modellen, ihre analytische Auswertung und schlussendlich die Überführung in situationsspezifische Handlungsempfehlungen und -anweisungen.

Wissenschaftliches Vorgehen der Arbeit	
Kapitel 1: Einleitung	Art der Forschung
Kapitel 2: Wissenschaftliche Vorgehensweise und Aufbau	<i>Terminologisch-deskriptiv</i>
Kapitel 3: Abgrenzung des Untersuchungsbereichs	
Kapitel 4: Stand der Forschung	<i>Empirisch-induktiv</i>
Kapitel 5: Zielstellung und Konzeption der Methodik	<i>Analytisch-deduktiv</i>
Kapitel 6: Detaillierung der Methodik	
Kapitel 7: Kritische Diskussion und Verwertung	<i>Empirisch-deduktiv</i>
Kapitel 8: Zusammenfassung	

**Abbildung 2-2: Wissenschaftliches Vorgehen der Arbeit i. A. a. Forschungsprozess nach ULRICH [ULRI76, S. 347 f.]**

*Scientific procedure of the work based on research process by ULRICH [ULRI76, p. 347 f.]*

Ebenso erfolgen in Kapitel 6 im Anschluss an die Entwicklung der erforderlichen Modelle, Methoden und Teilmethodiken *empirisch-induktive* Forschungsaktivitäten, um zu bewerten und zu überprüfen, ob die entwickelten Lösungen (vorläufig) als korrekt angenommen werden können. Um dies zu ermöglichen, werden Realisierungsuntersuchungen mit den entwickelten Modellen, Methoden und Teilmethodiken durchgeführt. In Kapitel 7 erfolgt eine kritische Diskussion der erzielten Ergebnisse und mögliche Verwertungen werden diskutiert. Dies ist auch den *empirisch-induktiven* Forschungsaktivitäten zuzuordnen. Den Abschluss der Arbeit bildet die Zusammenfassung in Kapitel 8. Es ist zu beachten, dass die Forschungsaktivitäten der verschiedenen Kapitel nicht stets eindeutig einzelnen Aufgaben zugeordnet werden können, was dazu führt, dass die Übergänge zwischen den Forschungsaktivitäten teilweise fließend sind.