

# Innovations in Manufacturing Technology

Die Einführung neuer Produkte in die Fertigung ist eine kritische Phase im Produktentwicklungsprozess produzierender Unternehmen, die maßgeblich über den wirtschaftlichen Erfolg eines Produkts und somit eines Unternehmens entscheidet. Trotz intensiver Forschung bleibt die Erreichung der Zeit-, Kosten- und Qualitätsziele im Serienanlauf eine weit verbreitete Herausforderung, was zu finanziellen Verlusten und Imageproblemen der Unternehmen führt. Ursachen liegen unter anderem in der Instabilität der Fertigungsfolge zu Beginn des Serienanlaufs sowie instabilen Qualitätsfähigkeiten und Verfügbarkeitsverlusten. Darüber hinaus führen häufige zeit- und kostenintensive Änderungen durch Restentwicklungsumfänge sowohl am Produkt als auch in der Fertigung während des Serienanlaufs zu einer Verfehlung der Anlaufziele. Zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit auf Änderungen in der Produktentwicklung etablieren sich agile Methoden aus der Softwareentwicklung im Entwicklungsprozess physischer Produkte. Um das Potenzial agiler Konzepte auch im Serienanlauf zu nutzen, gilt es, die agile Produktentwicklung und den Serienanlauf methodisch enger zu vernetzen und die Agilität von Serienanläufen zu steigern. Ziel der Forschungsarbeit war die Entwicklung einer Methodik zur Gestaltung agiler Serienanläufe. Die Methodik folgt dem Regelkreisgedanken und besteht aus drei Modulen, welche iterativ sprintweise durchlaufen werden. In Modul 1 erfolgt die Modellierung der Informationsgrundlage und der Anlaufperformance von Fertigungsfolgen, um bestehende Defizite zu identifizieren. Hierzu wurde ein evidenzbasiertes Modell entwickelt, das erstmals eine integrative Betrachtung von Produkt- und Technologieunsicherheiten sowie der Anlaufperformance ermöglicht. Ergänzend wurden Methoden zur Identifikation und Priorisierung von Restentwicklungsumfängen sowie zur Bewertung des Entwicklungsfortschritts auf Basis der Produkt- und Fertigungsreife konzipiert. Aufbauend auf Modul 1 dient Modul 2 der systematischen Priorisierung und Reduktion der ermittelten Defizite sowie der Prognose von agilen Anlaufkurven und -kosten unter Berücksichtigung bestehender Unsicherheiten. Modul 3 ermöglicht die Integration realer Daten aus agilen Serienanläufen. Hierzu wurde eine Methode zur Bewertung der Evidenz von Prototypen- und Validierungsversuchen entwickelt, die eine Transformation dieser Daten in verarbeitbare Informationen auf Basis der Evidenztheorie ermöglicht.



Sebastian Apelt

Methodik zur Gestaltung agiler Serienanläufe

# Innovations in Manufacturing Technology



## Methodik zur Gestaltung agiler Serienanläufe

Sebastian Apelt  
05/2025



# Methodik zur Gestaltung agiler Serienanläufe

## Methodology for the Design of Agile Ramp-Up Productions

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Sebastian Apelt

### **Berichter/in:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.



# INNOVATIONS IN MANUFACTURING TECHNOLOGY

**Sebastian Apelt**

Methodik zur Gestaltung agiler Serienanläufe

**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs

Band 5/2025



**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Sebastian Apelt:

Methodik zur Gestaltung agiler Serienanläufe

1. Auflage, 2025

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Copyright Apprimus Verlag, Aachen, 2025

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien  
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen, Deutschland

Internet: [www.apprimus-verlag.de](http://www.apprimus-verlag.de), E-Mail: [info@apprimus-verlag.de](mailto:info@apprimus-verlag.de)

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-98555-270-2

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2024)

# Vorwort und Danksagung

## *Preamble and Acknowledgement*

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren des Werkzeugmaschinenlabors WZL (heute Manufacturing Technology Institute MTI) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Ich bedanke mich herzlichst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs, Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren (heute Manufacturing Technology Institute MTI), für die stetige Unterstützung meiner Tätigkeiten, für das mir entgegengebrachten Vertrauen sowie seine motivierende und wohlwollende Führung.

Darüber hinaus bedanke ich mich herzlichst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke, ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, für die persönliche und fachliche Führung während meines ersten Jahres als wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie für die wissenschaftliche Förderung meiner Person. Ich danke ihm ebenfalls für die Übernahme des Koreferats meiner Dissertation sowie für die ausgiebige und bereichernde Diskussion der Dissertationinhalte.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Johannes Henrich Schleifenbaum für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann für seinen Beisitz in der Prüfungskommission.

Ich bedanke mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Exzellenzclusters „Internet of Production“ (Projektnummer 390621612), durch welches die der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Forschungsaktivitäten unterstützt wurden. Vielen Dank auch an das Team im Workstream CRD-C.I für die zahlreichen und inspirierenden Diskussionen meiner Dissertationinhalte. Insbesondere gilt mein Dank Nico Jansen für die Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Entwicklung des Softwareprototyps zur Validierung der Dissertationinhalte.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am WZL und MTI für eine unvergessliche Zeit, die stetige Unterstützung und Motivation sowie die großartige Arbeitsatmosphäre und Zusammenarbeit. Insbesondere bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Alexander Beckers, Lars Stauder, Dr.-Ing. Jan Rey, Gonsalves Grünert, Anna Koch, Fan Yang, Hakim El Kadaoui, Tammo Dannen, Christian Lürken, Sebastian Weber, Maximilian Gay, Jannis Menke, Dr. rer. nat. Mia Kornely, Dr.-Ing. Timm Grünebaum, Dr.-Ing. Johannes Müller, Dr.-Ing. Jens Stauder, Dr.-Ing. Lennard Hermann, Peter Breuer, Alexander Dehmer, Eike Reuter, Sebastian Prinz, Daniel Müller, Tanja Tebeck, Guido Koch-Theisen, Marc Bredthauer, Jannik Röttger, Dr.-Ing. Marius Ohlert, Dr.-Ing. Ulrich Müller, Dr.-Ing. Christian Wirtz, Dr.-Ing. Sebastian Barth, Dr.-Ing. Daniel Trauth, Tim Hommen, Nadja Poniatowski, Nina Hilgers und Laura Gehlen.

Ich danke Hakim El Kadaoui, Lars Stauder, Dr.-Ing. Alexander Beckers und Philipp Niemietz für die Durchsicht des Manuskripts und für die zahlreichen Diskussionen, Hinweise und Anregungen.

Ein großer Dank gilt meinen langjährigen und treuen studentischen Hilfskräften sowie meinen Abschlussarbeiterinnen und Abschlussarbeitern für die Unterstützung in Projekten, der Lehre und meinen Forschungsaktivitäten. Ihr habt mir immer den Rücken freigehalten und ich danke euch für eure Leistungsbereitschaft, euer Engagement und die großartige Zusammenarbeit. Vielen Dank Hakim El Kadaoui, Joseph Mlody, Bahar Kara, Marie Hamelmann, Malte Becker und Florian Spieth. Ich wünsche euch viel Erfolg auf eurem weiteren Weg.

Besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Alexander Beckers. Du hast mich nicht nur im Studium zu Höchstform motiviert, sondern auch darüber hinaus bis zur Promotion gebracht. Ich danke dir für all deine Unterstützung, deine wertvollen Ratschläge, die zahlreichen und kostbaren Diskussionen, insbesondere aber für die überragende Zusammenarbeit und die vielen heiteren Stunden im Büro und außerhalb des Arbeitsumfeldes während unserer gemeinsamen Zeit in Aachen und darüber hinaus.

Ebenso bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Jan Rey für die großartige Zusammenarbeit, die Unterstützung, vor allem aber für die Motivation, stets einen Schritt weiterzugehen.

Großer Dank gilt meinen engsten und ältesten Freunden aus der Heimat Kathrin, Jan, Sonja und Tobias, die mir immer eine große Stütze waren und für den notwendigen Ausgleich gesorgt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Insbesondere bedanke ich mich bei meinen Eltern Gabriele und Thomas für die bedingungslose Unterstützung, den fortwährenden Zuspruch und euren Glauben an mich auf meinem Lebensweg. Ohne euch wäre meine Promotion nicht möglich gewesen. Ebenso danke ich meinen Geschwistern Katharina und Steffen dafür, dass ihr stets hinter mir steht und ich in jeder Lebenssituation immer auf euch und eure Unterstützung bauen kann.

Von ganzem Herzen danke ich dir Vera. Ich weiß, wie viel die letzten Jahre auch dir abverlangt haben, insbesondere die zahlreichen langen Arbeitstage und kurzen Wochenenden. Ich bin dankbar, dass du diesen Weg mit mir gegangen bist, für deine liebevolle Unterstützung, deine unbegrenzte Geduld und deinen Glauben an mich. Ich bin froh, dich an meiner Seite zu haben und freue mich auf unsere gemeinsame Zukunft.

## Kurzzusammenfassung

Der Serienanlauf ist in der produzierenden Industrie eine kritische Phase im Produktentstehungsprozess, die maßgeblich über den wirtschaftlichen Erfolg eines Produkts entscheidet. Trotz umfangreicher Forschung auf diesem Gebiet bleibt die Erreichung von Zeit-, Kosten- und Qualitätszielen nach wie vor eine Herausforderung für Unternehmen. Ursachen hierfür liegen in unvorhergesehenen Qualitätsschwankungen, einer unzureichenden Prozessbeherrschung und Produktionsausfällen im Serienanlauf. Zudem stellen ungeplante Änderungsmaßnahmen am Produkt und in der Fertigungsplanung ein häufig auftretendes Problem dar. Diese Änderungsmaßnahmen sind auf nicht erkannte Probleme in den dem Serienanlauf vorgelagerten Phasen sowie eine unzureichende Produkt- und Prozessreife zum Start of Production zurückzuführen. Agile Konzepte, welche bereits in der Produktentwicklung erfolgreich eingesetzt werden, bieten das Potenzial, schnell auf Veränderungen im Prozess zu reagieren und so die Anlaufziele zu erreichen. Zur Integration agiler Methoden in den Serienanlauf gilt es, den bisher starren und plangetriebenen Prozess agiler zu gestalten. Aktuell ist nicht bekannt, wie ein agiler Serienanlauf zu realisieren ist und die gesteigerte Agilität im Serienanlauf dazu beiträgt, die Anlaufziele zu erreichen.

Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Problemstellung fokussiert die vorliegende Forschungsarbeit die Übertragung agiler Konzepte auf den Serienanlauf. Durch die enge Vernetzung der agilen Produktentwicklung mit dem Serienanlauf wird es Anwendenden ermöglicht, unvorhergesehenen Änderungen am Produkt und in der Fertigungsplanung, Qualitätsschwankungen und Produktionsausfällen frühzeitig zielgerichtet entgegenzuwirken. Hierzu wurde eine Simulationsmethodik entwickelt, welche dem iterativen Konzept aufeinanderfolgender, kurzzyklischer Entwicklungssprints der agilen Methoden folgt. Die Methodik besteht aus drei Modulen, welche in den Entwicklungssprints iterativ durchlaufen werden, bis eine ausreichende Produkt- und Prozessreife zum Start of Production vorliegt. Im ersten Modul erfolgt die Ableitung von Defiziten aus den vorliegenden Informationen zum Produkt und der Fertigung sowie aus der zum betrachteten Zeitpunkt vorherrschenden Leistungsfähigkeit der Fertigung. Basierend auf den Defiziten werden potenzielle Änderungsmaßnahmen identifiziert, hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Serienanlauf analysiert sowie die Produkt- und Prozessreife bewertet. Aufbauend auf den Ergebnissen erfolgt im zweiten Modul die systematische Auswahl der in einem Sprint zu adressierenden Defizite sowie die Simulation unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten. Im dritten Modul werden die generierten Daten aus den parallel zur Simulation laufenden realen Entwicklungssprints in die Simulationsmethodik integriert.



## Abstract

The ramp-up production in the manufacturing industry is a critical phase in the product development process that significantly determines the economic success of a product. Despite extensive research in this field, achieving time, cost, and quality targets remains a challenge for companies. The causes include unforeseen variations in quality, insufficient process control as well as production downtimes during the ramp-up production. Furthermore, unplanned changes to the product and manufacturing planning are common issues. These changes can be attributed to unrecognized problems in the preceding phases of ramp-up production and insufficient product and process maturity at the start of production. Agile concepts, which are already successfully used in product development, offer the potential to react quickly to changes in the process and therefore achieve the ramp-up targets. To integrate agile methods into the ramp-up production, the traditionally rigid and plan-driven process needs to be made more agile. Currently, it is unknown how to implement a more agile ramp-up production process and how increased agility in ramp-up production contributes to achieving ramp-up targets.

In consideration of the aforementioned problem, this thesis focuses on adaption of agile concepts to the ramp-up production. By closely linking agile product development with ramp-up production, users are able to proactively address unforeseen changes to the product and manufacturing planning, variations on quality and production downtimes. For this purpose, a simulation methodology was developed that follows the iterative concept of successive, short-cycle development sprints of agile methods. The methodology consists of three modules, which are iteratively repeated in the development sprints to achieve sufficient product and process maturity to the start of production. In the first module, the resulting deficits are derived from the available information on the product and manufacturing as well as from the prevailing manufacturing performance at the time under. Based on the deficits, potential change measures are identified, analyzed regarding their effects on the ramp-up production and the product and process maturity are evaluated. Building on the results of the first module, the second module involves the systematic selection of the deficits to be addressed in a sprint and the simulation of uncertain ramp-up curves and costs. In the third module, the data generated from the real development sprints accompanying the simulation are integrated into the simulation methodology.



# Inhaltsverzeichnis

*Content*

<b>Vorwort und Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzzusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Wissenschaftliche Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit</b> .....	<b>3</b>
2.1 Wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen .....	3
2.2 Formaler und inhaltlicher Aufbau der Forschungsarbeit .....	4
<b>3 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs</b> .....	<b>7</b>
3.1 Grundlagen und Begriffsabgrenzungen der Technologie- planung .....	7
3.2 Der Serienanlauf im Produktentstehungsprozess .....	10
3.2.1 Entwicklungsprozess .....	15
3.2.2 Serienanlauf .....	19
3.2.3 Serienfertigung .....	22
3.2.4 Unsicherheiten im Entwicklungsprozess .....	23
3.3 Modelltheoretische und methodische Grundlagen .....	24
3.4 Handlungsbedarf und wirtschaftliche Relevanz .....	25
<b>4 Stand der Forschung</b> .....	<b>29</b>
4.1 Ansätze zur Gestaltung von Fertigungsfolgen im Serienanlauf .....	29
4.2 Ansätze zu agilen Entwicklungsprozessen .....	41
4.3 Forschungsdefizite und wissenschaftliche Problemstellung .....	51
<b>5 Zielsetzung und Forschungshypothese</b> .....	<b>55</b>
5.1 Zielsetzung der Arbeit .....	55
5.2 Forschungshypothese und Forschungsfragen .....	56
<b>6 Konzeptionierung der Methodik</b> .....	<b>57</b>
6.1 Anforderungen an die Methodik .....	57
6.1.1 Formale Anforderungen .....	57
6.1.2 Inhaltliche Anforderungen .....	58
6.2 Annahmen und Eingrenzungen .....	60
6.3 Ableitung des Grobkonzepts .....	61
<b>7 Detaillierung der Methodik</b> .....	<b>65</b>

7.1	Modellierung der Simulationsgrundlage zur Bewertung des Entwicklungsfortschritts (Modul 1).....	65
7.1.1	Modellierung von Plandaten und der Anlaufperformance zur Ableitung von Informations- und Anlaufperformancedefizite .	67
7.1.2	Identifikation, Bewertung und Priorisierung von Restentwicklungsum-fängen .....	73
7.1.3	Bewertung des Entwicklungsfortschritts – Entscheidungsabhängiges Reifegradmodell .....	84
7.1.4	Validierung und Zwischenfazit.....	99
7.2	Stochastisches Prognosemodell zur Ermittlung unsicherheits- behafteter Anlaufkurven und -kosten (Modul 2) .....	104
7.2.1	Bedarfpriorisierung zur systematischen Reduktion von Defiziten .....	105
7.2.2	Theoretische Informations- & Anlaufperformancedefizit- reduktion .....	106
7.2.3	Prognose der theoretischen Informations- & Anlaufperformancedefizitentwicklung .....	112
7.2.4	Berechnung der Anlaufsprintkosten im agilen Serienanlauf	116
7.2.5	Prognose der Anlaufkurve und -kosten agiler Serienanläufe	121
7.2.6	Prognose der unsicherheitsbehafteten Anlaufkurve und -kosten .....	123
7.2.7	Validierung und Zwischenfazit.....	125
7.3	Iterative Realdatenintegration (Modul 3) .....	131
7.3.1	Bewertung der Evidenz von Prototypen- und Validierungsversuchsergebnissen.....	132
7.3.2	Iterative Realdatenintegration .....	140
7.3.3	Validierung und Zwischenfazit.....	141
<b>8</b>	<b>Kritische Diskussion und Verwertung .....</b>	<b>145</b>
8.1	Kritische Diskussion der entwickelten Methodik .....	145
8.2	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung .....	146
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>149</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>150</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>XXI</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>XXXIX</b>
A.1	Strukturmodell zur Identifikation von Restentwicklung- umfängen .....	XXXIX
A.2	Simulationsergebnisse .....	XL
A.3	Validierung anhand von Kapazitätsszenarien .....	XLIII
<b>B</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>XLV</b>

# Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

## Formula Symbols and Abbreviation

### Formelzeichen

$A_{pl}$	Auflösung des Plandatums $pl$
$A$	Einzelinformation
$\bar{A}$	Ablehnungsbereich (Prototypenevidenz)
$a_x^z$	Ausgangswert einer Entscheidung $x$ an Ausgang $z \in Z_x$
$ABER_{Di}$	Anzahl der von $D_i$ beeinflussten Restentwicklungsumfänge
$AK^r$	Auftretenskoeffizient von $REU^r$
$AP E_{pl}$	Anlaufperformance eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses bezogen auf ein Plandatum $pl$
$AWW_i^+$	Auswirkungswert Verbesserung von $D_i$
$AWW_i^-$	Auswirkungswert Verschlechterung von $D_i$
$AWW_i^+$	Auswirkungswert Verbesserung von $D_i$
$AW^r$	Auftretenswert eines Restentwicklungsumfangs $REU^r$
$AW_{min}$	Minimaler Auftretenswert eines Restentwicklungsumfangs $REU^r_{(UP)}$
$AW_{max}$	Maximaler Auftretenswert eines Restentwicklungsumfangs $REU^r_{(UP)}$
$b$	Bauteil
$BE_x$	Beeinflussungswert von Entscheidung $x$
$\overrightarrow{BE_x}$	Beeinflussungsvektor von Entscheidung $x$
$BE_x^{rel}$	Relative Beeinflussung von Entscheidung $x$
$BG$	Kenngröße Bauteilgeometrie der Validierungsdistanz
$bi$	Benötigte Information $bi \in BI$
$BI$	Menge aller benötigten Informationen
$BK^r$	Bedeutungskoeffizient von $REU^r$
$BVK_f$	Beschreibungsvollständigkeit eines Features $f$
$D_i$	Defizit $i \in I$
$D_{Di}^r$	Diskrepanzwert von $D_i$ von $REU^r$
$\overrightarrow{D^s}$	Defizitreduktionsvektor von Sprint $s \in S$

$dp$	Distanzparameter $dp \in \{Ma, G, Pro\}$
$DR^r$	Dringlichkeit von $REU^r$
$DS_{D_i}^r$	Distanzsumme von $D_i$ von $REU^r$
$e$	Ereigniscluster der empirischen Analyse
$E$	Menge der Ereigniscluster der empirischen Analyse
$E_i$	Menge der im Intervall enthaltenen Ereigniscluster der empirischen Analyse
$E_j^i$	Eignungswert von Quelle $Q_j$ für Defizit $D_i$
$E_k^s$	Erwartungswert eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{u S}\}$
$E_k^{\bar{s}}$	Erwartungswert der oberen Teilmenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{u S}\}$
$E_k^{\underline{s}}$	Erwartungswert der unteren Teilmenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{u S}\}$
$EW_{pl}^{ape}$	Erwartungswert eines Ausprägungs- oder Grenzwertintervalls eines Plandatums $pl$
$EW_{pl}^{oben}$	Oberer Erwartungswert eines Ausprägungs- oder Grenzwertintervalls eines Plandatums $pl$
$EW_{pl}^{unten}$	Unterer Erwartungswert eines Ausprägungs- oder Grenzwertintervalls eines Plandatums $pl$
$E_x$	Entscheidung $x \in X$
$e_x^y$	Eingangswert von Entscheidung $x$ an Eingang $y \in Y_x$
$EW_{pl}^{oben}$	Oberer Erwartungswert eines Ausprägungs- oder Grenzwertintervalls eines Plandatums $pl$
$f$	Feature $f \in F$
$F$	Menge aller Feature eines Bauteils $b$
$f_{(D_i)}^\alpha$	Allgemeine Formparameterfunktion der Betaverteilung von Formparameter $\alpha$
$f_{(D_i)}^\beta$	Allgemeine Formparameterfunktion der Betaverteilung von Formparameter $\beta$
$FERG_{sim}^s$	Fertigungsreifegrad (simuliert)
$FERG_{sim}^{s WDH}$	Fertigungsreifegrad (simuliert) einer Simulationswiederholung

$FERG_{real}^s$	Fertigungsreifegrad (real)
$FFK_p$	Fertigungsfähigkeit eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$FRG_f$	Featurereifegrad eines Features $f$
$fr$	Folgerestentwicklungsumfang $fr \in FR$
$FR$	Menge aller Folgerestentwicklungsumfänge
$G_{Di}$	Gewichtung der Defizite
$G$	Distanzparameter Geometrie
$G_x^{Di,r}$	Allgemeine Gewichtung der Distanz mit $x \in \{dp, bi\}$
$g_f^{FRG}$	Gewichtung der Relevanz zur Funktionserfüllung des Bauteils
$GIS_{pl}^p$	Gesamtinformationssicherheit eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$ bezogen auf ein Plandatum $pl$
$G_{max}$	Maximalwert der Gewichtung
$GTRRG_p$	Gutteilratenreifegrad eines Fertigungsprozesses $p$
$GW_x^{rel}$	Relativer Gewichtungswert einer Entscheidung $x$
$GW^{WR}$	Intervallgrenzwert der Wirkrichtung
$H_0$	Nullhypothese
$H_1$	Alternativhypothese
$I$	Menge der Defizite
$IBMA_p$	Initiale Befähigung der Mitarbeitenden eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$ID_i$	Informationsdefizit $i \in I$
$I_{Di}^{PT/o}$	Obere Intervallgrenzen eines Konfidenzintervalls der Versuchsauswertung (Prototypenevidenz)
$I_{Di}^{PT/u}$	Untere Intervallgrenzen eines Konfidenzintervalls der Versuchsauswertung (Prototypenevidenz)
$IPB_p$	Initiale Prozessbefähigung eines Fertigungsprozesses $p$
$IVG^+$	Intervallgrenze einer möglichen Verbesserung
$IVG^-$	Intervallgrenze einer möglichen Verschlechterung
$J$	Menge aller Quellen
$\tilde{k}$	Parameter der gesamten Ergebnismenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{u S}\}$

$\hat{k}$	Parameter der oberen Teilmenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{\mu S}\}$
$\check{k}$	Parameter der unteren Teilmenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{\mu S}\}$
$KAP_s^{max}$	h Maximale Sprintkapazität
$KAP_{j,s}^i$	h Kapazität der Quelle $Q_j$ für die Adressierung von Defizit $D_i$ in Sprint $s$
$K_{i,j,p,s}^{\mu A}$	€ Erwartete Ausschusskosten
$K_{i,j,p,s}^{\mu AF}$	€ Erwartete Kosten für Prozess-/Anlagenausfälle
$K_{i,j,p,s}^{\mu Au}$	€ Erwartete Kosten der Auswertung
$K_{i,j,s}^{\mu BD}$	€ Erwartete Beschaffungs- bzw. Durchführungskosten
$K_{i,j,s}^{\mu Dy^n}$	€ Erwartete dynamische Sprintkosten
$K^{\mu ENT}$	€ Erwartete Entsorgungskosten
$K_{i,j}^{\mu ER}$	€ Erwartete Kosten für die Erschließung einer (Informations-) Quelle
$K_{i,j,s}^{\mu F}$	€ Erwartete Fertigungskosten (der Prototypen/Validierungsversuche)
$K_{i,j,s}^{\mu FEK}$	€ Erwartete Fehlerkosten
$K_{p,s}^{\mu L_{ant}}$	€/h Erwartete anteilige Lohnkosten
$K_s^{\mu L}$	€/h Erwartete prozessunabhängige Lohnkosten
$K^{\mu LZ}$	€ Erwartete Lizenzkosten oder Kosten für den Erwerb von Literatur
$K_{i,j,s}^{\mu IP}$	€ Erwartete Informations-/Performancekosten
$K_s^{\mu MAT}$	€ Erwartete Materialkosten
$K_{p,s}^{\mu MH}$	€/h Erwartete Maschinenstundenkosten eines Prozesses
$K_{i,j,p,s}^{\mu N}$	€ Erwartete Nacharbeitungskosten
$K_{p,s}^{\mu NAB}$	€ Erwartete Kosten für die Nacharbeit
$K_s^{\mu S}$	€ Erwartete Anlaufsprinkosten
$K_{s,WDH}^{\mu S}$	€ Erwartete Anlaufsprinkosten einer Simulationswiederholung
$K_s^{\mu Sch}$	€ Erwartete Kosten einer Schulungsmaßnahme

$K_s^{\mu VBM}$	€	Erwartete Kosten einer Verbesserungsmaßnahme
$K_s^{\mu Q}$	€	Erwartete determinierte Qualifizierungskosten innerhalb eines Sprints
$K_p^{\mu WT}$	€	Erwartete Kosten für ein neues Werkzeug
$K_{p,s}^{\mu WKZ}$	€	Erwartete Werkzeugkosten
$LRG_p$		Leistungsreifegrad eines Fertigungsprozesses $p$
$LVK$		Leistungsvollständigkeit des Produkts
$m$		Merkmal $m \in M$
$M$		Menge der Merkmale eines Features
$m(A)$		Evidenz einer Einzelinformation $A$
$m_{pl}^{PT}$		Evidenz eines Prototypen-/Validierungsversuchs
$Ma$		Distanzparameter Material
$MAD_s^{\mu}$		Erwartete Anzahl der benötigten Mitarbeitenden
$MD_{Di}$		Mittlerer Diskrepanzwert
$mo_{pl}^{PT}$		Modalwert bezogen auf ein Plandatum $pl$
$m^{pl}(\Omega)$		Evidenz des Wahrnehmungsrahmens $\Omega$
$MARG_m^f$		Merkmalsreifegrad eines Features $f$ der relevanten Merkmale $m$
$NARRG_p$		Nacharbeitsratenreifegrad eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$n_{i,s}^{PT}$		Anzahl zu fertigender Prototypen für Defizit $D_i$ (Simulation)
$n_{i,s}^{PT}$		Korrigierte Anzahl zu fertigender Prototypen für Defizit $D_i$ (Simulation)
$n_{pl}^{PT}$		Anzahl zu fertigender Prototypen / Versuchsdurchführungen (Realdaten – Evidenzbewertung)
$n_{i,s}^{PT max}$		Maximale Anzahl zu fertigender Prototypen für die Sprintsimulation
$n_{e,pl}^{PT}$		Häufigkeit des Ereignisses (empirische Analyse)
$n_{p,s}^{\mu WT}$		Erwartete Standmenge eines Werkzeugs
$(n_{pl}^{PT})^+$		Erfolgreiche Versuchsdurchführungen
$NR_{p,s}$		Nacharbeitsrate
$p$		Fertigungs- oder Handhabungsprozess

$P$	Menge aller Fertigungs- und Handhabungsprozesse
$\vec{p}$	Prozessvektor
$PBZRG_p$	Planbelegungszeitreifegrad eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$PD_i$	Anlaufperformancedefizit $i \in I$
$PDRG_{sim}^S$	Produktreifegrad (Simulation)
$PDRG_{sim}^{S WDH}$	Produktreifegrad (Simulation) einer Simulationswiederholung
$PDRG_{real}^S$	Produktreifegrad (real)
$P_{fix}$	partielle Fixierung
$pl$	Plandatum $pl \in PL$
$PL$	Menge der Plandaten
$P_p$	Fertigungs- und Handhabungsprozesse
$Pro$	Distanzparameter Prozess
$Pr$	Kenngroße Prozess der Validierungsdistanz
$PS^p$	Planungssicherheit eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$PSA^r$	Potenziellen Schadenausmaßes von $REU^r$
$PSZZ$	Pseudozufallszahl
$PV_{pl}^{PT}$	Physische Vertrauenswürdigkeit des Versuchs bezogen auf ein Plandatum $pl$
$PZ1_{Di}$	Prioritätszahl 1 von Defizit $D_i$ (aus REU)
$PZ2_{Di}$	Prioritätszahl 2 von Defizit $D_i$ (aus Reifegraden)
$PZ3_{Di}$	Prioritätszahl 3 von Defizit $D_i$ (aus Kombination von $PZ1$ und $PZ2$ )
$PZRG_p$	Prozessreifegrad eines Fertigungsprozesses $p$
$Q_j$	(Informations-)Quelle $Q_j$
$Q_j^i$	Verfügbarkeit von Quelle $Q_j$ für Defizit $D_i$
$QFRG_p$	Qualitätsfähigkeitsreifegrad eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$QR_p$	Qualitätsrate eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$QRG_p$	Qualitätsreifegrad eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$

$QRRG_p$	Qualitätsratenreifegrad eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$R$	Menge aller potenziellen Restentwicklungsumfänge
$R_{pl}^p$	Robustheit eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$Ra$	$\mu m$ Mittenrauwert
$rel_{e,pl}^{PT}$	Relative Häufigkeit eines Ereignisses eines Plandatumms $pl$
$REU^r$	Restentwicklungsumfang $r \in R$
$REU^{real}$	Realer Restentwicklungsumfang
$REU^{sim}$	Restentwicklungsumfang der Simulation
$REU_{(UP)}^r$	Restentwicklungsumfang $r$ nach Ursachenpfad $UP$
$RRR^r$	Rechtlichen und funktionellen Relevanz von $REU^r$
$RRR_{Di}$	Rechtliche und funktionelle Relevanz eines Defizits
$\overrightarrow{RG^{ist}}$	Vektor der Ist-Reifegrade
$RG^r$	Rang eines $REU^r$
$RG^{real}$	Allgemeiner realer Reifegrad
$RG^{sim}$	Allgemeiner Reifegrad in der Simulation
$\overrightarrow{RG^{soll}}$	Vektor der Soll-Reifegrade
$RG_{x,pl}^{\ddot{U}G v}$	Reifegradübergabewert einer Entscheidung $x$ bezüglich eines Plandatumms $pl$ mit $v \in \{APE, RPPE, I, D\}$
$RG_{x,pl}^{\prime\ddot{U}G v}$	Korrigierter Reifegradübergabewert einer Entscheidung $x$ bezüglich eines Plandatumms $pl$ mit $v \in \{APE, RPPE, I, D\}$
$\overrightarrow{RG^{\ddot{U}G}}$	Übergabevektor
$\overrightarrow{RG^{\prime\ddot{U}G}}$	Korrigierter Übergabevektor
$RGV_{pl}^{APE}$	Reifegradvariable der Anlaufperformance eines Plandatumms $pl$
$RGV_{pl}^D$	Reifegradvariable der Definitionssicherheit eines Plandatumms $pl$
$RGV_{pl}^I$	Reifegradvariable der Informationssicherheit eines Plandatumms $pl$
$RGV_{pl}^{RPPE}$	Reifegradvariable der realen Prozessperformance eines Plandatumms $pl$
$RGV_{pl}^v$	Allgemeine Reifegradvariable eines Plandatumms $pl$ mit $v \in \{APE, RPPE, I, D\}$
$RPPE_{pl}$	Reale Prozessperformance eines Plandatumms $pl$

$RZRG_p$		Rüstzeitreifegrad eines Fertigungsprozesses $p$
$s$		Sprint mit $s \in S$
$S_{real}$		Realsprints
$S_{sim}$		Simulationssprints
$S_{pl}^{APE}$		Anlaufperformancesicherheit
$S_{pl}^D$		Definitionssicherheit
$S_{max}^{Di,r}$		maximale Gewichtungssumme der Distanz
$S_{min}^{Di,r}$		Minimale Gewichtungssumme der Distanz
$S_x^{Di,r}$		Allgemeine Gewichtungssumme der Distanz mit $x \in \{dp, bi\}$
$S_{pl}^I$		Informationssicherheit
$S_{pl}^{RPPE}$		Sicherheit der realen Prozessperformance
$SE$		Sicherheit der Einzelinformation
$SE_{pl}^{PT}$		Sicherheit der beschafften Einzelinformationen eines Plandatums $pl$
$SE_{pl}^{PT/Int}$		Sicherheit der beschafften Einzelinformationen (intervall) eines Plandatums $pl$
$SE_{pl}^{PT/Spesz}$		Sicherheit der beschafften Einzelinformationen (spezifischer Wert) eines Plandatums $pl$ (Sicherheit der Versuchsdaten)
$STKRG_p$		Stückzahlreifegrad eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$t_{i,s}^A$	h	Kapazität zur Auswertung für Defizit $D_i$
$t_{i,s}^{IB}$	h	Informationsbeschaffungszeit (Einholen von Informationen)
$t_{p,s,s}^{i/p}$	s	Pseudo(fertigungs-)zeit
$T_{N,p}$	h	Einsatzzeit eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$tf$		(Teil-) Funktion $tf \in TF$
$TF$		Menge der (Teil-) Funktionen
$TZRG_p$		Taktzeitreifegrad eines Fertigungsprozesses $p$
$U_{pl}^D$		Definitionsunsicherheit eines Plandatums $pl$
$U_{pl}^u$		Allgemeine Unsicherheitsvariable eines Plandatums $pl$
$UE_{r-fr}^{FREU}$		Ursachevidenz Folgerestentwicklungsumfang

$UE_{Di}^r$	Ursacheevidenz
$UD_x$	Relative Umsetzungsdauer von Entscheidung $x$
$U_{pl}^1$	Informationsunsicherheit eines Plandatums $pl$
$URPPE_{pl}$	Performanceunsicherheit
$VD_{pl}^{PV}$	Validierungsdistanz
$VD_{pl,max}^{PV}$	Maximale Validierungsdistanz
$VK^r$	Validierungskoeffizient
$VRG_p$	Verfügbarkeitsreifegrad eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses $p$
$VW^r$	Validierungswert eines Restentwicklungsumfangs
$VW_{max}$	Maximaler Validierungswert
$VW_{min}$	Minimaler Validierungswert
$W$	Kenngroße Werkzeugeinsatz der Validierungsdistanz
$WDH$	Wiederholungen der Simulation (Simulationsdurchlauf)
$WDH_{min}^{sim}$	Mindestwiederholung für Simulation
$WE$	Kenngroße Werkstoffeinsatz der Validierungsdistanz
$WRG$	Werkstoffreifegrad
$X$	Menge der Entscheidungen
$X_{pl}^v$	Menge der für ein Plandatum freigegebenen Entscheidungen
$\bar{x}_{pl}^{PT}$	Arithmetisches Mittel der Versuchsergebnisse
$Y_x$	Menge der Eingänge einer Entscheidung
$Z_x$	Menge der Ausgänge einer Entscheidung
$ZRG_p^m$	Zustandsreifegrade eines Merkmals $m$ des Fertigungsprozesses $p$
$ZQ$	Zuverlässigkeit der Informationsquelle
$\alpha_i^{PT}$	$\alpha$ -Formparameter der Betaverteilung (Anzahl Prototypen)
$\alpha_i^{PT/E}$	Endwert des $\alpha$ -Formparameters der Betaverteilung (Anzahl Prototypen)
$\alpha_i^{PT/S}$	Startwert des $\alpha$ -Formparameters der Betaverteilung (Anzahl Prototypen)

$\alpha_i^{WR}$	$\alpha$ -Formparameter der Betaverteilung (Wirkrichtung)
$\alpha_i^{WR/E}$	Endwert des $\alpha$ -Formparameters der Betaverteilung (Wirkrichtung)
$\alpha_i^{WR/S}$	Startwert des $\alpha$ -Formparameters der Betaverteilung (Wirkrichtung)
$\alpha_{pl}^{PT}$	Konfidenzniveau des Plandatums $pl$ (Fehlerwahrscheinlichkeit)
$\beta_i^{PT}$	$\beta$ -Formparameter der Betaverteilung (Anzahl Prototypen)
$\beta_i^{PT/E}$	Endwert des $\beta$ -Formparameters der Betaverteilung (Anzahl Prototypen)
$\beta_i^{PT/S}$	Startwert des $\beta$ -Formparameters der Betaverteilung (Anzahl Prototypen)
$\beta_i^{WR}$	$\beta$ -Formparameter der Betaverteilung (Wirkrichtung)
$\beta_i^{WR/E}$	Endwert des $\beta$ -Formparameters der Betaverteilung (Wirkrichtung)
$\beta_i^{WR/S}$	Startwert des $\beta$ -Formparameters der Betaverteilung (Wirkrichtung)
$\Delta_{pl}^{ape}$	Distanz der Anlaufperformance von Prozess $p$ bezogen auf $pl$
$\Delta_{pl}$	Distanz bezogen auf ein Plandatum $pl$
$\Delta_{pl}^{max}$	Maximal zugelassene Distanz bezogen auf ein Plandatum $pl$
$\Delta_{dp}^{Di,r}$	Validierungsabstand der Distanzparameter $dp$ Material, Geometrie und Prozess
$\Delta_{bi}^{Di,r}$	Distanz der Verfügbarkeit benötigter Informationen
$\Delta_{pl,k}^{PV}$	Kenngößendistanz mit $k \in \{Pr, W, WE, BG\}^{PT}$ für Prototypenversuche bzw. $k \in \{Pr, W\}^{VV}$ für Validierungsversuche
$\vartheta_K$	Gewichtungsfaktor Kosten
$\vartheta_{KAP}$	Gewichtungsfaktor Kapazität
$\varepsilon_{pl}^{PT}$	Erfolgswahrscheinlichkeit der Versuchsergebnisse bezogen auf ein Plandatum $pl$
$\sigma_{pl}^{PT}$	Standardabweichung der Versuchsergebnisse bezogen auf ein Plandatum $pl$
$\sigma_k^S$	Allgemeine Standardabweichung eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{\mu S}\}$
$\tilde{k}$	Parameter der gesamten Ergebnismenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{\mu S}\}$

---

$\hat{k}$	Parameter der oberen Teilmenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{\mu S}\}$
$\check{k}$	Parameter der unteren Teilmenge eines Sprintsimulationsergebnisses mit $k \in \{PDRG_{sim}^{s WDH}, FERG_{sim}^{s WDH}, K_{s,WDH}^{\mu S}\}$
$\Omega_{pl}$	Wahrnehmungsrahmen von Plandatum $pl$
$\nabla_{LVK}^{tf}$	Erfüllungsgrad der (Teil-)Funktionen
$\nabla^{WRG}$	Erfüllungsgrad Werkstoffreifegrad
$\nabla_m^f$	Erfüllungsgrad Merkmalsdefinition

**Abkürzungen**

EZ	Endzustand
FERG	Fertigungsreifegrad
FMEA	Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse
LVK	Leistungsvollständigkeit
OEE	Overall Equipment Effectivness
PEP	Produktentstehungsprozess
PDRG	Produktreifegrad
PSZZ	Pseudozufallszahl
PT	Prototyp
QFK	Qualitätsfähigkeitskurven
REU	Restentwicklungsumfänge
SOP	Start of Production
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
TPM	Total Productive Maintanance
VV	Validierungsversuch
ZK	Zielkriterium
ZWZ	Zwischenzustand
ZQ	Zuverlässigkeit der Quelle

# 1 Einleitung

Der Serienanlauf in der produzierenden Industrie ist eine entscheidende Phase im Produktentstehungsprozess, der über den wirtschaftlichen Erfolg eines Produkts und somit eines Unternehmens entscheidet [ELST17, S. 1]. Studien zufolge verfehlen etwa zwei Drittel der befragten Unternehmen ihre wirtschaftlichen und technologischen Ziele im Serienanlauf. Dies führt nicht nur zu erheblichen finanziellen Verlusten, sondern auch zu Imageproblemen. [SLAM11] Trotz jahrzehntelanger Forschung und Bemühungen, die Abläufe im Serienanlauf zu optimieren, bleibt die Verfehlung von Zeit-, Kosten- und Qualitätszielen nach wie vor ein weit verbreitetes Problem [STAU17], [BASS18], [PÖSC21] und [LUTZ22]. Ursachen hierfür liegen darin begründet, dass im Serienanlauf die einzelnen Fertigungsschritte erstmals physisch zu einer Fertigungsfolge verknüpft werden. Eine zu dem Zeitpunkt unzureichende Prozessbeherrschung führt zu hohen Ausschussraten und Qualitätsproblemen. Die unzureichende Prozessbeherrschung lässt sich auf unvorhergesehene Produktionsausfälle aufgrund einer mangelnden Qualifikation von Mitarbeitenden, fehlendes Prozesswissen und unzureichende Fertigungs- und Handhabungsmittelfähigkeiten zurückführen. Dies führt zum einen zu einer zeitlichen Verschiebung im Serienanlauf, zum anderen zu einer Verfehlung von Qualitäts- und Kostenzielen. Diese Problematik wird durch eine mangelnde Koordination der hohen Anzahl von internen und externen Schnittstellen im Serienanlauf sowie durch die zunehmende Komplexität und steigende Anforderungen an die Fertigung verstärkt. [LANZ05] Zusätzlich zu den Fertigungsproblemen sind unvorhergesehene Änderungsmaßnahmen am Produkt und in der Fertigungsplanung im Serienanlauf ein häufig auftretendes Problem. Diese Änderungsmaßnahmen resultieren aus nicht erkannten Problemen in den vorangegangenen Phasen aufgrund der methodischen Trennung von Entwicklung und Serienanlauf, einer mangelnden Kommunikation zwischen verschiedenen Unternehmensbereichen und einer unzureichenden Produkt- und Prozessreife zum Start of Production. Diese Änderungsmaßnahmen sind zeit- und kostenintensiv und führen dazu, dass die Anlaufziele nicht erreicht werden. [BASS18] Zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit produzierender Unternehmen auf Änderungen in der Produktentwicklung etablieren sich agile Methoden aus der Softwareentwicklung im Entwicklungsprozess physischer Produkte [REY20]. Vor diesem Hintergrund fokussiert die vorliegende Forschungsarbeit die Übertragung agiler Konzepte auf den Serienanlauf. Dabei wird der agile Serienanlauf als potenzieller Lösungsansatz zur gezielten Adressierung der bestehenden Herausforderungen im Serienanlauf hergeleitet. Dieser Ansatz grenzt sich von der traditionellen methodischen Trennung von Entwicklung und Serienanlauf ab und ermöglicht erstmals eine enge Verzahnung von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf in der operativen Technologieplanung. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz entwickelt, der es durch die systematische Identifikation und Reduktion von Defiziten ermöglicht, Änderungsmaßnahmen frühzeitig entgegenzuwirken, das Anlaufverhalten der Fertigung und die Produktentwicklung zielgerichtet zu synchronisieren und so den Serienanlauf zu stabilisieren.

## Introduction

Ramp-up production in the manufacturing industry represents a critical phase in the product development process, significantly impacting the economic success of both a product and a company [ELST17, S. 1]. Studies indicate that approximately two-thirds of surveyed companies fall short of their economic and technological targets during ramp-up production. The consequences are not only considerable financial losses, but also image problems. [SLAM11]. Despite decades of research and efforts to optimize ramp-up production processes, the failure to meet time, cost, and quality targets remains a prevalent issue [STAU17], [BASS18], [PÖSC21] and [LUTZ22]. The reasons for these problems are that individual manufacturing processes are physically linked to a manufacturing sequence for the first time during the ramp-up production. Insufficient process control at this stage leads to high reject rates and quality problems. The inadequate process control can be attributed to unforeseen production downtimes due to a lack of employee qualifications, a lack of process knowledge and insufficient manufacturing and handling equipment capabilities. This leads on the one hand in a delay in the ramp-up production and on the other hand in a failure to achieve quality and cost targets. This problem is increased by a lack of coordination of the high number of internal and external interfaces in the ramp-up phase as well as by the increasing complexity and rising demands on manufacturing. [LANZ05] In addition to manufacturing challenges, change measures to the product and the manufacturing planning during ramp-up production are a frequently encountered issue. These changes result from unrecognized problems in the previous phases due to the methodical separation of development and ramp-up production, inadequate communication between different company departments and insufficient product and process maturity at the start of production. Change measures are time-consuming and costly, further contributing to the failure to achieve ramp-up production targets. [BASS18] To enhance the responsiveness of manufacturing companies to changes in product development, agile methods from software development are becoming established in the development process of physical products [REY20]. In this context, the present thesis focuses on the transfer of agile concepts to ramp-up production. The agile ramp-up production is derived as a potential solution to address existing challenges in ramp-up production more effectively. This approach deviates from the traditional methodical separation of development and ramp-up production and enables for the first time agile product development and ramp-up production to interact more closely in operational technology planning. Within the scope of this thesis, a new approach is developed which enables the systematic identification and reduction of deficits to prevent changes at an early stage, to synchronize the ramp-up behavior of manufacturing and product development in a targeted manner and therefore to stabilize the ramp-up production.

## 2 Wissenschaftliche Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

### *Scientific Procedure and Structure of the Thesis*

Die wissenschaftliche Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit orientiert sich an dem von P. ULRICH [ULRI76a, S. 345 ff.] und H. ULRICH [ULRI01, S. 167 ff.] entwickelten Forschungsprozess. Hierzu erfolgt in Abschnitt 2.1 zunächst die Vorstellung des wissenschaftstheoretischen Bezugsrahmens sowie die Einordnung der vorliegenden Arbeit in die Wissenschaftssystematik. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 der formale und inhaltliche Aufbau der Arbeit beschrieben.

### 2.1 Wissenschaftstheoretischer Bezugsrahmen

#### *Scientific Reference Framework*

**Wissenschaft** wird nach P. ULRICH definiert als das menschliche Denken, welches in spezialisierten Institutionen unter Einhaltung definierter Regeln erfolgt. Die Ergebnisse dieses institutionellen Denkens (der wissenschaftlichen Tätigkeit) werden als wissenschaftliche Erkenntnisse bezeichnet. Zur konkreteren Beschreibung der Wissenschaft lässt sich eine **Wissenschaftssystematik** in Abhängigkeit vom heuristischen Entwicklungsstands und dem subjektiven Bild der Wissenschaft erstellen, welche in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Grundlegend erfolgt die Unterscheidung zwischen Formal- und Realwissenschaften. [ULRI76b, 305 f.]

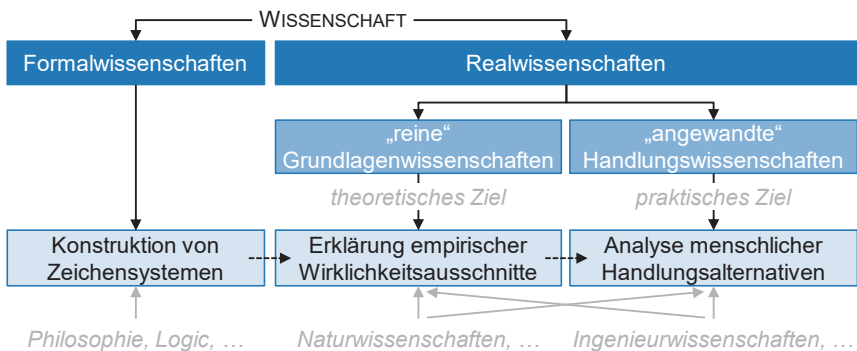


Abbildung 2.1 Wissenschaftssystematik i. A. a. P. ULRICH [ULRI76b, S. 305 f.]

*Science Systematics Referring to P. ULRICH [ULRI76b, p. 305 f.]*

**Formalwissenschaften** fokussieren die Konstruktion von Sprachen durch die Entwicklung von Zeichensystemen sowie deren Anwendung basierend auf definierten Regeln. Forschungsgegenstand sind Objekte von nichtmaterieller Beschaffenheit. Zu den Formalwissenschaften zählen bspw. Philosophie, Logik oder Mathematik. Eine Validierung der Aussagen ist durch die hohe Abstraktionsebene lediglich durch logische Überprüfung (logische Wahrheit) möglich. In Abgrenzung zu Formalwissenschaften

fokussieren die **Realwissenschaften** die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte. Ziel der Realwissenschaften ist es, die Wirklichkeitsausschnitte zu explizieren, zu generalisieren sowie Handlungsalternativen zu ihrer Gestaltung zu entwerfen. Neben der logischen Wahrheit gilt es, die Ergebnisse der Realwissenschaften hinsichtlich ihrer faktischen Wahrheit zu prüfen. In Abhängigkeit von der Zielsetzung werden Realwissenschaften in Grundlagenwissenschaften (theoretische Zielsetzung) und Handlungswissenschaften (praktische Zielstellung) unterteilt. **Grundlagenwissenschaften** werden von P. ULRICH als „reine“ Wissenschaften bezeichnet und fokussieren die Beschreibung und Erklärung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte. Den Grundlagenwissenschaften werden bspw. die Naturwissenschaften zugeordnet. **Handlungswissenschaften** werden als „angewandte“ Wissenschaft bezeichnet und fokussieren die Analyse menschlicher Handlungsalternativen mit dem Ziel, soziale und technische Systeme (Entscheidungsmodelle) zu gestalten. Neben den Ingenieurwissenschaften zählen bspw. Sozialwissenschaften zu den Handlungswissenschaften. [ULRI76b, S. 305 f.]

In der vorliegenden Arbeit wird die methodische Unterstützung produzierender Unternehmen bei der Gestaltung von agilen Serienanläufen thematisiert (vgl. Kapitel 1). Somit ist die **vorliegende Arbeit gemäß der Wissenschaftssystematik den „angewandten“ Handlungswissenschaften (Ingenieurwissenschaften) zuzuordnen.**

## 2.2 Formaler und inhaltlicher Aufbau der Forschungsarbeit

### *Formal and Content Structure of the Research Approach*

Wie in Abschnitt 2.1 hergeleitet, wird die vorliegende Arbeit den angewandten Handlungswissenschaften (Realwissenschaften) zugeordnet. Somit gilt es, neben der logischen Wahrheit (Widerspruchslosigkeit) die faktische Wahrheit (empirische Erkenntnisse) der Modelle und Hypothesen zu prüfen. KARL POPPER kritisierte die bisherige Idee der Verifikation und somit endgültigen Bestätigung wissenschaftlicher Hypothesen. Dabei wird die Wissenschaft als einen Prozess ständiger Kritik und Prüfung von Theorien durch empirische Tests gesehen. Als Reaktion auf den klassischen Empirismus entwickelte POPPER den Kritischen Rationalismus als wissenschaftstheoretische und erkenntnistheoretische Position und betont die Rolle der Kritik in der Wissenschaft. [POPP94] Dem Verständnis des Kritischen Rationalismus folgend, ist eine vollständige Induktion induktiver Forschungsansätze (vom Einzelfall generell gültige Aussagen ableitend – Bottom-Up) als direkte Verifikation allgemeiner Aussagen durch wiederholte Bestätigung von Einzelbeobachtungen nicht möglich. Der Kritische Rationalismus unterliegt der Annahme, dass das n-fache Eintreffen einer Behauptung (n-fache Bestätigung einer Einzelbeobachtung) nicht automatisch auf die generelle Gültigkeit der Behauptung bei der n+1-ten Überprüfung schließen lässt. [ALBE00] Somit ist es nicht möglich, Hypothesen als endgültig wahr zu beweisen. Vielmehr sind Hypothesen vorläufig so lange als wahr beizubehalten, wie sie nicht durch Einzelbeobachtungen intersubjektiv wiederholbar widerlegt bzw. falsifiziert werden. Die Falsifikation einer Hypothese durch eine empirische Aussage mittels Einzelbeobachtung wird als

zentrales und zulässiges Verfahren im Erkenntnisprozess der Realwissenschaften betrachtet. [ULRI76a, S. 345 f.] Liegt dem Forschungsvorhaben ein deduktiver Forschungsansatz zu Grunde (von einer allgemeinen Aussage auf den Einzelfall schließen – Top-Down), ist es zielführend nur solche Hypothesen und Modelle zu kombinieren, welche weder falsifiziert werden noch deren Falsifikation als wahrscheinlich angesehen wird. Empirische Überprüfungen, mit einer als hinreichend anerkannten statistischen Wahrscheinlichkeit die Wirklichkeit richtig zu beschreiben, gelten als zulässiges Verfahren, mögliche falsifizierte Hypothesen bzw. Modelle zu nutzen, obwohl sie im Einzelfall wegen unbekannter Störgrößen nicht zutreffen. Beim Auftreten von Störgrößen ist die Präzisierung der Hypothese zu prüfen. Zu beachten gilt, dass Relativierungen einer Hypothese durch weitere Bedingungen zwar deren Präzision erhöhen, gleichzeitig aber die Allgemeingültigkeit und somit den Informationsgehalt reduzieren. [ULRI76b, 346] Annahmen und Eingrenzungen (Präzisierungen) der vorliegenden Forschungsarbeit werden in Abschnitt 6.2 beschrieben. Basierend auf dem Verständnis des Kritischen Rationalismus [ALBE00] sowie dem von H. ULRICH [ULRI01, S. 167 ff.] und P. ULRICH [ULRI76a, S. 345 ff.] entwickelten Forschungsprozesses erfolgt im Folgenden die Ableitung der wissenschaftlichen Vorgehensweise und somit des formalen und inhaltlichen Aufbaus der Arbeit (siehe Abbildung 2.2). Als **Forschungsprozess** werden in der vorliegenden Arbeit die Gesamtheit der Forschungsaktivitäten zur Entwicklung, empirischen Überprüfung und Weiterentwicklung bestehender Forschungsansätze definiert.

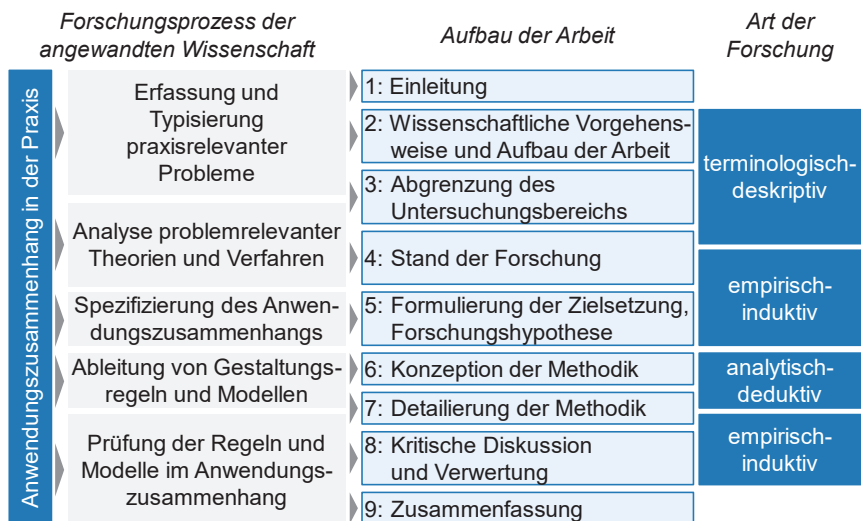


Abbildung 2.2 Wissenschaftliches Vorgehen und Aufbau der Arbeit i. A. a. P. ULRICH [ULRI76a, S. 345 ff.] und H. ULRICH [ULRI01, S. 167 ff.]

*Scientific Procedure and Structure of the Approach Referring to P. ULRICH [ULRI76a, p. 345 ff.] and H. ULRICH [ULRI01, p. 167 ff.]*

Die Forschungsaktivitäten werden hinsichtlich der Art der Forschung (Aufgabenstellung) in terminologisch-deskriptive, empirisch-induktive und analytisch-deduktive Forschungsaufgaben unterschieden [ULRI76a, S. 347 f.]. Basierend auf der Einführung in die Thematik (Kapitel 1) erfolgt zunächst der terminologisch-deskriptive Aufbau der Arbeit. **Terminologisch-deskriptive** Forschungsaktivitäten dienen der Definition und Operationalisierung eines einheitlichen Begriffsverständnisses und deren Anwendung sowie der Beschreibung des Forschungsobjekts [ULRI76a, S. 347 f.]. Hierzu erfolgte in Kapitel 2 (siehe oben) die Beschreibung der wissenschaftlichen Vorgehensweise sowie des inhaltlichen und formalen Aufbaus der Arbeit. Anschließend werden in Kapitel 3 unter Abgrenzung des Untersuchungsbereichs praxisrelevante Probleme erfasst und der Forschungsrahmen beschrieben. **Empirisch-induktive** Forschungsaktivitäten umfassen in der vorliegenden Arbeit die Analyse beobachtbarer Zusammenhänge (problemrelevanter Theorien und Forschungsansätze) in Kapitel 4, die Ableitung von Forschungsdefiziten sowie die Spezifizierung des Anwendungszusammenhangs durch Formulierung von Zielsetzung und Forschungshypothese in Kapitel 1. **Analytisch-deduktive** Forschungsaktivitäten fokussieren die Ableitung von Prognosen, die deduktive Konstruktion von Modellen sowie Transformation der Ergebnisse in konkrete Handlungsanweisungen [ULRI76a, S. 347 f.]. Hierzu erfolgt die Konzeptionierung der Methodik in Kapitel 6. Die konzeptionierte Methodik wird in Kapitel 7 deduktiv entwickelt und detailliert beschrieben. Da die Forschungsaktivitäten in den einzelnen Kapiteln nicht trennscharf einzelnen Aufgabenstellungen zugeordnet werden können und teils weitere Forschungsaktivitäten implizieren, werden die Übergänge als partiell fließend betrachtet. Um während der Entwicklung der Methodik sicherstellen zu können, dass die entwickelten Modelle und Methoden widerspruchsfrei und als vorläufig richtig oder wahr angenommen werden können (nicht falsifiziert, siehe Abschnitt 2.1), erfolgt die Durchführung von Realisierungsuntersuchungen (**empirisch-induktive** Forschungsaktivitäten) [ULRI76a, S. 347 f.]. Zur Prüfung der formulierten Forschungshypothese erfolgt in Kapitel 8 die kritische Diskussion der erzielten Forschungsergebnisse hinsichtlich der Zielerreichung sowie der wissenschaftlich und wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten [ULRI76a, S. 347 f.]. Abschließend erfolgt in Kapitel 9 die Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit.

## 3 Abgrenzung des Untersuchungsbereichs

### *Specification of the Investigation Area*

In diesem Kapitel werden der Untersuchungsbereich der vorliegenden Arbeit beschrieben und abgegrenzt sowie die für das Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen definiert und ein einheitliches Begriffsverständnis (terminologische Grundlage) geschaffen. Hierzu erfolgt in Abschnitt 3.1 die Einführung in die Terminologie der operativen Technologieplanung sowie deren Einordnung in das Technologiemanagement. Anschließend wird in Abschnitt 3.2 ein einheitliches Verständnis über die Grundlagen und Definitionen des Serienanlaufs im Kontext des Produktentstehungsprozesses geschaffen. Abschnitt 3.3 dient zur Einführung in die grundlegende Terminologie der Methodikentwicklung. Das Kapitel wird mit der Ableitung des Handlungsbedarfs sowie der Formulierung der wirtschaftlichen Problemstellung in Abschnitt 3.4 geschlossen.

### 3.1 Grundlagen und Begriffsabgrenzungen der Technologieplanung

#### *Fundamentals and Definitions of Technology Planning*

Die Begriffe Technologie und Technik werden in der Literatur unterschiedlich definiert und in verschiedenen Zusammenhängen verwendet. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden sie oft synonym verwendet, weshalb eine Definition und Abgrenzung der Begriffe erforderlich ist. [BIND96, S. 87 ff.] Der Wortherkunft nach setzt sich der Begriff Technologie, griechisch: *tekhnologia*, aus den griechischen Wörtern τέχνη *technē* („Handwerk, Kunst, Fähigkeit“) und λόγος *logos* („Wort, Lehre, Wissenschaft“) [MENG01] zusammen und beschreibt eine kunstvolle oder systematische Betrachtung [PART91, S. 957]. Auch der Begriff Technik, entlehnt aus dem Mittellateinischen *technica*, wird auf die griechischen Wörtern τεχνικός *technikós* und τέχνη *technē* (Handwerk, Kunst, Fertigkeit, Wissenschaft) zurückgeführt [KLUG02, S. 819]. BINDER und KANTOWSKI vereinen die Begriffe Technologie und Technik im Sinne des Systemdenkens in einem **integrativen Begriffssystem**, welches in dieser Arbeit zugrunde gelegt wird. In diesem Ansatz wird keine Trennung von Technologie (Wissen) und Technik (Anwendung) vorgenommen. **Technik** wird in diesem Ansatz als Subsystem der **Technologie** verstanden, welches das Wissen, die Kenntnisse und Fertigkeiten zur Lösung von Problemen technischer Natur sowie benötigte Anlagen und Verfahren zu deren praktischer Umsetzung beinhaltet. [BIND96, S. 96 ff.] Nach GERPOTT lassen sich Technologien nach ihrem Einsatzgebiet, ihren Interdependenzen, ihrer Lebenszyklusphase, ihrer branchenbezogenen oder unternehmensinternen Anwendungsbreite, ihrem Grad des Produktbezugs sowie ihrer rechtlichen Schützbarkeit klassifizieren. In dieser Arbeit wird zwischen Produkt-, Produktions- und Materialtechnologien differenziert und somit eine Klassifizierung der Technologien nach ihrem Einsatzgebiet vorgenommen. [GERP05, S. 26 f.] Unter Produkttechnologien werden technologische Prinzipien verstanden, welche die angestrebten Funktionen der Produkte erzielen

[GERP05, S. 95 f.]. Materialtechnologien beschreiben die technischen Eigenschaften der Produktmaterialien [SCHU11c, S. 36]. Produktionstechnologien umfassen Fertigungs- und Montagetechnologien und werden zur Herstellung von Produkten eingesetzt [TSCH98, S. 231]. Unter Technologien werden in dieser Arbeit, entsprechend der Differenzierung, Fertigungstechnologien aus der Gruppe der Produktionstechnologien verstanden. Zu den **Fertigungstechnologien** zählen die in der DIN8580 aufgeführten Fertigungsverfahren, welche als „Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern“ [DIN22] definiert werden. Zur Vereinfachung der Lesbarkeit werden Fertigungsverfahren im Folgenden ebenfalls als Fertigungstechnologien bezeichnet (siehe Abbildung 3.1) und die Begriffe Fertigungstechnologie und Technologie synonym verwendet.

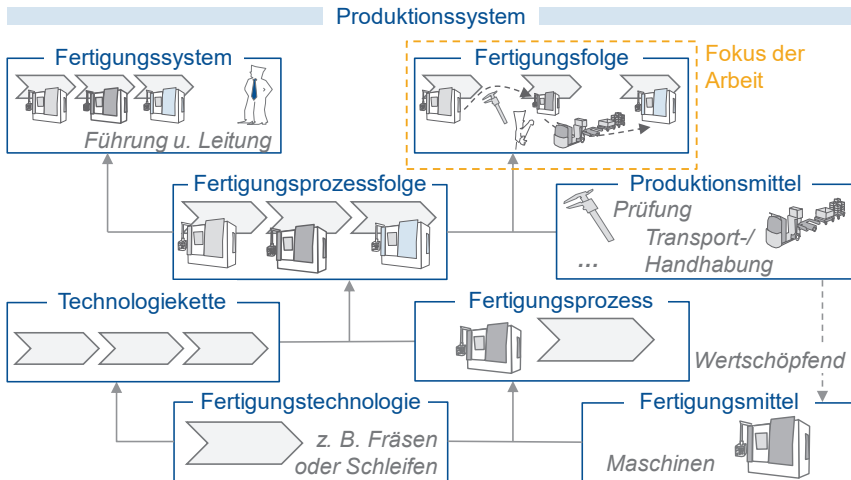


Abbildung 3.1 Gestaltungsojekte im Produktionssystem i. A. a. BECKERS [BECK23, S. 11]

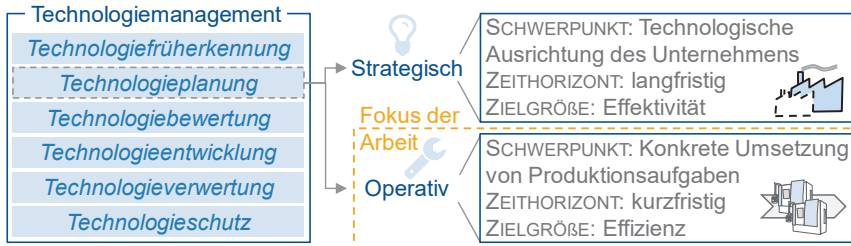
*Design Objects within the Production System Referring to BECKERS [BECK23, p. 11]*

Konkrete Realisierungen der Technologien in Form von (Produktions-)Maschinen zur direkten oder indirekten Substanz-, Form- oder Fertigungszustandsänderung werden als **Fertigungsmittel** bezeichnet und als wertschöpfende Teilmenge der Produktionsmittel verstanden. **Produktionsmittel** sind alle notwendigen Ressourcen und Hilfsmittel, welche nicht in das Produkt eingehen. Neben den Fertigungsmitteln zählen nicht wertschöpfende Transport-, Handhabungs-, Lager- sowie Mess- und Prüfmittel zu den Produktionsmitteln. [TROM01, S. 32 ff.] Das Handhaben stellt neben dem Fördern und dem Lagern eine entscheidende Teilfunktion des Materialflusses dar [WEHK20, S. 791]. Allgemein wird das Handhaben als das definierte Verändern oder vorübergehende Aufrechterhalten einer vorgegebenen räumlichen Anordnung von Körpern in einem Bezugskoordinatensystem verstanden. Bei der Durchführung von Handhabungsaufgaben besteht die Anforderung, einzelne Objekte (z. B. Werkstücke)

nicht in ihren Eigenschaften zu verändern. Eine **Handhabungstechnologie** ist im Rahmen dieser Arbeit als eine Technologie definiert, welche Handhabungsschritte zwischen Fertigungstechnologien ausführt sowie Handhabungsschritte, welche den Fertigungstechnologien vor oder nachgelagert sind (Bestückungs-/Entnahmetechnologien). [HESS20, S. 11 ff.] Fertigungstechnologien sind produktionsmittelunabhängig [BECK23, S. 10]. Die abstrakte Kombination von Fertigungstechnologien in definierter Reihenfolge wird als **Technologiekette** bezeichnet [FALL00, S. 14]. Mit Hilfe der Fertigungstechnologien wird eine Kategorisierung der Fertigungsmittel ermöglicht. [BECK23, S. 10] Werden neben den Fertigungstechnologien direkt-wertschöpfende Fertigungsmittel in den Betrachtungsrahmen integriert, wird dies als **Fertigungsprozess** bezeichnet. Die sequenzielle Verknüpfung von Fertigungsprozessen wird durch die **Fertigungsprozessfolge** beschrieben [TROM01, S. 34]. Als **Handhabungsprozess** wird der Vorgang der Veränderung der geografischen Position eines Bauteils ohne Veränderung dessen Eigenschaften definiert. Die Erweiterung des Betrachtungsrahmens von Fertigungsprozessfolgen um Führungs- und Leitungsaufgaben wird i. A. a. WESTKÄMPER als **Fertigungssystem** definiert [WEST06, S. 51 ff.]. **Fertigungsfolgen** umfassen neben den Fertigungsprozessen die für den Materialfluss notwendigen, nicht wertschöpfenden Produktionsmittel [KLOC98]. Das **Produktionssystem** stellt die übergeordnete Gestaltungsebene dar und vereint die zuvor beschriebenen Gestaltungsobjekte (Abbildung 3.1). **In der vorliegenden Arbeit werden neben den direkt-wertschöpfenden Fertigungsprozessen, die für den Materialfluss im Serienanlauf notwendigen Handhabungsprozesse innerhalb von Fertigungsfolgen betrachtet.** Weitere Produktionsmittel wie Transport-, Lager-, Mess- und Prüfmittel werden explizit nicht betrachtet.

Das **Technologiemanagement** ist ein elementarer Bestandteil in der Planung von Unternehmensprozessen. Zentrales Ziel des Technologiemanagements ist, durch Weiterentwicklung und Aufbau des technologiebezogenen Erfolgspotenzials die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen langfristig zu sichern. [KLAP11, S. 6 f.] Zur Erreichung dieses Ziels wird das Technologiemanagement in die sechs Grundaktivitäten Technologiefrüherkennung, -planung, -entwicklung, -verwertung, -schutz und -bewertung aufgeteilt, siehe Abbildung 3.2 [SCHU11b, S. 15 ff.]. In der vorliegenden Arbeit werden schwerpunktmäßig Grundaktivitäten zur Technologieplanung adressiert. Die **Technologieplanung** bündelt und systematisiert alle Aktivitäten im Zusammenhang mit der zukünftigen technologischen Ausrichtung von Unternehmen sowie deren konkrete Umsetzung zur Fertigung von Produkten [SCHU11a, S. 172]. Ziel ist es, die Kosten und Durchlaufzeiten zu reduzieren sowie die Verfügbarkeit von Fertigungsprozessen und deren Produktivität in Unternehmen zu erhöhen [EVER99, S. 10–40]. EVERSHEIM differenziert innerhalb der Technologieplanung zwischen strategischer und operativer Technologieplanung. Innerhalb der **strategischen Technologieplanung** wird das Ziel verfolgt, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen durch Ausrichtung der Entwicklungs- und Innovationsprozesse (Produkt- und Prozessinnovationen) langfristig auszubauen bzw. zu erhalten [BULL94] und somit die Effektivität zu steigern

[EVER99, S. 10–41]. Die **operative Technologieplanung** fokussiert die kurz- bis mittelfristige Umsetzung der Ziele aus der strategischen Technologieplanung. Den Betrachtungsrahmen stellt der optimale und somit effiziente Einsatz von Fertigungstechnologien zur Realisierung konkreter Produktionsaufgaben dar.



**Abbildung 3.2** Einordnung der Technologieplanung in das Technologiemanagement i. A. a. SCHUH [SCHU11b, S. 11 ff.], KLAPPERT [KLAP05, S. 61 ff.] und EVERSHEIM [EVER99, S. 10–40 f.]

*Classification of Technology Planning in the Technology Management Referring to SCHUH [SCHU11b, p. 11 ff.], KLAPPERT [KLAP05, p. 61 ff.] and EVERSHEIM [EVER99, p. 10-40 f.]*

Die Aktivitäten der operativen Technologieplanung lassen sich in die zwei Phasen Technologiegrob- und Technologiefeinplanung gliedern. **Technologiegrobplanung** umfasst die Ermittlung alternativer Fertigungstechnologien und die Analyse des Bauteilspektrums. Aufbauend auf der Grobplanung erfolgt in der **Technologiefeinplanung** die Planung der Verkettung, der Auslegung und der Peripherie sowie die ökonomisch-ökologische Bewertung von Fertigungsprozessen [EVER99, S. 10–41 f.]. **In der vorliegenden Arbeit erfolgt die Gestaltung von Fertigungsfolgen im Serienanlauf, weshalb die Methodik sowohl zu Teilen der Technologiegrobplanung als auch der Technologiefeinplanung innerhalb der operativen Technologieplanung zugeordnet wird.**

### 3.2 Der Serienanlauf im Produktentstehungsprozess

*The Ramp-Up Production in the Product Development Process*

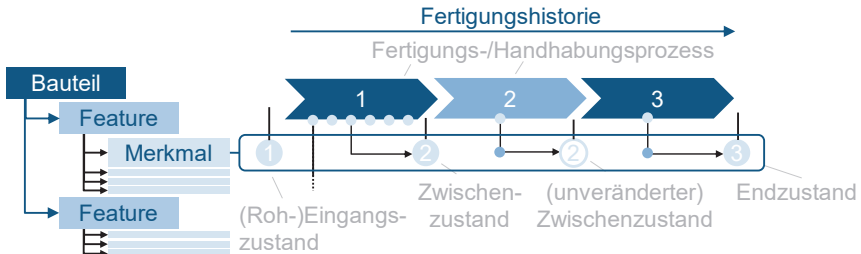
Bedingt durch vermehrt variierende Kundenanforderungen sowie technischen Fortschritt sind bestehende Produkte vielfach nicht in der Lage, Kundenanforderungen langfristig zu erfüllen. Um am Markt erfolgreich zu agieren, ist es für Unternehmen erforderlich, schnell auf veränderte Kundenanforderungen zu reagieren und bestehende Produkte durch neue Produkte zu ersetzen. [SCHU16c] Allgemein wird unter einem **Produkt** ein materielles Erzeugnis oder eine Dienstleistung verstanden, welches/welche für Kunden einen Wert besitzt und von Unternehmen am Markt angeboten wird [VDI17]. Als **physisches Produkt** wird ein durch einen Konstruktionsprozess entwickeltes materielles Erzeugnis verstanden [VDI19]. Physische Produkte lassen sich nach FELDHUSEN durch ihre Produktarchitektur beschreiben [FELD13a, S. 471].

Eine **Baugruppe** beschreibt ein funktionsfähiges technisches Gebilde, welches aus mehreren Bauteilen fest oder beweglich zusammengesetzt ist. Ein **Bauteil** ist ein aus festen Stoffen bestehendes Gebilde einer bestimmten Gestalt, welches eine technisch beschreibbare und physisch nicht weiter zerlegbare Einheit technischer Produkte darstellt. [KOLL98, S. XVII] **Bauteile stellen den Ausgangspunkt für die Planung und Gestaltung von Fertigungsfolgen und somit den Betrachtungsrahmen der vorliegenden Arbeit dar.** Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass das zu betrachtende Bauteil dem Produkt produzierender Unternehmen entspricht, weshalb die Begriffe Produkt und Bauteil in der vorliegenden Arbeit synonym verwendet werden.

Zur Herstellung von Bauteilen werden Fertigungsprozesse eingesetzt. Um eine Zuordnung von geometrischen Teilbereichen eines Bauteils zu Fertigungsprozessen zu ermöglichen, werden Bauteile durch (Fertigungs-)Features beschrieben [KLOC05]. Nach SALOMON beschreiben **Features** Informationssätze, welche sich auf geometrische oder andere Attribute eines Bauteils beziehen und Schlussfolgerungen hinsichtlich des Designs, der Leistung oder der Fertigung und Montage eines Bauteils oder einer Baugruppe ermöglichen [SALO93, S. 113]. Somit wird über ein Feature ein Flächen- oder Volumenelement eines Bauteils beschrieben, welches einer oder mehreren Teilfunktionen oder Fertigungszwecken direkt zugeordnet wird [MÜLL18, S. 58]. **Fertigungsfeatures** werden nach EVERSHEIM definiert als geometrische, technologische und ausführungstechnische Beschreibung einer Fertigungsaufgabe bei der Überführung eines Bauteileingangszustands in einen entsprechenden Ausgangszustand [EVER94]. Fertigungsfeatures werden durch Bauteilmerkmale beschrieben. **Bauteilmerkmale** werden nach KLOCKE et al. in die vier Ebenen Makroebene (Geometrie sowie Form- und Lagetoleranzen), Mikroebene (Oberflächenstruktur), Mesoebene (Gefügestruktur und mechanische Eigenschaften) und Nanoebene (tribochemische Reaktionsschichten) unterteilt. [KLOC05] Basierend auf der merkmalsbezogenen Bauteilbeschreibung leitet BUCHHOLZ die für die Technologieplanung relevanten fünf Merkmalstypen *Makrogeometrie, Form- und Maßtoleranzen, Härte, Oberflächenrauheit und Eigenspannung* ab [BUCH14, S. 63]. Die Eignung der Merkmalstypen für die Planung und Gestaltung von Technologieketten und Fertigungsfolgen wurde unter anderem in den Arbeiten von STAUDER [STAU17] und REY [REY20] nachgewiesen. **Daher wird auch in der vorliegenden Arbeit die merkmalsbezogene (fertigungsfeature-orientierte) Bauteilbeschreibung nach BUCHHOLZ und EVERSHEIM zugrunde gelegt.**

Die von der Konstruktion festgelegten Bauteilmerkmale bezeichnen die am Ende der Fertigung geforderten Ausprägungen und werden als **Endzustände** bezeichnet (Abbildung 3.3) [FALL00]. Die einzelnen Bauteilmerkmale werden schrittweise durch den Einsatz mehrerer Fertigungsprozesse vom Eingangszustand (Rohmaterial) in den geforderten Endzustand überführt [REY20, S. 82]. Jeder Fertigungsprozess hinterlässt somit charakteristische Veränderungen am Bauteil bzw. an dessen Merkmalen, was als **Fertigungshistorie** bezeichnet wird. Aus der Fertigungshistorie resultiert eine Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangszustand nachgelagerter, verketteter Fertigungsschritte. [KLOC08, S. 6] Die Zwischenstufen der Transformation des

Eingangszustands in den geforderten Endzustand durch schrittweise charakteristische Veränderung eines Bauteilmerkmals werden als **Zwischenzustände** bezeichnet [FALL00, S. 105]. Handhabungstechnologien führen zu keiner Veränderung der Zwischenzustände, da diese lediglich für die Veränderung der geografischen Position des Bauteils eingesetzt werden.



**Abbildung 3.3** Zwischen- und Endzustände in der Fertigungshistorie innerhalb der merkmalsbezogene Bauteilbeschreibung

*Intermediate and final states in the manufacturing history within the characteristic-related component description*

Der Zweck eines Produkts (eines Bauteils) liegt in der Erfüllung technischer Aufgaben durch Erfüllung von Funktionen. **Funktionen** dienen dazu, den Eingangszustand eines technischen Systems in einen Ausgangszustand zu überführen. Die Gesamtfunktion eines Bauteils lässt sich in Teilfunktionen untergliedern, welche Teilaufgaben des Bauteils erfüllen. Realisiert werden Teilfunktionen durch Wirkprinzipien, welche auf Effekten beruhen. [FELD13c, S. 242 ff.] **Effekte** sind als identische und voraussehbare physikalische, chemische oder biologische Geschehnisse definiert [VD119]. Die Wirkungsweise von Effekten wird durch die Bauteilmerkmale bestimmt [FELD13c, S. 247]. Infolgedessen wird durch die Auswahl geeigneter Bauteilmerkmale eine Nutzung der Effekte und somit eine Realisierung der Wirkungsprinzipien zur Erfüllung der Teilfunktionen ermöglicht [BORS07, S. 44].

Produkterfolg ist nach EHRENSPIEL eines der wesentlichen Unternehmensziele [EHRL17, S. 311]. Neben der Akzeptanz eines Produkts am Markt wird der Produkterfolg maßgeblich vom Produktentstehungsprozess (der beteiligten Abteilungen/Akteure eines Unternehmens) beeinflusst [EHRL17, S. 200]. Der Produktentstehungsprozess (PEP) umfasst die Gesamtheit der Prozessschritte von der Produktidee bis zum physikalisch vorliegenden, gefertigten Produkt [BEND16, S. 402]. Um eine zeitliche und inhaltliche Einordnung des Objektbereichs der vorliegenden Arbeit sowie die Abgrenzung und Beschreibung der für die Arbeit erforderlichen Phase des Serienanlaufs in Relation zu vor- und nachgelagerten Phasen im PEP zu ermöglichen, werden die Phasen des PEP detailliert beschreiben und den Aktivitäten der Technologieplanung zu geordnet.

In der Literatur existiert keine einheitliche Definition der ablauforganisatorischen Phasen und Aktivitäten im PEP. In der wissenschaftlichen Literatur zum Serienanlauf wird grundsätzlich zwischen Phasenmodellen mit produkt- und prozess-/anlagenbezogener Beschreibung differenziert, siehe Abbildung 3.4. [WINK07, S. 9 ff.]

**Produktbezogene Phasenmodelle** beschreiben den Übergang des Produktes vom Entwicklungsprozess zur Serienfertigung (Abbildung 3.4). Der Produktentwicklungsprozess beginnt mit der Produktplanung und Konstruktion, in denen die Produktidee konkretisiert, die Produkthanforderungen definiert und durch einzelne Prototypenversuche die Ergebnisse validiert werden [LANZ05, S. 9 f.]. Anschließend beginnt mit der Pilotserienfertigung die Präparation des Hochlaufs, welche dem Erreichen der für die Serienfertigung erforderlichen Produktreife dient. **Reife** beschreibt im Allgemeinen den Wert an geleisteter Arbeit bei der Durchführung von Projekten oder Vorgängen, welcher zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt wird [DIN09]. Die Quantifizierung der Reife erfolgt mit Hilfe des **Reifegrads**, welcher den Ausprägungsgrad einer Sammlung zeitabhängiger Merkmale (Reifeindikatoren) bezogen auf die zum jeweiligen Zeitpunkt geltenden Anforderungen beschreibt [HELL06, S. 50].

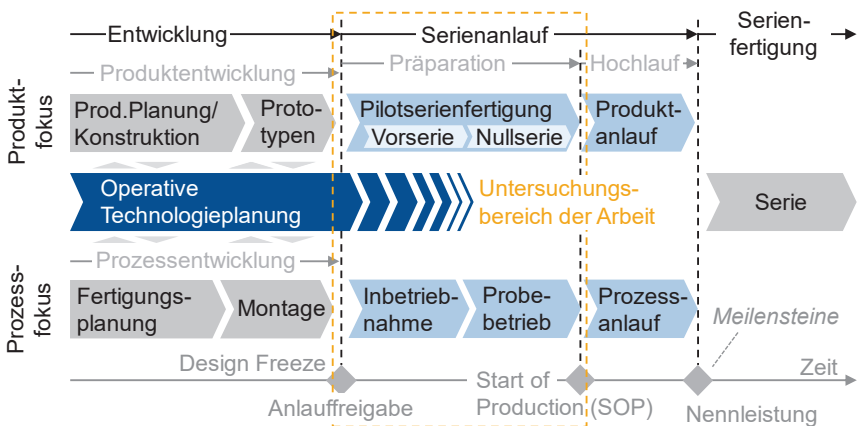


Abbildung 3.4 Integratives Phasenmodell des Anlaufs i. A. a. WINKLER [WINK07, S. 13] und STAUDER [STAU17, S. 11]

*Integrative Phase Model of Ramp-Up Production Referring to WINKLER [WINK07, p. 13] and STAUDER [STAU17, p. 11]*

Der Produktreifegrad wird in der Literatur unterschiedlich definiert [STE118, S. 6]. In der vorliegenden Arbeit wird den Beschreibungen von WANGENHEIM [WANG98, S. 123 ff.] und TÜCKS [TÜCK10, 35 f.] gefolgt, und der **Produktreifegrad** als Maß für die Erreichung der Kundenanforderungen in Form und Funktion definiert. Die **Pilotserie** wird in die Vorserie und Nullserie unterteilt [LANZ05, S. 9 ff.]. Die **Vorserie** bezeichnet die Fertigung von Bauteilen (größere Anzahl an Prototypen) mit Versuchswerkzeugen. Ziel ist die Früherkennung von Problemen der Serienfertigung

[YAMA89]. In der **Nullserie** erfolgt die Feinabstimmung der Fertigung durch den Übergang von Versuchs- zu Serienwerkzeugen. Mit dem **Start of Production (SOP)**, bei dem das erste kundenfähige Produkt hergestellt wird, beginnt der **Hochlauf** (Produktanlauf). Dabei wird die Produktionsmenge kontinuierlich gesteigert. Mit dem Erreichen der Serienfertigungsmenge endet der Hochlauf und die Serienfertigung des Produkts beginnt. [LANZ05, S. 13 ff.] Die produktbezogene Beschreibung ist überwiegend aus der Automobilindustrie motiviert und findet bspw. in den Arbeiten von BAUMGARTEN [BAUM01], RISSE [RISS03] und LAICK [LAIC03] Anwendung. In Abgrenzung zur produktbezogenen Beschreibung fokussiert die **prozess- bzw. anlagenbezogene Phasenmodellierung** i. A. a. ZEUGTRÄGER [ZEUG98] die Überführung neuer Produktionssysteme von der Prozessentwicklung in die Serienfertigung [LANZ05, S. 11]. Der Prozessentwicklungsprozess beginnt mit der Planung und Gestaltung der Fertigungsprozesse. Anschließend erfolgt die Montage der Anlagen. Mit der Inbetriebnahme beginnt die Präparationsphase zur Sicherung der für den Serienbetrieb erforderlichen Prozessreife. Der **Prozessreifegrad** wird in der vorliegenden Arbeit, an die Beschreibung von WANGENHEIM [WANG98, S. 123 ff.] und TÜCKS [TÜCK10, S. 10 f.] angelehnt, definiert als Maß für die Herstellbarkeit von Bauteilen in ausreichender Qualität und Quantität. Die **Inbetriebnahme** dient der Herstellung der Funktionsfähigkeit sowie der Qualifikation von Mitarbeitenden durch gezielte Schulungsmaßnahmen. Anschließend erfolgt die **Prozesserprobung**. Nach erfolgreicher Präparation erfolgt der **Prozessanlauf**, in dem die Produktionsmenge auf Serienfertigungsmenge gesteigert wird. [ZEUG98, S. 26 ff.] Die prozessbezogene Beschreibung findet unter anderem in den Arbeiten von FRISCHE [FRIT98], KUHN [KUHN02], und LANZA [LANZ05] Anwendung.

Die ganzheitliche Beschreibung des Produktentstehungsprozesses (PEP) erfordert aufgrund der in der Praxis zeitlich parallelen Abfolge von Aktivitäten und deren Abhängigkeit (Simultaneous Engineering) [LANZ05, S. 9] sowohl eine Abbildung der produktseitigen als auch der prozessseitigen Sicht [WINK07, S. 12]. In der neueren wissenschaftlichen Literatur, wie bspw. der Arbeit von STAUDER wird daher das **integrative Phasenmodell** i. A. a. WINKLER [WINK07, S. 13] zugrunde gelegt [STAU17, S. 11]. WINKLER unterteilt den PEP in die Phasen Entwicklung, Serienanlauf und Produktion. Die Phasen werden durch Meilensteine zeitlich miteinander verknüpft. In der **Entwicklungsphase** werden die Phasen der Produktentwicklung (Planung/Konstruktion und Prototypenbau) und Prozessentwicklung (Fertigungsplanung und Montage) zusammengefasst. Nach Abschluss der Entwicklungsphase erfolgt der Design Freeze. [WINK07, S. 13 ff.] Der **Design Freeze** beschreibt den Zeitpunkt, ab dem keine Änderungen am Produkt mehr vorgenommen werden und die Freigabe für den Serienanlauf erfolgt [EGER05]. Die Phase des **Serienanlaufs** umfasst die Präparations- und Hochlaufphase [WANG98, S. 25]. Im Serienanlauf werden Produkt und Fertigungsfolge sowie die Prozesse der Fertigungsfolge basierend auf der Produkt- und Prozessentwicklung erstmals physisch miteinander verknüpft [STAU17, S. 22]. Ziel ist es, durch die Fertigung einer größeren Anzahl physischer Prototypen, Wechselwirkungen und Sekundäreffekte zwischen Produkt und Fertigung möglichst früh zu identifizieren und eine

ausreichende Produkt- und Prozessreife für einen stabilen Serienbetrieb sicherzustellen [LANZ05, S. 12 ff.]. STAUDER verortet in diesem Zusammenhang die operative Technologieplanung i. A. a. FALLBÖHMER im integrativen Phasenmodell als Bindeglied zwischen produkt- und prozessbezogener Phasenbeschreibung [STAU17, S. 11]. FALLBÖHMER definiert die operative Technologieplanung über den Integrationsansatz als integrativen Prozess aus Produkt- und Prozessentwicklung [FALL00, S. 37 ff.]. **In der vorliegenden Arbeit wird das integrative Phasenmodell zur Beschreibung des Produktentstehungsprozesses zugrunde gelegt.** Überwiegend erfolgen Serienanläufe aufgrund der Überarbeitung vorhandener oder der erstmaligen Produktion neuer Produkte [PFOH00, S. 1191], **weshalb der Fokus sowie die Phasenbeschreibung der produktbezogenen Beschreibung entsprechen.** Die Entwicklung neuer Fertigungsmittel/Anlagen sowie deren Montage sind kein Bestandteil der Arbeit. **Ziel der Arbeit ist es, das Erreichen der erforderlichen Produkt- und Prozessreife zum SOP sicherzustellen, weshalb sich der Untersuchungsbereich auf die Phase der Präparation im Serienanlauf bezieht.**

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Phasen der Entwicklung (Abschnitt 3.2.1), des Serienanlaufs (Abschnitt 3.2.2) und der Serienfertigung (Abschnitt 3.2.3) detailliert beschrieben und in die Aktivitäten der operativen Technologieplanung eingeordnet.

### 3.2.1 Entwicklungsprozess

#### *Development Process*

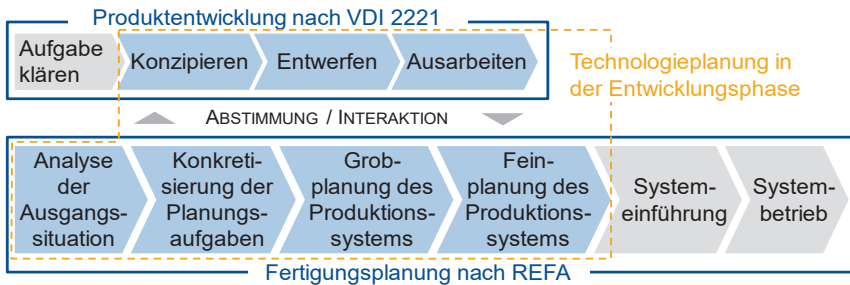
Die Gestaltung und Planung sowie die Umsetzung der Produktidee bei einem physischen Bauteil erfordern eine strukturierte Abfolge von Einzelschritten. Es ist entscheidend, die Inhalte und Schnittstellen dieser Schritte klar festzulegen und zu beschreiben. [FELD13b, S. 11]. Um die Prozesse zu systematisieren und einen standardisierten Ordnungsrahmen für den Ablauf eines Entwicklungsprojektes durch die Beschreibung der Produkte und durchzuführender Arbeiten zu schaffen, werden Vorgehensmodelle eingesetzt [KALU13, S. 18].

#### **Klassisch deterministische Entwicklung**

Klassisch deterministische Entwicklungsprozesse (Konstruktion/Planung) zeichnen sich durch ein linear strukturiertes, sequenzielles Vorgehen mit hoher Planungsintensität zu Beginn des Entwicklungsprozesses aus [GUAR16, S. 63]. Die einzelnen Phasen werden nacheinander durchlaufen und Iterationen finden lediglich innerhalb der einzelnen Phasen statt [UNGE11, S. 690 f.]. Die in der Praxis und Literatur weitverbreitetsten und etablierten Vorgehensmodelle sind der Stage-Gate-Prozess nach COOPER [GAUB09, S. 22] sowie das Vorgehen nach VDI Richtlinie 2221 [PAHL13, S. 663]. Beim klassischen Stage-Gate-Prozess wird der Entwicklungsprozess in Stages (Entwicklungsaufgaben/Phasen) und Gates (Meilensteine), welche nicht durchlaufen werden dürfen, wenn eine Entwicklungsaufgabe als nicht abgeschlossen bewertet wurde, unterteilt [COOP08]. In Weiterentwicklungen des Stage-

Gate-Prozesses werden die Phasenübergänge flexibel gestaltet [COOP15]. VDI Richtlinie 2221 unterteilt den Entwicklungsprozess in die im Maschinenbau gängigen generischen Phasen Planen (Anforderungsaufnahme), Konzipieren (Funktionsanalyse und Prinziplösungen), Entwerfen (konstruktive Ausgestaltung) und Ausarbeiten (Detaillierung der Ausgestaltung) [EHRL17, S. 312 ff.].

Nach dem Verständnis des integrativen Phasenmodells im Sinne des Simultaneous Engineerings erfolgt die Prozessentwicklung (im Folgenden Fertigungsplanung) ablauforganisatorisch parallel zur Produktentwicklung [FALL00, S. 37 ff.]. Um eine wirtschaftliche Gestaltung und Fertigung des Produktes zu realisieren, ist eine frühzeitige Abstimmung zwischen Produktentwicklung und Fertigungsplanung erforderlich [KESS99, S. 281 ff.]. Dem Integrationsansatz von FALLBÖHMER folgend [FALL00, S. 37 ff.] interpretiert MÜLLER die operative Technologieplanung als integrativen Prozess zwischen dem Produktentwicklungsprozess nach VDI Richtlinie 2221 [EHRL17, S. 312 ff.] und den Fertigungsplanungsprozess nach REFA [REFA90], siehe Abbildung 3.5 [MÜLL07, S. 17]. Unter **Fertigungsplanung** werden im Folgenden die planerischen Tätigkeiten zur Auslegung und Gestaltung des Produktionssystems verstanden.



**Abbildung 3.5** Einordnung der Aktivitäten der Technologieplanung in die Entwicklungsphase i. A. a. MÜLLER [MÜLL07, S. 17]

*Classification of Technology Planning Activities in the Development Phase Referring to MÜLLER [MÜLL07, p. 17]*

Die Technologieplanung besitzt somit innerhalb des Unternehmens bereichsübergreifende Planungsfunktion, deren Aktivitäten insbesondere den Bereichen Konstruktion und Arbeitsvorbereitung zuzuordnen sind. Im Rahmen der Technologieplanungsaktivitäten erfolgt zunächst die konstruktive Abstimmung zwischen Konstruktion und Fertigungsplanung zur Festlegung der Produktgeometrie, der einzusetzenden Werkstoffe sowie die Identifikation potenzieller Fertigungsverfahren (Grobplanung). Anschließend werden die Planungsergebnisse detailliert und die Fertigungsverfahren festgelegt und zu Fertigungsfolgen ablauforganisatorisch systematisiert. [FALL00, S. 12 ff.]

### Agile Entwicklung

Entwicklungsprozesse produzierender Unternehmen sind bis heute überwiegend an deterministischem Vorgehen orientiert. Die Fähigkeit Produkt und Fertigung kurzfristig, flexibel in immer kürzen Zyklen an verändernde Marktanforderungen anzupassen

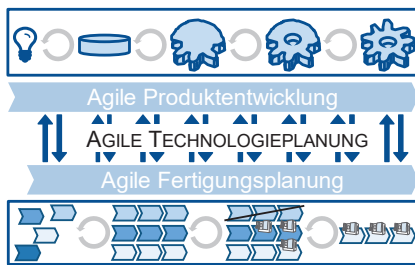
gewinnt zunehmend an Bedeutung. Um folglich am Markt erfolgreich zu agieren, ist es für Unternehmen erforderlich, schnell auf veränderte Kunden/-Marktanforderungen zu reagieren. [BASS18, S. 18] Klassisch deterministische Entwicklungsprozesse werden im Zusammenhang der steigenden Dynamik der Märkte als zu langsam kritisiert [COOP15, S. 20]. Um die Reaktionsfähigkeit zu steigern und den Kunden mehr in den Entwicklungsprozess einzubeziehen [SCHU16c], halten iterative Konzepte der agilen Softwareentwicklung vermehrt Einzug in den Entwicklungsprozess physischer Produkte [SCHU19, S. 707]. Die Begrifflichkeiten agil, flexibel und dynamisch werden im allgemeinen Sprachgebrauch oftmals synonym verwendet, beschreiben jedoch unterschiedliche Eigenschaften. **Dynamik** bezieht sich auf die Eigenschaft, sich aktiv und energiegeladener in einem schnell verändernden Umfeld zu bewegen und wird oftmals auch als Beschreibung eines Bewegungszustands oder Veränderung von Merkmalsausprägungen im Zeitverlauf angesehen. Dynamik impliziert oft eine proaktive Haltung und die Fähigkeit, Veränderungen voranzutreiben, anstatt nur darauf zu reagieren. [TERM14, S. 6 f.] **Flexibilität** bedeutet anpassungsfähig zu sein und bezeichnet die Fähigkeit alternative Wege zu finden oder zu nutzen, wenn sich die Bedingungen ändern, ohne die Effizienz oder das Ergebnis zu beeinträchtigen [BASS18, S. 110 ff.]. **Agilität** bezieht sich auf die Fähigkeit und kontinuierliche Bereitschaft, schnell und effektiv auf Veränderungen zu reagieren und bezeichnet eine, insbesondere im Projektmanagement und in der Softwareentwicklung populäre, methodische und prozessuale Eigenschaft, welche eine iterative, inkrementelle Vorgehensweise, bei der schnelle Anpassungen vorgenommen werden, impliziert [FÖLL22, S. 73 ff.]. Agile Entwicklungsprozesse integrieren somit durch eine flexible Vorgehensweise und hohe Dynamik die vorangegangenen Eigenschaften [BASS18, S. 17]. Charakteristisch für agile Entwicklungsprozesse ist die Entwicklung von vorzeig- und bewertbareren Produktinkrementen in kurzen wiederkehrenden Entwicklungszyklen, sogenannten **Sprints** [COOP16, S. 522 f.]. Ziel ist es, die starre Vorgehensweise klassischer deterministischer Entwicklungsprozesse aufzuheben und agiler zu gestalten [SAND14, S. 34]. Die Ansätze der agilen Softwareentwicklung wie die Dynamic System Development Method [STAP97], Extreme Programming [BECK03], Adaptive Software Development [HIGH13] sowie der Scrum-Ansatz [SCHW07] basieren auf dem Agilen Manifest in dem grundlegende Leitsätze zusammengefasst sind [BECK01]. Der Scrum-Ansatz ist der am weitesten verbreitete Ansatz [KOMU20] und findet zunehmend Einsatz in produzierenden Unternehmen [SOMM15, S. 35]. Beim Scrum-Ansatz erfolgt die Entwicklung in mehreren Sprints an deren Ende ein vorzeigbares Entwicklungsergebnis erzielt sowie in den selbstorganisierten, mit definierten Rollen strukturierten Teams präsentiert und validiert wird [SCHW07]. Die kontinuierliche Integration des Kunden in die Entwicklungssprints resultiert in einem hohen Aufkommen von Änderungen im Entwicklungsprozess. Agile Entwicklungsprozesse stellen somit den Lernprozess und die Steigerung des Kundennutzens in den Vordergrund. Hierdurch wird eine bessere Handhabung von Markt- und Technologieunsicherheiten bzw. Risiken im Entwicklungsprozess ermöglicht [SCHU17].

Die agilen Konzepte der Softwareentwicklung sind nicht direkt auf den Entwicklungsprozess physischer Produkte übertragbar [SCHU16a, S. 4]. Der Faktor Herstellbarkeit von Produkten und die damit verbundene Planung und Auslegung der Fertigung bilden neben produktseitigen Unsicherheiten zusätzliche Unsicherheitsfaktoren im Entwicklungsprozess [GART16, S. 20]. Studien zufolge existieren erfolgreiche Anwendungsberichte aus der industriellen Praxis [KOMU15]. Die zentrale Herausforderung in der Anwendung agiler Methoden in der industriellen Praxis stellt die regelmäßige Realisierung und Definition des Sprintergebnisses (Produktinkrements) dar [REY20, S. 13]. In der Softwareindustrie beschreiben Produktinkremente meist fertig auslieferbare Bestandteile eines Programmcodes, da die Software durch die einzelnen Funktionen in funktionsfähige Softwareinkremente zerteilbar ist [GART16, S. 21]. Dies ist bei physischen Produkten oftmals nicht möglich [SCHU16b, S. 621].

Prototypen bilden sowohl für die Produktgestaltung, als auch für die Planung der Fertigung ein wichtiges Hilfsmittel [BULL97, S. 171]. In der vorliegenden Arbeit werden Prototypen in Anlehnung an SCHUH [SCHU12, S. 217] und NAGARAJAH [NAGA13, S. 334] definiert als Produktkonzepte bzw. physische Informationsträger, welche der Demonstration von Funktionalitäten sowie als Informationsquelle zur Reduzierung von Unsicherheiten des zu entwickelnden Produkts und der Fertigung dienen. Ein Prototyp ist dabei im Vergleich zum Serienprodukt speziell für einen bestimmten inkrementellen Einsatzzweck konzipiert und damit im Vergleich zum Serienprodukt in Bezug auf gewisse Aspekte unvollständig [KOHL13, S. 78 f.]. Ziel von Prototypen ist es, das Serienprodukt für den entsprechenden Einsatzzweck in möglichst einfacher Form zu repräsentieren, wobei alle relevanten Eigenschaften abgebildet werden, ohne den Gesamtzusammenhang zu verzerren [LIM08]. Da die Reduzierung von Unsicherheiten und Generierung von Kundenfeedback im Entwicklungsprozess eine Kernaufgabe der Produktinkremente darstellt [COOP15, S. 21], vertreten GARTZEN et al. die Auffassung, dass die Fertigung von Prototypen zur Demonstration von Entwicklungsergebnissen geeignet ist [GART16]. In der vorliegenden Arbeit wird unter einem **Prototyp** ein physischer Informationsträger verstanden, welcher den Entwicklungsfortschritt bzw. das Ergebnis der für den Sprint definierten Entwicklungsaufgabe demonstriert.

Ziel der Technologieplanung ist es, durch enge Abstimmung zwischen Produktentwicklung und Fertigungsplanung eine technologisch-wirtschaftlich optimierte Fertigung sicherzustellen. Durch die Integration agiler Methoden in den Entwicklungsprozess physischer Produkte ergeben sich neue Anforderungen und Aufgaben für die Technologieplanung (Abbildung 3.6). Um eine frühestmögliche Sicherstellung einer serienfertigungsgerechten Entwicklung des Produktes zu ermöglichen, ist es erforderlich, die starre Vorgehensweise durch eine iterative Entwicklung in Sprints aufzuheben, wodurch die Phasen (bspw. Technologiegrob- und -feinplanung) nicht mehr trennscharf voneinander abgrenzbar sind. Darüber hinaus liegen zu Beginn des Entwicklungsprozesses unvollständige Produktinformationen mit hohen Unsicherheiten vor, die oftmals in umfangreichen Änderungen resultieren. Die unsichere

Informationsgrundlage ist zwingend von der Technologieplanung bei der Gestaltung von Fertigungsprozessen zu berücksichtigen. [REY20, S. 17 f.]



- Iterative Entwicklung in Sprints
- Kontinuierliche systematische Reduzierung von Unsicherheiten
- Häufige Änderungen im Entwicklungsprozess
- Fertigung einer großen Anzahl Prototypen
- Kontinuierliche Gestaltung und Bewertung von Produkt und Fertigungsfolge

**Abbildung 3.6** Agile Technologieplanung im agilen Entwicklungsumfeld i. A. a. REY [REY20]

*Agile Technology Planning in Agile Development Environment Referring to REY [REY20]*

Ziel ist es, die Auswirkungen der Unsicherheiten und Änderungen auf Produkt und Fertigung zu antizipieren und die Gestaltung und Bewertung von Produkt und Fertigung kontinuierlich zu validieren bzw. Planungsergebnisse anzupassen. Durch die Identifikation von Stellhebeln und die sprintweise Beschaffung von Informationen werden die Unsicherheiten im Verlauf des Entwicklungsprozesses systematisch reduziert. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, nicht nur die Planung und Ausgestaltung der Serienfertigung sowie deren kontinuierliche Bewertung und Anpassung zu berücksichtigen, sondern auch die iterative Herstellung von Prototypen in technologisch-wirtschaftlicher Hinsicht zu planen und zu bewerten. [REY20, S. 17 f.]

### 3.2.2 Serienanlauf

#### *Ramp-up production*

Im Serienanlauf werden verschiedenste interpendente Gestaltungsobjekte und Disziplinen zusammengeführt und Fertigungsprozesse erstmals physisch miteinander verknüpft [SCHU05, S. 406]. Ziel des Serienanlaufs ist es, das Anlaufprodukt nach erfolgreicher Anlauffreigabe (Design Freeze) möglichst schnell in eine abgesicherte Serienfertigung zu überführen [KIRS08, S. 45]. Ziel des **Anlaufmanagements** ist die Gestaltung und Lenkung der für die erfolgreiche Durchführung notwendigen Phasen und Aktivitäten [BASS18, S. 16]. Nach KUHN et al. umfasst der Aufgabenbereich des Anlaufmanagements alle Tätigkeiten und Maßnahmen, die zur Planung, Steuerung und Durchführung des Anlaufes mit den dazugehörigen Produktionssystemen notwendig sind. Dabei gilt es neben den Phasen des Serienanlaufs vor- und nachgelagerte Phasen im Sinne einer messbaren Eignung der Produkt- und Prozessreife mit in die Betrachtung einzubeziehen. [KUHN02, S. 8] In der wissenschaftlichen Literatur wie bspw. den Arbeiten von WINKLER [WINK07], DYCKHOF et al. [DYCK12] und STAUDER [STAU17] wird der Anlauf von Produktionssystemen zur Abbildung komplexer Wirkbeziehungen oftmals über eine Analogie zu einem einschleifigen Regelkreis



## Anlaufkurve

Mit Hilfe von Anlaufkurven lassen sich unterschiedliche Ziel- und Kenngrößen des Serienanlaufs in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf abbilden. In der industriellen Praxis sowie in der wissenschaftlichen Literatur wird das Anlaufverhalten von Produkt und Fertigung überwiegend durch Abbildung des Zusammenhangs zwischen der Ausbringung-/Produktionsmenge, Qualitätsrate oder prozentualen Kapazitätserreichung auf der Ordinate über der Zeit auf der Abszisse beschrieben [BASS15, S. 40]. Die zeitliche Quantifizierung und grafische Visualisierung des Anlaufverhaltens wird im Folgenden als **Anlaufkurve** bezeichnet [CLAR05, S. 192]. Charakteristisch ist ein über die Zeit ansteigender Verlauf der Ausbringungsmenge bis zum Erreichen der geplanten maximalen Serienfertigungskapazität (Kammlinie). [LANZ05, S. 2] Ziel ist es, einen möglichst steilen Verlauf der Anlaufkurve bei möglichst geringen Anlaufkosten zu realisieren [RISS03, S. 188], wobei es zu beachten gilt, dass auf Grund wirtschaftlicher Effekte nicht immer der steilste Verlauf die optimale Anlaufkurve widerspiegelt [OPIT06, S. 356]. **Anlaufkosten** beinhalten in Anlehnung an STAUDER alle Kosten, die für den Transfer der instabilen Fertigung zur stabilen Serienfertigung (wie bspw. Informationsbeschaffungskosten, Schulungskosten, Fertigungskosten von Prototypen, Nacharbeits- und Ausschusskosten) für die der Fertigungsfolge übergeordneten Kostenstelle anfallen [STAU17, S. 114 ff.]. Die Erfassung der Ausbringungsmenge erfolgt in der industriellen Praxis diskontinuierlich über definierte Zeiträume (bspw. gemittelte Produktionsleistung an Gutteilen einer Schicht), weshalb sich Anlaufkurven in diskrete Intervallen unterteilen lassen [DYCK12, S. 1430]. Der diskrete Verlauf der Hochlaufphase lässt sich durch kontinuierliche Funktionen approximieren. Die Approximation für Vor- und Nullserie wird aufgrund der großen Streuungen in der Literatur teils als nicht zwingend sinnvoll erachtet [RENN12, B-2, S.4]. Empirische Untersuchungen von bspw. GUSTMANN et al. [GUST89] und BAUR [BAUR67] haben gezeigt, dass Anlaufkurven aufgrund von Lerneffekten während des Serienanlaufs durch mathematische Funktionen in Form einer S-Kurve mit Hilfe von Potenz- und logistischen Funktionen approximierbar sind, siehe Abbildung 3.8 [GUST89, S. 60 ff.].

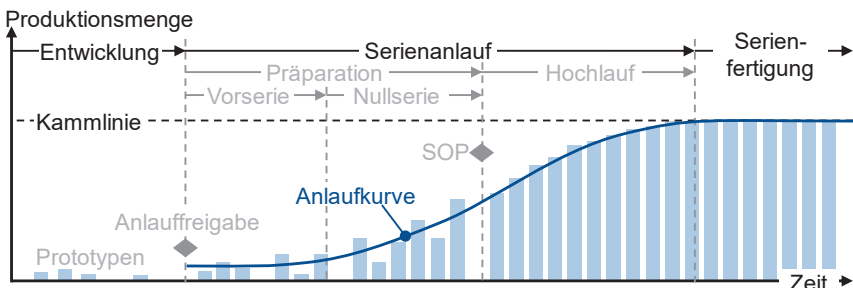


Abbildung 3.8 Anlaufkurve i. A. a. DYCKHOFF [DYCK12, S. 1430] und WINKLER [WINK07, S. 19]

*Ramp-Up Curve Referring to DYCKHOFF [DYCK12, p. 1430] and WINKLER [WINK07, p. 19]*

Kennzeichnend für den Verlauf von Lerneffekten ist eine zunächst geringe Ausbringungsmenge aufgrund des hohen Aufwandes durch die Erprobung der neuen Produkte und Fertigungsprozesse. Mit zunehmender kumulierter Ausbringungsmenge wird der Aufwand durch Lerneffekte geringer und resultiert in einer kontinuierlichen Steigerung der Ausbringungsmenge. Zum Ende des Serienanlaufs wird der Einfluss der Lerneffekte geringer, weshalb sich eine geringere Steigung der Ausbringungsmenge bis zum Erreichen der konstanten Serienfertigungsmenge ergibt. [GART12, S. 24 f.]

### **Anlaufzielsystem**

Aufgrund der Eigenschaft des Serienanlaufs einer zeitlich abgeschlossenen Phase zwischen Entwicklung und Serienfertigung sowie der Individualität aufgrund der Produkt-/Prozessfokussierung wird der Serienanlauf in der wissenschaftlichen Literatur oftmals als Projekt charakterisiert. In Anlehnung an WINKLER lassen sich die drei grundlegenden Projektzielgrößen Zeit (Terminziel), Kosten (Effizienzziel) und Qualität (Effektivitätsziel) für den Serienanlauf ableiten [WINK07, S. 6 ff.]. Als übergeordnetes Ziel lässt sich das Bestreben produzierender Unternehmen nach einer Erreichung der geforderten Qualität bei maximaler Produktionsleistung, minimalen Kosten und Dauer von Serienanläufen zusammenfassen [WINK07, S. 8 f.]. Aufgrund der Interdependenzen der (konfliktären) Zielgrößen wird die Erreichung des übergeordneten Ziels erschwert [BASS18, S. 20]. Die isolierte Fokussierung einzelner Zielgrößen führt zur Vernachlässigung anderer Zielgrößen [GART12, S. 28]. Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass die temporäre Fokussierung einzelner Zielgrößen erfolgreich ist [SCHU05, S. 407]. Basierend auf dieser Erkenntnis wird die dynamische Gewichtung der Ziele des Zielsystems angestrebt. Beispielsweise schlägt ZEUGTRÄGER eine qualitätsgesteuerte Maßnahmengewichtung in drei Phasen (P1: produktqualitätsorientierte Maßnahmen zur technischen Anlagenqualität, P2: mengenleistungsorientierte Maßnahmen zur technischen Anlagenqualität und P3: Maßnahmen zur organisatorischen Anlagenfähigkeit) vor [ZEUG98, S. 80 f.]. SCHUH et al. forcieren ein Konzept zum Reifegradcontrolling, mit dem Ziel die Serienreife auf Grundlage der gezielten Steuerung von Produkt- und Prozessreifegrad zu beschreiben. Um zum SOP das Ziel einer 100 %-igen Serienreife zu erreichen, erfolgt im Verlauf der Präparationsphase die Verschiebung der Fokussierung. In frühen Phasen wird der Fokus auf die Steigerung der Produktreife gelegt, welcher kontinuierlich auf eine Fokussierung der Prozessreife übergeht. [SCHU05, S. 408]

### **3.2.3 Serienfertigung**

#### *Serial Production*

Produktion bezeichnet in Sinne der betrieblichen Wertschöpfung die Transformation von Materialien, Diensten, Rechten und Informationen, bei der erworbene Produktionsfaktoren (Inputfaktoren) in höherwertige und am Absatzmarkt nachgefragte Outputfaktoren mit Hilfe eines Produktionssystems systematisch organisiert überführt wer-

den [SCHU14, S. 2 f.]. In Abhängigkeit von der produzierten Stückzahl (durchschnittliche Leistungswiederholhäufigkeit pro Jahr) wird zwischen Einmal- (keine Wiederholung), Einzel- und Kleinserien-, Serien-, sowie Massenfertigung (unbegrenzte Wiederholung) unterschieden. Die Übergänge sind fließend zu betrachten. Die **Serienfertigung** bezeichnet die (meist automatisierte) Fertigung einer hohen, begrenzten Stückzahl mehrerer Bauteile hintereinander (Los) über einen begrenzten Zeitraum. [SCHU14, S. 29 f.] **Fokus der Arbeit liegt auf dem Serienanlauf einer Fertigung mit hoher Anzahl gleicher Bauteile und ist daher der Serienfertigung zuzuordnen.** Die Planung und Gestaltung der Serienfertigung ist kein Bestandteil der Arbeit.

### 3.2.4 Unsicherheiten im Entwicklungsprozess

#### *Uncertainties in the Development Process*

Im agilen Entwicklungsprozess unterliegen sowohl Informationen zu Bauteilmerkmalen als auch zu potenziellen Fertigungstechnologien/-mitteln Unsicherheiten [REY20, S. 15]. Das Verständnis des Unsicherheitsbegriffs lehnt sich in dieser Arbeit an die allgemeine Informationstheorie (engl.: Generalized Information Theorie) an, in welcher die Begriffe Information und Unsicherheit miteinander verknüpft sind. Nach KLIR sind **Unsicherheiten** Informationsdefizite, welche sich durch geeignete zusätzliche Informationen reduzieren lassen. [KLIR06, S. 6 ff.] In der wissenschaftlichen Literatur wird zwischen aleatorischen (zufallsbezogene) und epistemischen (wissensbezogene) Unsicherheiten differenziert [ENGE10, S. 215]. **Aleatorische Unsicherheiten** (auch als stochastische Unsicherheiten bezeichnet [LÜDT16, S. 30]) basieren auf Zufällen und unvorhersehbaren Ereignissen und bezeichnen natürliche, physikalische bedingte Schwankungen von Systemen [FLAG13, S. 121], welche nicht reduziert werden können [MIGN18, S. 586]. **Epistemische Unsicherheiten** beruhen auf unvollständigen Informationen (Informationsdefiziten) über ein Produkt oder einen Prozess [ENGE10, S. 215] und resultieren aus einer ungenügenden Genauigkeit von Informationen, Widersprüchen oder Unklarheiten. Im Gegensatz zu aleatorischen Unsicherheiten lassen sich epistemische Unsicherheiten durch zusätzliche Informationen reduzieren. Epistemische Unsicherheiten lassen sich in verdeckte und erkannte Unsicherheiten unterteilen. **Erkannte epistemische Unsicherheiten** werden bewusst akzeptiert. [OBER10, S. 55 f.] Diese Unsicherheiten sind oftmals in ingenieurtechnischen Modellbildungen zu finden [HAUP20, S. 8]. Um eine unzureichende oder gefährdende Auslegung technischer Systeme zu vermeiden, ist es erforderlich, diese mathematisch zu modellieren [KNET04, S. 115]. Im Gegensatz zu erkannten, fehlt bei den **verdeckten epistemischen Unsicherheiten** die Kenntnis darüber, dass entsprechende Informationen unvollständig oder relevant für die Systemmodellierung sind. Häufige Ursachen sind Fehleinschätzungen, Irrtümer oder menschliche Fehler. Auf Basis der erkannten epistemischen Unsicherheiten besteht die Möglichkeit, verdeckte epistemische Unsicherheiten aufzudecken, bspw. indem Fehleinschätzungen oder Irrtümer durch neue Erkenntnisse ersichtlich werden. [OBER10, S. 56 f.]

### 3.3 Modelltheoretische und methodische Grundlagen

#### *Model Theoretical and Methodological Basics*

Grundlegend für das Verständnis der vorliegenden Arbeit ist die Einführung und Definition modelltheoretischer und methodischer Grundlagen. Das Verständnis einer Methodik der vorliegenden Arbeit ist an das allgemeine Methodikmodell nach JENKE angelehnt [JENK07], welches unter anderem von STAUDER [STAU17], REY [REY20] und BECKERS [BECK23] erfolgreich in der Technologieplanung angewandt wurde. Die wesentlichen Bestandteile des Methodikmodells sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Eine **Methodik** setzt sich aus einzelnen Modellen und Methoden zusammen, die mit Hilfe einer Semantik verknüpft werden [JENK07, S. 25 ff.]. Eine **Methode** wird von JENKE als ein planmäßiges, zielgerichtetes Vorgehen, welches durch Hilfsmittel unterstützt wird und als Werkzeug bei der Durchführung von Aktivitäten im Problemlösungsprozess unterstützend wirkt, definiert. Ziel ist es, einen Input in ein erwartetes Ergebnis (Output) durch zeitliche Abfolge von Aktivitäten unter definierten Regeln und unter Bezugnahme verschiedener Grundprinzipien der Problemlösung zu transferieren. [JENK07, S. 27] Die **Semantik** beinhaltet die entsprechende Entscheidungslogik zur Anwendung der einzelnen Modelle und Methoden sowie deren logische und zeitliche Verknüpfung [RODE13, S. 35].

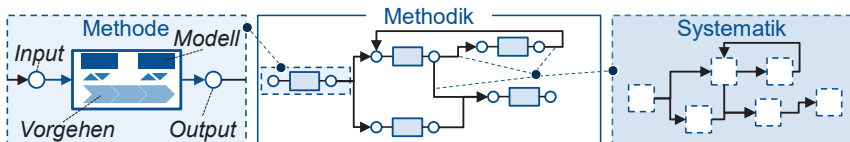


Abbildung 3.9 Methodikmodell nach JENKE [JENK07] und BECKERS [BECK23, S. 46]

*Methodology Model According to JENKE [JENK07] and BECKERS [BECK23, p. 46]*

Ein **Modell** dient zur Vorhersage einer Verhaltensweise eines Realsystems und ist in der Wissenschaft definiert als Gebilde, welches die inneren Funktionen und Beziehungen des Realsystems vereinfacht, schematisch und idealisiert abbildet [PATZ82, S. 307 ff.]. Nach STACHOWIAK besteht ein Modell aus einer Zuordnungs-eigenschaft, einer Verkürzungscharakteristik und einer pragmatischen Funktion. Somit ist jedes Modell ein Abbild eines Systems oder eines Prozesses (Zuordnungs-eigenschaft), abstrahiert das Original durch eine Fokussierung auf relevante Parameter (Verkürzungscharakteristik) und wurde für eine beabsichtigte Verwendung erstellt (pragmatische Funktion). [STAC73, S. 131 ff.] Modelle lassen sich nach PATZAK zweckbezogen in Beschreibungs-, Erklärungs-, Vorhersage- und Entscheidungsmodelle differenzieren. **Beschreibungsmodelle (deskriptive Modelle)** bilden keine Wirkzusammenhänge ab und dienen der Abbildung von vorgefundenen Zuständen und somit der rein deskriptiven Erfassung und Abbildung von konkreten oder abstrakten Phänomenen. **Erklärungsmodelle (explikative Modelle)** geben Aufschluss für das Auftreten bestimmter Zustände des Phänomens, indem allgemeingültige und durch logisch-induktive Schritte ermittelte Wirkzusammenhänge als Thesen unterstellt

werden. Dabei ist die Richtigkeit einer formulierten Hypothese so lange gegeben, bis diese falsifiziert wird. **Vorhersagemodelle (prognostische Modelle)** dienen der Prognose von Aussagen über zukünftiger Systemzustände und Systemverhalten unter Angabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten. Vorhersagemodelle bauen auf Erklärungsmodellen auf und werden mittels deduktiver Schritte ermittelt. Mit Hilfe historischer Daten sowie nachträglicher Prognose eingetretener Zustände (ex post-Prognose) kann die Wirksamkeit von Vorhersagemodellen validiert werden. **Entscheidungsmodelle (präskriptive-normative Modelle)** dienen der Ermittlung von Handlungsalternativen unter Bezug auf die vorher definierte Zielsetzung. Zentrale Bestandteile von Entscheidungsmodellen bilden dabei die Zielsetzungen oder Nutzenfunktionen, die Randbedingungen und explizite Entscheidungsvariablen. [PATZ82, S. 313 ff.]. **In der vorliegenden Arbeit werden sowohl Beschreibungs- und Erklärungsmodell als auch Prognose- und Entscheidungsmodelle innerhalb der Methodik verwendet.**

### 3.4 Handlungsbedarf und wirtschaftliche Relevanz

#### *Required Intervention and Economic Relevance*

Basierend auf der terminologisch-deskriptiven Beschreibung und Herleitung relevanter Terminologien und Begriffe sowie der Einführung in die Thematik der vorliegenden Forschungsarbeit erfolgt im Folgenden die Analyse und Erfassung praxisrelevanter Probleme und Herausforderungen.

Nach einer Studie der UNIVERSITÄT KLAGENFURTH verfehlen ca. zwei Drittel der befragten Unternehmen das Ziel eines wirtschaftlich und technologisch erfolgreichen Serienanlaufs. Aus der Studie geht hervor, dass 65 % der Zeitziele, 59 % der Kostenziele durch Verfehlung geplanter Herstell- (42 %) und Produktwechselkosten (58 %) sowie 47 % der Qualitätsziele aufgrund von Stückzahlabweichungen (10 %) und Verfehlungen der Produkt- (70 %) und Prozessqualität (20 %) nicht erreicht werden [SLAM11, S. 388 ff.]. Aktuelle Forschungsarbeiten wie bspw. die Arbeiten von DOMBROWSKI [DOMB17] STAUDER [STAU17], BASSE [BASS18], STEINHÄÜBER [STEI18], PÖSCHL [PÖSC21] und LUTZ [LUTZ22] weisen darauf hin, dass diese Problematik nach wie vor existiert.

Die **Verfehlung von Anlaufzielen** führt nach wie vor bei produzierenden Unternehmen zu einem hohen **wirtschaftlichen Schaden** und **Imageverlusten**.

Die Verfehlungen der Anlaufziele lassen sich unter anderem auf die **Instabilität der Fertigungsfolge** zurückführen. Nach FLEISCHER et al. sind **unvorhergesehene Wirkzusammenhänge** zwischen Produkt und Fertigung, instabile Qualitätsfähigkeiten und Verfügbarkeitsverluste aufgrund von Unterbrechungen im Produktionsprozess ursächlich für das instabile Verhalten im Serienanlauf, (siehe Abbildung 3.10 [FLEI07, S. 2 ff.]). Die hohe Anzahl interner und externer Schnittstellen, welche im Serienanlauf erstmal miteinander verknüpft werden sowie die zunehmende Komplexität der Fertigungs-/ Handhabungsprozesse sind ein wesentlicher Treiber für diese unvorhergesehenen Wirkzusammenhänge [LANZ05, S. 20]. Externe Schnittstellen wie

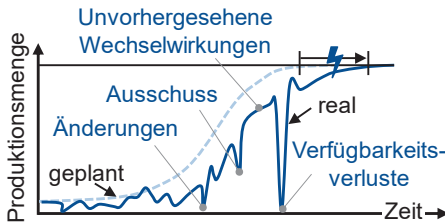


Abbildung 3.10 Verfehlung von Anlaufzielen

*Failure to Achieve Ramp-Up Targets*

bspw. die Integration von Zulieferern [PETE08, S. 22 ff.] werden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Aufgrund der Interdisziplinarität im Serienanlauf (Beteiligung verschiedenster Unternehmensbereiche) ist das Ziel der operativen Technologieplanung sicherzustellen, dass relevante Informationen zur richtigen Zeit den beteiligten Unternehmensbereichen, wie bspw. Fertigungsplanung und Konstruktion (interne Schnittstellen), zur Verfügung stehen [WINK07, S. 24 f.]. Die Verfehlung dieses Ziels führt zu einer unmittelbaren Verzögerung des Serienanlaufs und somit durch die daraus bedingt steigenden Kosten, zu einer Verfehlung der Zeit- und Kostenziele [BASS15, S. 111]. Diese Schnittstellenproblematik lässt sich auf Fertigungsfolgen übertragen. In der Entwicklung werden die Fertigungs-/Handhabungstechnologien sowie deren Fertigungs-/Handhabungsmittel isoliert hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit validiert [WIEN02]. Im Serienanlauf werden die Teilsysteme (Fertigungsmittel und Handhabungsmittel) erstmals physisch miteinander zu einer Fertigungsfolge verknüpft [BISC07, S. 20]. Die Wechselwirkungen zwischen Produkt und Fertigung innerhalb der Fertigungsfolge, die sich aus der Fertigungshistorie ergeben, resultieren in der industriellen Praxis oftmals in Inkompatibilitäten einzelner Fertigungsschritte [STAU17, S. 22]. Die Fertigungshistorie beschreibt die charakteristische Veränderung von Bauteilmerkmalen durch einen einzelnen Fertigungsschritt und somit von der Geometrie, Oberfläche und Randzone eines Bauteils. Aus der Fertigungshistorie resultiert somit eine Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangszustand nachgelagerter, verketteter Fertigungsschritte. [KLOC08, S. 6] Die Inkompatibilität in der Fertigungsfolge resultiert in einer unzureichenden Prozessbeherrschung bzw. hohen Ausschussraten und somit in einer **instabilen Qualitätsfähigkeit** [WINK07, S. 24]. **Qualitätsfähigkeit** beschreibt nach LANZA die Fähigkeit von Fertigungsmitteln die vorgegebenen Qualitätsmerkmale und Toleranzen einzuhalten [LANZ05, S. 6]. Neben unvorhergesehenen Wirkzusammenhängen zwischen Produkt und Fertigung und instabilen Qualitätsfähigkeiten resultieren unvorhergesehene Frühausfälle einzelner Fertigungsmittel sowie präventive Verbesserungsmaßnahmen zu **Verfügbarkeitsverlusten** im Serienanlauf und somit zu einer zeitlichen Verschiebung [LANZ05, S. 21 f.]. Verfügbarkeitsverluste sind häufig auf unzureichende Mitarbeiterqualifikationen, fehlendes Prozesswissen [WIEN02] und unzureichende Fertigungs-/Handhabungsmittelfähigkeiten zurückzuführen. Bedingt durch den gesteigerten Aufwand zur Behebung der Ausfälle sowie dem Zeitverlust aufgrund von Verbesserungsmaßnahmen werden Zeit- und Kostenziele verfehlt [LANZ05, S. 21 f.].

Unvorhergesehene Wirkzusammenhänge zwischen Produkt und Fertigung, instabile Qualitätsfähigkeiten und Verfügbarkeitsverluste resultieren in einem **instabilen Anlaufverhalten** von Fertigungsfolgen und somit in einer **schwankenden und planabweichenden Ausbringungsmenge**, weshalb **vorgegebene Zeit-, Kosten- und Qualitätsziele nicht erreicht** werden und ein **wirtschaftlicher Schaden** entsteht.

Neben den Instabilitäten der Fertigungsfolge resultieren zahlreiche Änderungen sowohl am Produkt als auch am Prozess sowie Produkt- und Prozessfehler während des Serienanlaufs (nach dem Design Freeze) in kosten- und zeitintensiven Änderungsmaßnahmen, im Folgenden als **Restentwicklungsumfänge** bezeichnet [BASS18, S. 2]. Die Restentwicklungsumfänge lassen sich auf nicht erkannte Probleme in den dem Serienanlauf vorgelagerten Phasen [KUHN02, S. 24] und [PÖSC21, S. 7], eine unzureichende Kommunikation betroffener Unternehmensbereiche (Informations- und Wissensdefizite/Schnittstellenproblematik) [MONE11, S. 193 ff.] sowie eine unzureichende Produkt- und Prozessreife zum Start of Production (SOP) zurückführen [GERS98, S. 133] und [TÜCK10, S. 35]. Untersuchungen zeigen, dass ca. 40 % der Änderungen in der Nullserie (Probetrieb) [GERS98, S. 132] durch den Einsatz von Serienwerkzeugen auftreten [HERR09, S. 456]. Die hohe Relevanz der Problematik wird in der wissenschaftlichen Literatur durch die „Rule of ten“ [JARR11, S. 110] beschrieben, nach der die Kosten einer Änderung um den Faktor zehn mit jeder Lebenszyklusphase ansteigen, in der sie später entdeckt werden [REIN96, S. 49]. Der Großteil der Fehlerentstehung als Auslöser für Änderungen sind auf die Konstruktions- und Entwicklungsphase zurückzuführen. Im Gegensatz zur Fehlerentstehung erfolgt die Fehlerentdeckung und -behebung größtenteils in der Inbetriebnahme der Fertigung sowie im Serienanlauf, wodurch Kosten- und Zeitziele verfehlt werden. [PÖSC21, S. 6 f.]

**Restentwicklungsumfänge** im Serienanlauf führen zu zeit- und kostenintensiven **Änderungsmaßnahmen** und somit zu einer **Verfehlung der Anlaufziele**.

Serienanläufe werden in der Literatur und industriellen Praxis oftmals als turbulent bezeichnet [TÜCK10, S. 40 ff.]. Nach CHAKRAVARTHY wird Turbulenz als das simultane Auftreten und Zusammenspiel von Komplexität und Dynamik bezeichnet [CHAK97, S. 69]. Empirischen Studien zu Folge sind Komplexität und Dynamik ursächlich für das Auftreten von Unsicherheiten im Entscheidungsprozess [TÜCK10, S. 43]. Nach STEINHÄÜßER sind bspw. Unsicherheiten aufgrund von Defiziten in der Informationserfassung und -verfügbarkeit (mangelnde Transparenz) Auslöser für ein fehlerhaftes Reifegradcontrolling im Serienanlauf [STE18, S. 1 f.]. Eine unsichere Informationsgrundlage resultiert in einer hohen Prognoseunsicherheit und somit in ungenauen Plan-/Zielvorgaben im Serienanlauf, wodurch Anlaufziele verfehlt werden [WILD21, S. 45]. Darüber hinaus sind Unsicherheiten im Planungsprozess ursächlich für das Auftreten von Restentwicklungsumfängen im Serienanlauf.

**Unsichere Planungsinformationen** im Serienanlauf resultieren zum einen in **Prognoseunsicherheiten** und somit in einer **ungenauen/fehlerhaften Planung (ungenau definierte Anlaufzielvorgaben)** zum anderen sind sie **ursächlich** für das Auftreten von **Restentwicklungsumfängen**, wodurch die **Anlaufziele verfehlt** werden.

Basierend auf den oben beschriebenen Herausforderungen lässt sich wirtschaftliche Problemstellung wie folgt subsumieren und die Relevanz der vorliegenden Arbeit ableiten:

#### Wirtschaftliche Problemstellung und Relevanz der vorliegenden Forschungsarbeit

Aktuell resultieren **Unsicherheiten** und eine mangelnde Beherrschbarkeit von **Instabilitäten** der Fertigung sowie **Restentwicklungsumfängen** im Serienanlauf in einer Verfehlung definierter Anlaufziele und somit in einem **wirtschaftlichen Schaden** für produzierende Unternehmen.

## 4 Stand der Forschung

### *State of Research*

Aufbauend auf der terminologisch-deskriptiven Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Herausforderungen sowie der Abgrenzung des Untersuchungsbereichs im vorangegangenen Kapitel erfolgt in Kapitel 4 die empirisch-induktive Analyse problemrelevanter Theorien und Methoden. Hierzu werden im Folgenden relevante wissenschaftliche Arbeiten zum Serienanlauf vorgestellt und im Hinblick auf die Anwendbarkeit zur Lösung des definierten Handlungsbedarfs sowie der wirtschaftlichen Problemstellung analysiert (Abschnitt 4.1). Darüber hinaus erfolgt die Analyse relevanter wissenschaftlicher Ansätze agiler Entwicklungsprozesse, um das Konzept des agilen Serienanlaufs herzuleiten (Abschnitt 4.2).

Die wissenschaftlichen Arbeiten werden hinsichtlich des zugrundeliegenden Bezugsrahmens analysiert, ob eine **methodisch integrative Betrachtung** von Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Serienanlauf möglich ist (K1). Die Betrachtungsebene stellt entsprechend der Definition des Untersuchungsbereichs (Kapitel 3) die **Gestaltung von Fertigungsfolgen** basierend auf sog. **Fertigungsfeatures** dar (K2). Insbesondere wird analysiert, inwieweit bestehende Ansätze eine gezielte und systematische Identifikation und Modellierung von **Instabilitäten der Fertigungsfolge** sowie potenzieller **Restentwicklungsumfänge** (K3) im Serienanlauf ermöglichen. Darüber hinaus wird geprüft, ob bestehende Forschungsansätze Anwendende der Methodik befähigen, **Produkt- und Technologieunsicherheiten** im Entwicklungsprozess bzw. im Serienanlauf zu identifizieren (K4) und durch dessen Modellierung **Prognoseunsicherheiten** bei der Simulation von **Anlaufkurven** (K5) und **Anlaufkosten in Form von Fertigungskosten** (K6) zu berücksichtigen.

### 4.1 Ansätze zur Gestaltung von Fertigungsfolgen im Serienanlauf

#### *Approaches Design of Manufacturing Sequences in Ramp-Up Production*

LAICK (2003): „Hochlaufmanagement – Sicherer Produktionshochlauf durch zielorientierte Gestaltung und Lenkung des Produktionssystemsystems“

Ziel der Arbeit von LAICK ist die Steigerung der Effizienz von Produktionshochläufen durch die zielorientierte Gestaltung und Lenkung des Produktionssystemsystems. Hierfür entwickelte LAICK drei aufeinander aufbauende Modelle. [LAIC03, S. 36 ff.] Das Referenzmodell definiert die relevantesten Objekte und Referenzprozessmodule sowie deren Zusammenhänge im Produktionshochlauf. Hierfür wird das Produktionssystem in Sub- und Teilprozesssysteme modularisiert [LAIC03, S. 42 ff.]. Darauf aufbauend erfolgt im Anwendungsmodell die Beschreibung der Aktivitäten zur Konkretisierung der Gestaltung, Zielbildung und Lenkung von Prozessen. Die Zielwerte werden in einem Prozesskennwertsystem mit definierten Eingriffsgrenzen dargestellt. Anschließend werden die Prozesswerte durch Lenkung des Produktionssystemsystems schrittweise den Zielwerten angeglichen. Dies ermöglicht eine frühzeitige Lokalisierung von Störungen

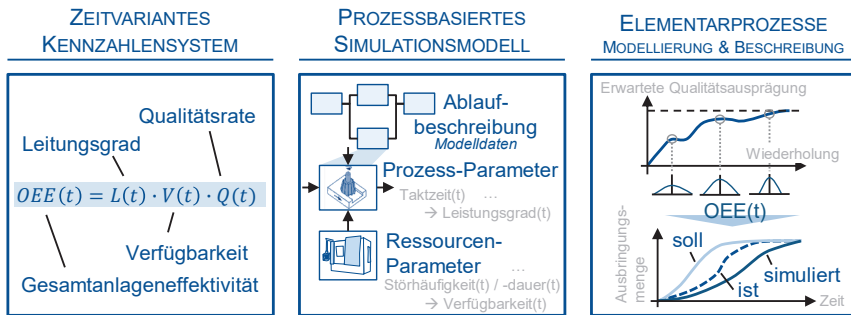
sowie die Einleitung von Maßnahmen, um diese zu beseitigen. Die Hochlaufphase gilt als beendet, wenn die Prozesse die geplanten Zielwerte erreicht haben und eine sichere Serienfertigung möglich ist. [LAIC03, S. 53 ff.] Mit Hilfe des Umsetzungsmodells erfolgt die abschließende Übertragung des Anwendungsmodells in produzierende Unternehmen [LAIC03, S. 87 ff.].

Die Arbeit von LAICK stellt einen Ansatz zur Erreichung eines sicheren Serienanlaufs durch eine gezielte Gestaltung und Lenkung der Fertigungsprozesse dar. Insbesondere die Prozessmodularisierung, der darauf bezogene Abgleich von Ist- und Zielwerten sowie die Lenkungsschritte zur schrittweisen Zielerreichung bieten Potenzial, den Anlauf zu stabilisieren. Restentwicklungsumfänge (K3) sowie Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4) sind kein Bestandteil der Arbeit. Darüber hinaus ist die Prognose von Anlaufkurven (K5) und -kosten (K6) nicht möglich. In der Arbeit werden zwar (Fertigungs-)Prozesse betrachtet eine Konkretisierung auf Fertigungsfeatureebene (K2) erfolgt nicht. Die Produktentwicklungsphase ist kein integrativer Bestandteil der Arbeit (K1).

*LANZA (2005): „Simulationsbasierte Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen“*

LANZA stellt in ihrer Dissertation einen Ansatz zur simulationsbasierten Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Fertigungsprozessen vor. Ziel der Arbeit war es, ein Lösungskonzept zu erarbeiten, welches produzierenden Unternehmen einen beherrschten Übergang des Produktionssystems vom instabilen (Entwicklungsphase) in den stabilen Serienbetriebszustand und somit einen verkürzten und beschleunigten Serienanlauf ermöglicht. Zentraler Bestandteil des Lösungskonzepts stellt eine anlaufbegleitende Bewertungsmethode bezüglich vorgegebener Mengen- und Qualitätsziele dar. [LANZ05, S. 5 ff.] Mit Hilfe des ablauforganisatorischen Simulationsmodells wird durch Antizipation erwarteter Qualitätsfähigkeiten der instabilen Fertigungsprozesse (Elementarprozesse) der variable Ressourcenverbrauch produktionsanlaufbegleitend prognostiziert. [LANZ05, S. 58 f.] Die Entwicklung des Simulationsmodells erfolgt in drei Schritten, welche in Abbildung 4.1 dargestellt sind [LANZ05, S. 57]. Im ersten Schritt erfolgt die Entwicklung eines zeitvarianten Kennzahlensystems. Grundlage bildet das oftmals in der Praxis angewandte Total Productive Maintenance (TPM) zur Verbesserung der Gesamtanlageneffektivität. Basierend auf dem TPM Konzept greift LANZA auf die Berechnung der Overall Equipment Effectiveness (OEE) zurück, um die Anlaufziele Qualitäts- und Mengenleistungsfähigkeit zu bewerten. Um die Anwendbarkeit der OEE im instabilen Serienanlauf zu ermöglichen, erweitert LANZA den Ansatz um die Integration zeitvarianter Leistungskenngrößen, wie Stillstandzeiten, Stückzahlen (Taktzeiten) sowie bearbeiteter Teile und Defekt-/Gutteile. Durch die Integration zeitvarianter Leitungskenngrößen wird eine zeitvariante Bewertung der Gesamtanlageneffektivität (OEE) durch die dadurch ebenfalls zeitvarianten Einzelkennwerte Leistungsgrad, Qualitätsrate und Verfügbarkeit ermöglicht. [LANZ05, S. 61 ff.] Im nachfolgenden Schritt erfolgt die Erweiterung der Funktionalität herkömmlicher Ablaufsimulationen um die Funktionen zur Integration von

Qualitätsaspekten (Bewertung instabiler Qualitätsfähigkeiten) sowie zeitvarianter Parameter. Hierzu wird eine Prozess-Struktur bzw. Ablauf-Struktur entwickelt, welche sowohl statische exogen vorgegebene Systemdaten als auch zeitvariable und dynamische Modelldaten parametrisch erfasst. Die Modelldaten werden in Prozess- und Ressourcen-Parameter unterteilt. [LANZ05, S. 70 ff.]



**Abbildung 4.1** Vorgehensweise zur Entwicklung des Simulationsmodells zur Bewertung instabiler Produktionssysteme im Produktionshochlauf nach LANZA [LANZ05]

*Method for the Development of the Simulation Model for the Evaluation of Instable Manufacturing Systems in the Ramp-Up Production According to LANZA [LANZ05]*

Abschließend erfolgt die Modellierung und Beschreibung des Systemverhaltens zur Ableitung der Anlaufkurve. Hierzu werden zunächst die stückzahlentscheidenden Teilprozesse eines Produktionssystems identifiziert und in Elementarprozesse (elementare Prozesse/Prozessbausteine eines Produktionssystems) dekomponiert. Anschließend erfolgt für jeden Elementarprozess die Bestimmung qualitäts-determinierender Einflussfaktoren (Qualitätstreiber). Durch die Modellierung von Qualitätsfähigkeitskurven (QFK) (zeitabhängige Entwicklung der Qualitätsfähigkeit eines Elementarprozesses modelliert über Verteilfunktionen) erfolgt anschließend die Bestimmung der instabilen Qualitätsfähigkeit kritischer Qualitätsmerkmale. Durch Überlagerung der QFK der einzelnen Qualitätsmerkmale eines Elementarprozesses wird die QFK des Elementarprozesses bestimmt. Abschließend wird basierend auf den Qualitätsfähigkeitskurven der Elementarprozesse die zeitvariante Qualitätsrate simuliert. Aufbauend auf der Simulation der zeitvarianten Einzelkennwerte der OEE wird die Anlaufkurve der Elementarprozesse bestimmt. Durch Überlagerung der Anlaufkurven der Einzelprozesse wird die Anlaufkurve des Gesamtprozesses abgeleitet.

Die Dissertation von LANZA bildet eine **Grundlage für die Entwicklung des Simulationsmodells der vorliegenden Arbeit**. LANZA fokussiert sich auf die anlaufbegleitende Simulation von Fertigungsprozessen (K2). Eine integrative Betrachtung von Produktentwicklung und Fertigungsplanung im Serienanlauf erfolgt nicht (K1). Die Qualitätsfähigkeitskurven sowie die Analysemöglichkeit von Maßnahmenauswirkungen stellen einen ersten Ansatz dar, Instabilitäten und Änderungsauswirkungen im Serienanlauf zu berücksichtigen. Die Prognose bzw. Modellierung von

Restentwicklungsumfängen ist kein Bestandteil der Arbeit (K3). LANZA thematisiert die Relevanz von Unsicherheiten im Serienanlauf (K4), eine konkrete Darstellung der Modellierungsmöglichkeit und Integration in die Simulation der Anlaufkurve erfolgt nicht (K5). Zudem ist keine Berechnung der Anlaufkosten möglich (K6).

*DYCKHOFF et al. (2012): „Ansätze einer Produktionstheorie des Serienanlaufs“*

In der Arbeit von DYCKHOFF et al. wurde ein dynamisches und produktionstheoretisches Modell für den Serienanlauf entwickelt. Dieses beruht auf der dynamischen Produktionstheorie nach LUHMER [LUHM99] und greift zentrale Aspekte des Ansatzes von TERWIESCH und BOHN [TERW01] auf. [DYCK12, S. 1438] Das Ziel der Arbeit ist eine Beschreibung des Anlaufverhaltens und somit der Anlaufkurve unter Einbezug von Lerneffekten des Personals durch Verbesserungsmaßnahmen induziertem technischen Fortschritt an den Maschinen, anfänglich mangelnder Beherrschung der Produktionsqualität sowie der Anlaufpolitik von Entscheidenden für die Wahl dynamischer Prozessstellgrößen [DYCK12, S. 1428]. Das Modell folgt der Modellvorstellung eines Regelkreises, wobei das Produktionsmanagement die Aufgabe des Reglers übernimmt. Über Stellgrößen wird im Rahmen dieser Modellvorstellung das Anlaufverhalten beeinflusst. [DYCK12, S. 1432] Dazu führen DYCKHOFF et al. die Produktionsintensität und die Dauer technischer Verbesserungsmaßnahmen als Stellgrößen ein. Anschließend werden Wirkzusammenhänge zur Modellierung des Anlaufverhaltens (z.B. Lernstand des Personals, Produktionsmenge, Taktzeit) mathematisch abgeleitet. [DYCK12, S. 1439 ff.]

Die Arbeit von DYCKHOFF et al. stellt eine wesentliche Grundlage zur Integration von Lerneffekten und dynamischer Zusammenhänge in der Modellierung von Serienanläufen dar. Eine methodisch integrative Betrachtung von Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Serienanlauf erfolgt nicht (K1). Die Modellierung mit Hilfe eines Regelkreises ermöglicht die Beeinflussung des Anlaufverhaltens. Fertigungstechnologien werden zwar durch den induzierten technischen Fortschritt berücksichtigt, es erfolgt keine detaillierte Beschreibung sowie keine Betrachtung auf Fertigungsfeatureebene (K2). Restentwicklungsumfänge (K3) sowie Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4) sind kein Bestandteil der Arbeit, wodurch keine Prognoseunsicherheiten bei der Generierung von Anlaufkurven berücksichtigt werden (K5). Die Ermittlung von Anlaufkosten (K6) ist ebenfalls kein Bestandteil der Arbeit.

*KNÜPPEL et al. (2012): „Reifegradbasierte Bewertung der Anlauffähigkeit“*

KNÜPPEL et al. entwickelten eine reifegradbasierte Methodik zur Bewertung der situationsspezifischen Fähigkeit eines Produktionssystems, von seinem aktuell ungenügenden Zustand in einen zukünftig erwünschten Zielzustand zu wechseln (Anlauffähigkeit). Ziel war es, KMU bei der proaktiven und reaktiven Bewertung der Anlauffähigkeit von Produktionssystemen sowie der Ableitung wirtschaftlicher Lösungen zu unterstützen. Hierzu wurden die Ist-Anlauffähigkeiten anlaufrelevanter Gestaltungselemente auf Basis zuvor definierter Zielzustände der Gestaltungsfelder Technologie, Logistik, Organisation und Personal identifiziert und in einem Reifegradmodell basierend

auf Erfüllungsgraden abgebildet. Anschließend erfolgt die Gewichtung der Gestaltungselemente. Abschließend wird das Ergebnis der Gewichtung mit der Ist-Anlauffähigkeit zusammengeführt sowie relevante Handlungsfelder identifiziert und mit Hilfe der Portfoliotechnik visualisiert bzw. eingeordnet. [KNÜP12]

Die Arbeit von KNÜPPEL et al. unterstützt KMU bei der situationsspezifischen Identifikation von Handlungsfeldern zur Steigerung der Anlauffähigkeit. Mit Hilfe der Arbeit ist es möglich, Gestaltungselemente (Bereiche) zu identifizieren, welche zum einen eine hohe gewichtete Relevanz im Hinblick auf Verbesserungsmaßnahmen zum anderen eine geringe Ist-Anlauffähigkeit aufweisen. Die Methodik stellte einen ersten Ansatz zur Identifikation potenzieller Restentwicklungsumfänge auf hohem Abstraktionslevel dar. Detaillierte Betrachtungen der Auswirkungen im Hinblick auf Instabilitäten (K3) bzw. Fertigungsfolgen (K2) erfolgen nicht. Zudem erfolgt keine Berücksichtigung von Unsicherheiten (K4). Eine Prognose von Anlaufkurve (K5) und -kosten (K6) ist ebenfalls nicht möglich.

#### *GRK 1491: ANLAUFMANAGEMENT – ENTWICKLUNG VON ENTSCHEIDUNGSMODELLEN IM PRODUKTIONSANLAUF*

Ziel des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Graduiertenkollegs Anlaufmanagement (GRK 1491) war es, durch einen interdisziplinären Zusammenschluss mehrerer Lehrstühle der RWTH AACHEN UNIVERSITY die Komplexität von Serienanläufen und somit gezielt Instabilitäten im Serienanlauf zu reduzieren. Dabei wurde Komplexität als Ursache von Instabilitäten betrachtet und der Serienanlauf als multidimensionales Entscheidungsproblem verstanden. Neben Beschreibungs- und Erklärungsmodellen wurden konkrete Gestaltungs- und Entscheidungsmodelle sowie das Aachener Modell als Abbild des interdisziplinären Umfelds im Serienanlauf entwickelt. [SCHM10] Das Aachener Modell setzt die sieben Kernfunktionen und das Systemverhalten des Anlaufmanagements in Beziehung zur Entscheidungsgrundlage, -fähigkeit und dem Zielsystem als Grundlage zur Erfolgsabsicherung des Anlaufmanagements durch systematische Verbesserung von Einzelentscheidungen. [QUIC10] Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Graduiertenkolleg basierend auf den für die vorliegende Arbeit relevante Arbeiten von BOROWSKI [BORO11], NAU [NAU12], RENNER [RENN12], GARTZEN [GART12], I. BASSE [BASS15], FREY [FREY16], STAUDER [STAU17], und F. BASSE [BASS18] (Teils in Abschnitt 4.2) vorgestellt und im Kontext der vorliegenden Arbeit diskutiert.

#### *NAU (2012): „Anlauforientierte Technologieplanung zur Auswahl von Fertigungstechnologien“*

NAU entwickelte im Rahmen der anlauforientierten Technologieplanung eine Methodik zur Auswahl von Fertigungstechnologien. Ziel der Arbeit ist die Aufwandsreduzierung der Anlaufplanung durch frühzeitige systematische Entscheidungsunterstützung von Anwendenden bei der Auswahl und Einführung neuer Technologien in Produktionsanläufen [NAU12, S. 37]. Das von NAU entwickelte Vorgehen umfasst drei Schritte, siehe Abbildung 4.2. Im ersten Schritt erfolgt die Aufwandsbestimmung der Anlaufsituation

sowie die Auswahl einer geeigneten Technologieplanungsmethode. Hierzu werden mittels einer Szenariofeldanalyse Einflussfaktoren in den vier Bereichen Produktneuheitsgrad, Fertigungssystem, Fertigungstechnologieplanung und Produktionsanlauf identifiziert. Anschließend werden mit Hilfe der Relevanzanalyse aus den Einflussfaktoren relevante Schlüsselfaktoren ermittelt. [NAU12, S. 51 ff.] Im nachfolgenden Schritt erfolgt die Bewertung potenzieller Risiken sowie des Potenzials der einzuführenden Fertigungstechnologien sowie deren Optimierung anhand geeigneter Maßnahmen. Mit Hilfe der Risiko-Potenzial-Matrix erfolgt die Vorauswahl geeigneter alternativer Fertigungstechnologien. [NAU12, S. 71 ff.]



**Abbildung 4.2** Methodik zur Auswahl von Fertigungstechnologien im Rahmen der anlauforientierten Technologieplanung nach NAU [NAU12]

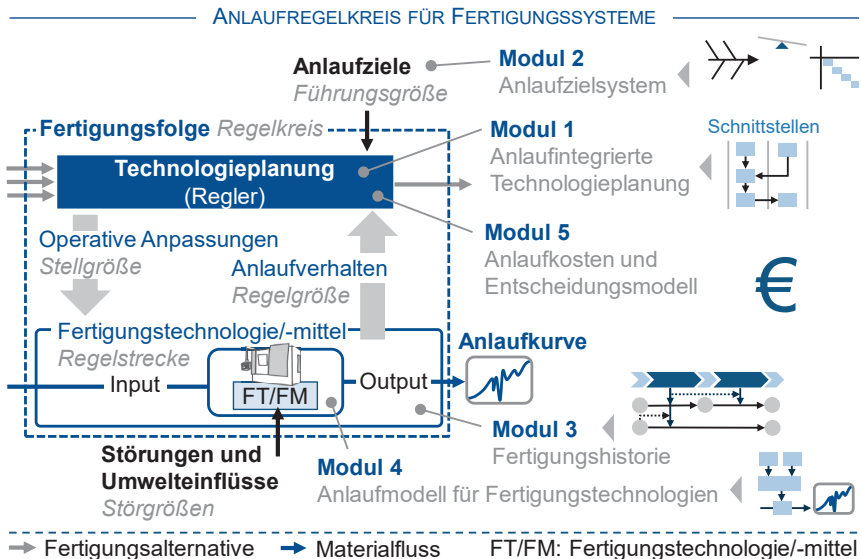
*Methodology for the Selection of Manufacturing Technologies within the Framework of Ramp-Up-Production-Oriented Technology Planning According to NAU [NAU12]*

Im abschließenden Schritt erfolgt die Bewertung der vorausgewählten Fertigungstechnologiealternativen hinsichtlich deren Hochlaufverhalten. Hierzu werden basierend auf einem Regelkreismodell Einflussgrößen bzw. Störgrößen sowie Stellgrößen für den Produktionshochlauf identifiziert. Diese werden über empirische Daten aus Analogieversuchen bewertet. [NAU12, S. 100 ff.] Anschließend wird das Hochlaufverhalten verschiedener Fertigungstechnologien in Form von Anlaufkurven über eine logistische Funktion modelliert [NAU12, S. 116 ff.].

Die von NAU entwickelte Methodik stellt einen wissenschaftlichen Ansatz dar, welcher Anwendende in der Serienanlaufplanung bei der Auswahl von Fertigungstechnologien unterstützt. Durch die zielgerichtete Auswahl von Fertigungstechnologien (K2) wird ein optimiertes Anlaufverhalten ermöglicht. Eine methodisch integrative Betrachtung von Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Serienanlauf erfolgt nicht (K1). Die Modellierung von Instabilitäten bzw. Restentwicklungsumfängen (K3) sowie Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4) ist kein Bestandteil der Arbeit. Somit erfolgt keine Berücksichtigung von Prognoseunsicherheiten bei der Modellierung der Anlaufkurven (K5). Die Berechnung der Anlaufkosten ist mit der Arbeit von NAU nicht möglich (K6).

STAUDER (2017): „Anlauforientierte Gestaltung von Fertigungssystemen“

Im Rahmen des von der DFG geförderten Graduiertenkollegs Anlaufmanagement 1491 entwickelte STAUDER in seiner Dissertation eine Methodik zur anlauforientierten Gestaltung von Fertigungssystemen. Ziel der Arbeit ist die Bewertung und Optimierung von Fertigungssystemen bei Änderungsanläufen unter Berücksichtigung der Fertigungshistorie. [STAU17, S. 36] Zur Erreichung der Zielsetzung gliedert STAUDER seine Arbeit in fünf Module, siehe Abbildung 4.3.



**Abbildung 4.3** Grobkonzept des Anlaufregelkreises für Fertigungssysteme nach STAUDER [STAU17]

*Rough Concept of the Ramp-Up Control Loop for Manufacturing Systems According to STAUDER [STAU17]*

Im ersten Modul erfolgt die Modellierung technologischer und organisatorischer Schnittstellen zur systematischen Identifizierung von Anlaufproblemen und Reduzierung von Zeitverlusten. Hierzu definiert STAUDER ein Rahmenkonzept für die anlaufintegrierte Technologieplanung. In diesem Zusammenhang werden technologische Schnittstellen über Primär- und Sekundärfeatures sowie über Übergangsgrößen definiert und modelliert. Organisatorische Schnittstellen werden über eine etablierte Aufbauorganisation identifiziert und in Anlehnung an die K3-Methodik modelliert. [STAU17, S. 47 ff.] Im zweiten Modul wird ein allgemeingültiges anlaufspezifisches Zielsystem hinsichtlich Termin-, Zeit- und Kostenzielen abgeleitet und eine Teilmethodik zur Gewichtung von Zielkriterien eines Zielsystems bezüglich einer vorliegenden Anlaufsituation entwickelt. [STAU17, S. 57 ff.] Im Zuge des dritten Moduls erfolgt die Modellierung der Fertigungshistorie von Änderungsanläufen, indem Primär- und

Sekundärfeatures der Bearbeitungsaufgabe sowie technologieübergreifende Wechselwirkungen zwischen Produkt und Fertigung innerhalb eines Fertigungssystems identifiziert werden und ein Vorgehensmodell zur Bestimmung von ungewollt beeinflussten Sekundärfeatures erarbeitet wird [STAU17, S. 68 ff.] Durch die Entwicklung des Erklärungsmodells ist die systematische Identifikation von Anlaufproblemen sowie von Gegenmaßnahmen möglich. Innerhalb des vierten Moduls wird ein Anlaufmodell zur Prognose der Ausbringungsmenge von Fertigungssystemen detailliert. Dabei werden neben dynamischen Einflussgrößen der Anlaufproduktion, wie Mitarbeitenden- und Fertigungsmittelfähigkeit, bestehende Unsicherheiten durch die Integration von Wahrscheinlichkeitstheorien, Fuzzy-Logik sowie der Monte Carlo Simulation bei der Modellierung berücksichtigt. [STAU17, S. 84 ff.] Grundlage der Arbeit von STAUDER ist der Anlaufregelkreis für Fertigungssysteme. Die Regelgröße stellt dabei das Anlaufverhalten in Form der Ausbringungsmenge von Fertigungstechnologien dar. Von außen wird das Anlaufmodell von Stör- und Stellgrößen beeinflusst, um die Dynamik der Anlaufproduktion zu modellieren. Haupteinflussgrößen stellen Fertigungsunterbrechungen, Planungsunsicherheiten und Qualitätsschwankungen dar, deren Wirkzusammenhänge mit Hilfe der Qualitätsrate abgebildet werden. Durch die grafische Visualisierung der Ausbringungsmenge über der Produktionszeit wird die Anlaufkurve prognostiziert. [STAU17, S. 84 ff.] Basierend auf der Maschinenstundensatzrechnung erfolgte im fünften Modul die Entwicklung des Anlaufkostenmodells zur wirtschaftlichen Bewertung von Fertigungssystemen [STAU17, S. 114 ff.].

**Die Arbeit von STAUDER stellt eine wesentliche Grundlage der vorliegenden Arbeit dar.** Mit Hilfe der Arbeit ist es erstmals möglich, fertigungstechnologische Auswirkungen von Instabilitäten des Fertigungssystems bei der Gestaltung von Fertigungssystem im Serienanlauf auf Basis von Fertigungsfeatures zu Modellieren (K2 und K3). Eine Betrachtung von Restentwicklungsumfängen ist kein Bestandteil der Arbeit (K3). STAUDER thematisiert die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Unsicherheiten. Eine Berücksichtigung von Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4) sowie die Modellierung von Prognoseunsicherheiten (K5 und K6) erfolgt unzureichend. Eine integrative Betrachtung von Produkt- und Technologieplanung im Serienanlauf ist mit der Arbeit von STAUDER nicht möglich (K1). **Die Adaption und Weiterentwicklung des Ansatzes von STAUDER bietet somit Potenzial zur Lösung der wirtschaftlichen Herausforderung.**

*KUKULIES et al. (2017): „Stabilizing production ramp-up by modeling uncertainty for product design verification using Dempster-Shafer Theory“*

KUKULIES et al. entwickelten einen Ansatz zur unsicherheitsbehafteten Verifikation des Produktdesigns im Serienanlauf mit dem Ziel, die Anlaufphase durch Modellierung von Produktunsicherheiten zu stabilisieren. Hierzu werden Entscheidungskriterien für die Unsicherheitsmodellierung abgeleitet. Anschließend werden über eine Sensitivitätsanalyse Informationsquellen mit dem größten Anteil am Unsicherheitswert eines Produktmerkmals ermittelt und basierend darauf Entscheidungen zur Unsicherheitsreduktion getroffen. [KUKU17]

Der Ansatz von KUKULIES et al. verdeutlicht das Potenzial einer evidenztheoretischen Modellierung von Unsicherheiten zur Selektion funktionsrelevanter Produktmerkmale in der Designverifikationsphase, um die Anlaufphase zu stabilisieren. KUKULIES et al. beschränken sich auf die Modellierung von Produktunsicherheiten. Fertigungstechnologische Aspekte werden nicht betrachtet (K2-K3). Eine methodisch integrative Betrachtung von Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Serienanlauf erfolgt nicht (K1). Weiterhin ist eine detaillierte Analyse von Restentwicklungsumfängen (K4) sowie die Ableitung von Anlaufkurven (K5) und -kosten (K6) nicht möglich.

*STEINHÄÜBER (2018): „Methode zur Reifebewertung und Priorisierung von Aufgaben in der Serienreifmachung komplexer Produkte“*

Ziel der Dissertation von STEINHÄÜBER war die Entwicklung einer Methodik zur Reifebewertung und Priorisierung von Aufgaben in der Serienreifmachung von Montageprozessen komplexer Produkte. Insbesondere die Quantifizierung von Unsicherheiten bei der Reifebewertung als Indikator für den Erfolg von Serienanläufen steht im Vordergrund der Betrachtung. [STEI18, S. 4] Hierfür entwickelt STEINHÄÜBER ein Modell zur Bewertung der Serienreife von Produkten. Dabei wird zwischen den drei Ebenen Gesamtprodukteebene, Komponentenebene und Ebene der Serienreifemerkmale unterschieden. Das Modell wird in fünf Teilmodelle untergliedert. Im ersten Teilmodell zur Produktstruktur wird die strukturelle Architektur des zu betrachtenden Produkts modelliert. [STEI18, S. 74 ff.] Anschließend erfolgt die Definition von Serienreifemerkmale, wie bspw. Komponente erzeugt, Kollisionsfreiheit gegeben oder Arbeitssicherheit gegeben. Zur Bewertung der Serienreifmachung wird zwischen den drei Zuständen nicht montierbar, montierbar jedoch nicht unter Serienbedingungen und montierbar differenziert. Eine Komponente erlangt die Serienreife, wenn alle zugeordneten Merkmale erfüllt sind. [STEI18, S. 77 ff.] Das dritte Teilmodell umfasst die zu erfüllenden Aufgaben zur Erzeugung der Serienreifemerkmale [STEI18, S. 85 ff.]. Teilmodell 4 umfasst die Modellierung der Produktkomponentenreife basierend auf analoger Anwendung der drei Zustände der Serienreifemerkmale. Mit Hilfe von Wahrscheinlichkeiten der Zustandserfüllung erfolgt der Einbezug von Unsicherheiten in die Reifegradbewertung. [STEI18, S. 88 ff.] Teilmodell 5 umfasst die Modellierung der Produktreife mit Hilfe der Bewertung montierbarer bzw. nicht montierbarer Komponenten sowie anfallender Nacharbeitskosten basierend auf Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen [STEI18, S. 90 ff.]. Um die Anwendbarkeit in der industriellen Praxis sicherzustellen entwickelte STEINHÄÜBER eine Methodik basierend auf den fünf Schritten Aufgaben operationalisieren, Daten erheben (Erfüllungswahrscheinlichkeiten nach Aufgabendurchführung), Serienreife berechnen, Zielzustand bestimmen und Aufgaben priorisieren [STEI18, S. 95 ff.]. Die Priorisierung von Aufgaben erfolgt auf Basis der bewerteten Produktreife sowie anfallender Nacharbeitskosten mit Hilfe der Deckungsbeitragsrechnung [STEI18, S. 110 ff.].

Die Dissertation von STEINHÄÜBER unterstützt produzierende Unternehmen methodisch bei der Bewertung der Serienreife von Montageprozessen. Unter Einbezug der Erfüllungswahrscheinlichkeiten von Serienreifemerkmale nach Aufgabendurchführung

bzw. deren Modellierung mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen wird die Berücksichtigung von Unsicherheiten innerhalb der Aufgabenerfüllung und Reifebewertung ermöglicht. Die Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven ist somit in einem ersten Ansatz über die Bewertung unsicherheitsbehafteter Reifegraderfüllungen möglich (K5). Durch die Berechnung des Deckungsbeitrags über die Betrachtung von Nacharbeitskosten bei der Montage, ist eine teilweise Berechnung von Anlaufkosten möglich (K6). Die Arbeit von STEINHÄUßER bezieht sich auf den Montagevorgang von Produkten, sodass Fertigungstechnologien kein Bestandteil der Arbeit sind (K2). Eine methodisch integrative Betrachtung von Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Serienanlauf erfolgt nicht (K1). Die Modellierung von Produkt- und Technologieunsicherheiten sowie Instabilitäten und Restentwicklungsumfänge ist ebenfalls kein Bestandteil der Arbeit (K3-K4). Somit ist eine direkte Übertragung der Modellansätze zur Produktreifebewertung und Anlaufkosten basierend auf der Deckungsbeitragsrechnung auf Fertigungskosten und Anlaufverhalten von Fertigungssystemen nicht möglich.

*PÖSCHL (2021): „Prozessplanungsmodell für eine Effizienzsteigerung von Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau“*

PÖSCHL entwickelte ein Modell zur Effizienzsteigerung von Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau. Ziel der Arbeit war es, ein an etablierte Ansätze zur Prozessmodellierung angelehntes Gestaltungsmodell zu entwickeln, mit Hilfe dessen Anwendende befähigt werden, Inbetriebnahmeprozesse anforderungsgerecht zu gestalten und somit einen Betrag zur Steigerung der Prozessproduktivität, Verkürzung von Durchlaufzeiten und Reduzierung von Prozessvarianzen zu leisten. [PÖSC21, S. 7 f.] Hierzu erfolgt zunächst die Definition eines Modellreferenzsystems basierend auf der Modellierung von Prozessfragmenten (inkl. der Modellgrößen Prozessschritt, Ressource und Zustände) heuristischer Prozessoptimierungsansätze, um Prozessänderungen generisch abzubilden [PÖSC21, S. 78 ff.]. Anschließend erfolgt die Implementierung einer Bewertungsmethode basierend auf Bayeschen Netzen zur kennzahlorientierten Ableitung der Effizienz von Änderungen. Durch Verknüpfung der Netzmodelle mit Fehleranalysen erfolgt die Integration von Risikofaktoren in die Modellierung und die Ableitung von Durchlaufzeitanteilen sowie der, auf Fehlerwahrscheinlichkeiten basierenden, Bewertung von Durchlaufzeiten. [PÖSC21, S. 82 ff.] Darüber hinaus entwickelte PÖSCHL ein generisches Modell zur Prozessplanung basierend auf Parameterkategorien und Lösungselementen mit Hilfe einer Lösungsmatrix (Standardprozess/Fehlerprozess und Risiko/Prozessdauer) [PÖSC21, S. 83 ff.]. Abschließend erfolgt die Instanzierung des Prozessplanungsmodells [PÖSC21, S. 89 ff.].

PÖSCHL ermöglicht mit seinem Ansatz, die Planung der Inbetriebnahme von Prozessen unter Berücksichtigung potenziell auftretender Fehler basierend auf einem qualitativen Vorgehen wahrscheinlichkeitbasiert durchzuführen. Instabilitäten und Restentwicklungsumfänge sowie die Modellierung von Unsicherheiten und Anlaufkurven bzw. -kosten sind kein Bestandteil der Arbeit (K2-K6). Die Produktentwicklung ist ebenfalls kein integrativer Bestandteil des Modells (K1).

MEISTER (2021): „Methodik zur adaptiven Planung digital unterstützter Problemlösungsprozesse im Produktionsanlauf“

Die von MEISTER entwickelte Methodik zur adaptiven Planung digital unterstützter Problemlösungsprozesse im Produktionsanlauf hatte das Ziel, die Problemlösungsfähigkeit von Anwendenden zu steigern und den Produktionsanlauf im Hinblick auf anlaufspezifische Zielgrößen zu optimieren, sodass ein stabiles Systemverhalten erreicht wird [MEIS21, S. 51]. In Analogie zum technischen Regelkreis entwickelte MEISTER mit Hilfe der System- und Modelltheorie, sowie der Kybernetik ein Gestaltungsmodell, das die wesentlichen Zusammenhänge der adaptiven Planung digital unterstützter Problemlösungsprozesse im Produktionsanlauf abbildet [MEIS21, S. 54 ff.]. Zur Ableitung von Rückschlüssen der Anforderungen auftretender Probleme an die Problemlösung erfolgte die Herleitung von Anforderungsprofilen mittels heuristischer Untersuchung sowie eine dreischrittige Typisierung identifizierter Kriterien. Der digital unterstützte Problemlösungsprozess stellt das Stellglied des Regelkreises dar. [MEIS21, S. 63 ff.] Basierend auf der Bewertung anlauf- und problemlösungsbezogener Leistungskennzahlen erfolgt die Ermittlung der Problemlösungsfähigkeit als Messglied des Regelkreises [MEIS21, S. 84 ff.]. Die Regelung erfolgt über die Regeldifferenz zwischen der Führungsgröße und der Problemlösungsfähigkeit indem innerhalb eines Fuzzy-Reglers vom ersten Subsystem die Regeldifferenz verarbeitet und Fähigkeitsgrade der Stellgrößen des Prozessablaufs zur Problemlösung in Form von Kennlinienfeldern abgeleitet werden. Mittels Design-Structure-Matrix werden anschließend im zweiten Subsystem (Inter-)Abhängigkeiten zwischen den Anwendungsvoraussetzungen sowie mittels Domain-Mapping-Matrix zwischen dem Prozessablauf und den Anwendungsvoraussetzungen untersucht. Durch die Verknüpfung der Subsysteme werden Kennlinienfelder abgeleitet, welche Aufschluss über die notwendigen Fähigkeitsgrade der Anwendungsvoraussetzungen zur Problemlösung abbilden. [MEIS21, S. 97 ff.] Abschließend wird das Gestaltungsmodell zu einer durchgehenden Methodik verknüpft [MEIS21, S. 106 ff.].

Die Arbeit von MEISTER stellt einen Ansatz bereit, potenzielle Probleme im Anlauf (Resultentwicklungsumfänge (K3)) zu identifizieren und deren Risiko zur Ableitung von Maßnahmen zu beurteilen. Das Risikoprofil bezieht das Produkt, den Prozess sowie die Wertschöpfungskette ein, wodurch die Methodik einem integrativen Verständnis folgt (K1). Eine detaillierte Betrachtung von Fertigungsprozessen auf Fertigungsfeaturebasis erfolgt durch den organisatorischen Charakter der Methodik (Fokussierung auf Aufbau- und Ablauforganisationen, Kommunikationsstrukturen, Verantwortlichkeiten und Unternehmensprozesse) nicht (K2). Zudem ist keine Prognose von Anlaufkure und -kosten möglich (K5-K6). Unsicherheiten werden ebenfalls nicht in die Modellierung einbezogen (K4).

## Weitere Forschungsansätze zur Gestaltung von Fertigungsfolgen im Serienanlauf

Basierend auf den analysierten und detailliert beschriebenen Forschungsansätzen zum Serienanlauf, welche einen hohen Bezug zur Forschungsthematik der vorliegenden Arbeit aufweisen, wurden weitere Forschungsansätze im Hinblick auf die Forschungsthematik analysiert.

RISSE entwickelte einen Gestaltungsrahmen für ein logistikorientiertes Anlaufmanagement. Grundlage sind Management- und Änderungssysteme, Konzepte des Supply Chain Managements sowie internetbasierte Kommunikations- und Informationssysteme. Durch die verstärkte Integration von Managementmethoden soll eine Verkürzung der Time-to-Market erreicht werden. [RISS03] WINKLER unterstützt durch seine Dissertation die proaktive Anlaufsteuerung durch die Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf. Kern der Dissertation bildet ein Regelkreis zur prognosebasierten Anlaufsteuerung. Fokussiert wurde die Entwicklung eines Vorgehens zur Quantifizierung von Wirkbeziehungen zwischen den Elementen des Anlaufregelkreises sowie eines Konzepts zur Analyse von Wirknetzen. [WINK07] Die entwickelte Methodik in der Forschungsarbeit von RÜSTIG forciert die ganzheitliche Analyse des Produktionsanlaufs aufbauend auf den Größen Produkt, Produktionsprozess und Produktionsstandort zur Prognose konkreter Produktionsanläufe, sowie der Bestimmung von Verbesserungspotentialen zur effizienteren Gestaltung des Produktionsanlaufs. Ziel ist es, die Ertragsverluste durch die Verlagerung des Produktionsanlaufs an einen internationalen Standort zu bestimmen. [RÜST07] BISCHOFF untersuchte die Schnittstellenfunktionalität des Anlaufmanagements zwischen Projekt und Serie in der Automobil- bzw. -zuliefererindustrie und gibt basierend auf einer durchgeführten Studie einen Überblick über Handlungsfelder des Anlaufmanagements sowie den Einfluss von Normen und Kundenanforderungen [BISC07]. NAGEL beschäftigte sich mit der Entwicklung eines Konzepts zur operativen, risikoorientierten Planungs- und Entscheidungsunterstützung im Produktionsanlauf mittelständischer Unternehmen [NAGE10]. TÜCKS entwickelte eine Methodik zum ganzheitlichen und systemorientierten Management von Produktionsanläufen, um die Anlaufleistung involvierter Interessenskreise und Disziplinen gezielt beeinflussen zu können [TÜCK10]. Ziel der kumulativen Dissertation von RENNER war die Konzeption und Entwicklung einer Methodik zur Formulierung eines anlaufspezifischen Performance Management Systems [RENN12]. GARTZEN entwickelte eine Methodik zur Stabilisierung des Serienanlaufs bei Montagesystemen unter Berücksichtigung der systemspezifischen Komplexität, mit dem Ziel die Anlauffizienz und -effektivität zu steigern [GART12]. Ziel der Dissertation von I. BASSE war es, unter Berücksichtigung von Qualitätsprüfungen, das Verhalten eines anlaufenden Montagesystems zu modellieren, um die Prüfstrategie optimiert zu gestalten [BASS15]. MAUE entwickelte eine Methodik zur aufwandsorientierte Gestaltung des Produktionsanlaufs am Beispiel der Automobilproduktion [MAUE16]. Ziel der Dissertation von STADLER war im Rahmen einer Studie ressourcenübergreifend Informationsflüsse zwischen Entwicklung und Produktion im Hinblick auf ein leistungsfähiges

Anlauf- und Änderungsmanagements zu analysieren und Optimierungspotenziale abzuleiten [STAD16]. ELSTNER fokussiert in seiner Arbeit die methodische Bewertung von Anlauf Risiken in der Produktentwicklung [ELST17]. SCHÖNHERR entwickelte in seiner Dissertation ein Konzept zur selbstlernenden Fehlervermeidung automatisierter Montagesysteme. Die Vorhersage und Vermeidung von Montagefehlern aufgrund von Veränderungen externer Prozesseinflussfaktoren bilden die Zielsetzung der Arbeit. [SCHÖ18] NGO entwickelte ein Gestaltungsmodell für qualitätsorientierte Produktionsanläufe [NGO21]. LUTZ ermöglicht mit seinem Ansatz die Integration virtueller Methoden in das Anlaufmanagement skalierbarer Fertigungssysteme [LUTZ22].

Die analysierten Forschungsarbeiten weisen aufgrund des organisatorischen bzw. montageorientierten Charakters einen geringen Fertigungsbezug auf (K2). Eine methodisch integrative Betrachtung von Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Serienanlauf erfolgt nicht (K1). Darüber hinaus werden Unsicherheiten (K4), Instabilitäten bzw. Restentwicklungsumfängen (K3) und Prognosemodellen (K5-K6) nicht berücksichtigt.

**Zwischenfazit:** Subsumierend lässt sich festhalten, dass die beschriebenen Ansätze zum Serienanlauf größtenteils einen organisatorischen Charakter aufweisen, sodass eine Berücksichtigung technologischer Aspekte (K2) im Serienanlauf kein Bestandteil der Arbeiten ist. LANZA, NAU und STAUDER berücksichtigen zwar fertigungstechnologische Aspekte bei der Gestaltung von Serienanläufen, die Problematik von Restentwicklungsumfängen (K3) in Serienanläufen sowie die Reduzierung von Instabilitäten wird unzureichend thematisiert. Ausgangsbasis der Arbeiten stellt der traditionell deterministische Entwicklungsprozess dar. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Produkthanforderungen in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses festgelegt werden und sich im späteren Verlauf nicht mehr ändern [BASS18]. Der gezielte Wissenstransfer zwischen Serienanlauf und Produktentwicklung ist kein Bestandteil der Arbeiten (K1). Ebenso ist die Analyse der Anlaufkosten der Serienanläufe mit Hilfe der vorgestellten Ansätze nur teilweise möglich. Die Arbeit von STAUDER ermöglicht die Berechnung anhand von Fertigungskosten. Prognoseunsicherheiten werden bei der Ermittlung von Anlaufkosten nicht berücksichtigt (K6). Insgesamt ist mit Hilfe der analysierten Forschungsansätze die gezielte und systematische Reduktion von Restentwicklungsumfängen und somit Instabilitäten im Serienanlauf sowie die Prognoseunsicherheitsbehafte Anlaufkurven (K5) unter Berücksichtigung von Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4) nicht möglich.

## 4.2 Ansätze zu agilen Entwicklungsprozessen

### *Approaches for Agile Development Processes*

Variierende Kundenanforderungen und somit resultierende Produktgestaltänderungen in späten Phasen des Entwicklungsprozesses stellen produzierende Unternehmen zunehmend vor neue Herausforderungen. Als Reaktion auf die variierenden Kundenforderungen hält das Konzept der agilen Entwicklung Einzug in den

Produktentwicklungsprozess physischer Produkte (vgl. Abschnitt 3.2.1). Durch gezielte Indikation von Fehlern und die iterative (sprintweise) Vorgehensweise zur Generierung von Wissen anhand von Prototypenversuchen werden Fehler im Produkt und Prozess identifiziert. Somit werden vorherrschende Unsicherheiten (K5) kontinuierlich reduziert und die Produkt- und Prozessreife gesteigert. Unter der Annahme, dass **Res-  
tentwicklungsumfänge im Serienanlauf eine ähnliche Problematik wie die variierenden Kundenanforderungen im Produktentwicklungsprozess darstellen**, liegt es nahe, wissenschaftliche Forschungsansätze der agilen Entwicklung hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die zugrundeliegende Problemstellung zu analysieren.

Die Adaption agiler Methoden aus der Softwareentwicklung als potenziellen Lösungsansatz zur Begegnung der Herausforderungen im Serienanlauf wurde bereits im GRK 1491 (siehe Abschnitt 4.1) erkannt. BOROWSKI entwickelte in ihrer Arbeit ein Vorgehensmodell zum Management von Produktionsanläufen mechatronischer Systeme durch die Adaption agiler Methoden, Werte und Prinzipien aus der Softwareentwicklung. Grundlage des Vorgehensmodells bildet die Scrum-Methode. BOROWSKI weist die Eignung und Übertragbarkeit ausgewählter Methoden, Werte und Prinzipien aus der agilen Softwareentwicklung zum Management von Serienanläufen mechatronischer Systeme in kleinen und mittelständischen Unternehmen nach. Weiterer Forschungsbedarf sieht BOROWSKI in der Übertragung agiler Methoden auf die Produktentwicklung und Fertigungs- bzw. Prozessplanung physischer Produkte. [BORO11] OVESEN behandelt in seiner Arbeit erstmals die Thematik der hochiterativen Produktentwicklung physischer Produkte. Anhand einer empirischen Studie wurden grundsätzliche Herausforderungen bei der Adaption agiler Methoden der Softwareentwicklung in den Entwicklungsprozess produzierender Unternehmen abgeleitet [OVES12]. SOMMER et al. griffen die Idee von COOPER bzgl. einer Kombination aus Stage-Gate-Modell und agiler Techniken bei komplexen Entwicklungsprojekten auf [COOP14] und entwickelten einen Ordnungsrahmen für einen hybriden Entwicklungsprozess physischer Produkte. Dabei wird das übergeordnete strategische Projektmanagement anhand von Phasen und Gates strukturiert, wohingegen die operative Durchführung der Entwicklungsaktivitäten innerhalb der einzelnen Phasen eine iterative Struktur aufweist. [SOMM15] SCHNEIDER entwickelte eine Planungssystematik zur agilen Prozessplanung innerhalb des Produktentwicklungsprozesses. Die Systematik weist eine hohe Analogie zwischen der agilen Softwareentwicklung und der Prozessplanung nach und stellt einen Ordnungsrahmen für die agile Prozessplanung vor. [SCHN15] FREY diskutiert in seiner Veröffentlichung die Übertragung Agiler Methoden wie der Scrum Methode aus der Softwareentwicklung auf den Serienanlauf zur Reduzierung von Komplexitäten und Instabilitäten im Serienanlauf. Es werden die Fragen aufgeworfen, welche Möglichkeiten sich aus den frühzeitig generierten Prototypen für die Gestaltung von Serienanläufen ergeben, welche Konsequenzen durch die gesteigerte Agilität für die Stabilität im Serienanlauf resultieren und welche Auswirkungen sich auf das Änderungsmanagement und den Design-Freeze ergeben. [FREY16] Eine Detaillierung und Beantwortung der Fragestellungen erfolgten jedoch nicht. In der Dissertation von KLEIN

wurde eine Methodik zum agilen Engineering im Maschinen- und Anlagenbau entwickelt. Die Methodik von KLEIN fokussiert die Fragestellung, in welchem Ausmaß ein Einsatz agiler Techniken anwendungsfallsspezifisch sinnvoll ist und welche Auswirkungen dies auf die Aufbau- und Ablauforganisation im Unternehmen hat [KLEI16]. GARTZEN et al. entwickelten ein Modell zur systematischen Planung der Prototypenfertigung als Grundlage für die gezielte Reduzierung von Markt-, Produkt- und Prozessunsicherheiten. Das entwickelte Modell dient der Priorisierung von Entwicklungsaktivitäten auf dessen Basis, der im entsprechenden Sprint zu fertigende Prototyp ausgewählt wird. [GART16] SCHUH et al. entwickelten ein, aus der agilen Softwareentwicklung adaptiertes, Modell für die physische Produktentwicklung in Form eines Ordnungsrahmens. Das entwickelte Modell besteht aus den vier übergeordneten Elementen Datenkonsistenz, Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung, hohe Reaktionsfähigkeit und Informationsgenerierung in Testumgebungen, die als Schlüsselfaktoren für eine erfolgreiche agile Entwicklung physischer Produkte bezeichnet werden. [SCHU16b] KANTELBERG stellt in seiner Dissertation eine Methodik zu Gestaltung der agilen Entwicklungsprozesse technischer Produkte vor. Ziel war es, Wirkmechanismen agiler Methoden der Softwareentwicklung zu analysieren und deren Übertragbarkeit auf technische Produkte zu erforschen. [KANT18] DIELS entwickelt eine Methodik zur Gestaltung und Auswahl agil zu entwickelnder Produktumfänge, um Anwendende der Methodik bei der systematischen Entscheidungsfindung zu unterstützen, welche Entwicklungsprojekte agil umzusetzen sind bzw. bei welchen eher auf klassisch plangetriebene Methoden zurückgegriffen werden sollte. [DIEL18] AYS entwickelte eine Methodik zur kontextbasierten Integration agiler und plangetriebener Entwicklungsprozesse und verfolgte das Ziel, die Prozesseffektivität und -effizienz von Produktentwicklung durch projektspezifische Ausrichtung langfristig zu steigern [AYS22]. FÖLLING entwickelt in seiner Arbeit ein Modell zur Komplexitätsbeherrschung durch hybride Montageplanung, indem klassisch, deterministische und agile Ansätze und Methoden in Abhängigkeit der vorliegenden Komplexitätssituation im Montageprozess zielgerichtet eingesetzt und kombiniert werden. [FÖLL22]

Die Forschungsarbeiten von OVESEN, SOMMER et al., SCHNEIDER, KLEIN, GARTZEN et al., SCHUH et al., KANTELBERG, DIELS, AYS und FÖLLING weisen einen überwiegend organisatorischen Charakter auf und beschäftigen sich mit der Entwicklung von Ordnungsrahmen und deskriptiven Modellen zur Strukturierung von Entwicklungs- und Montageprozessen. Eine methodisch integrative Betrachtung von Produktentwicklung und Serienanlauf erfolgt nur rudimentär (K1). Fertigungstechnologische Aspekte (K2) werden nicht betrachtet. Die Berücksichtigung von Instabilitäten sowie die Reduzierung von Restentwicklungsumfängen (K3) sind keine Bestandteile der Arbeiten. Es erfolgt keine Modellierung von Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4). Die Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven (K5) sowie die Bewertung der Anlaufkosten auf Basis von Fertigungskosten (K6) ist mit Hilfe der Ansätze nicht möglich. Die Relevanz von Prototypen sowie einer integrativen Produkt- und Prozessentwicklung werden von GARTEN et al. und SCHUH et al. aufgezeigt, aber nicht weiterverfolgt.

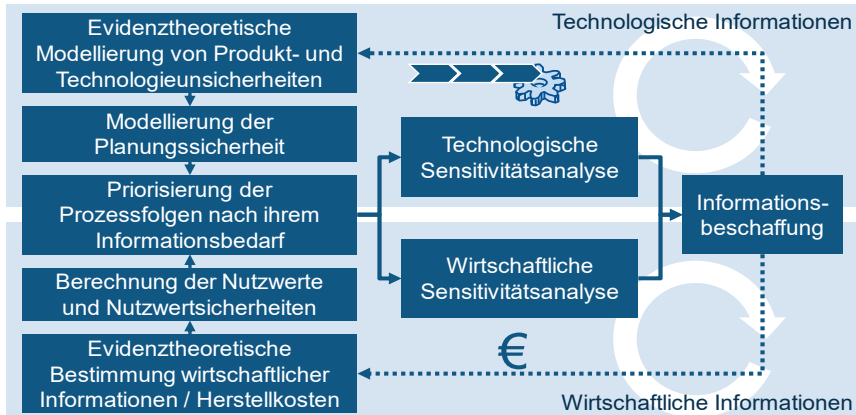
Die sprintweise, iterative Validierung und die zum Teil physische Fertigung von Prototypen stellen wesentliche Bestandteile agiler Entwicklungskonzepte dar [KAMP16]. Da Fertigungstechnologien erst im Serienanlauf zu einer Fertigungsfolge verkettet werden [BISC07, S. 20], ist erst ab diesem Zeitpunkt eine physische Validierung der Planung sowie komplexer Wirkzusammenhänge möglich. Die Forschungsansätze zeigen das Potenzial und die Relevanz agiler Produktentwicklungsprozesse auf. Durch die iterative Fertigung physischer Prototypen besteht das Potenzial darin, neben einer Steigerung der Effizienz von Entwicklungsprozessen Änderungsaufwände im Entwicklungsprozess systematisch und effizient zu reduzieren [BASS18]. Alle zuvor vorgestellten Forschungsansätze des agilen Produktentwicklungsprozesses vernachlässigen technologische Aspekte zur Berücksichtigung der operativen Technologieplanung im Produktentwicklungsprozess. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, beschäftigt sich die operative Technologieplanung mit der Gestaltung von Fertigungsfolgen zur Herstellung von physischen Produkten. Basierend auf diesem Defizit stellt REY in seiner Dissertation einen Ansatz zur Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen in der agilen Produktentwicklung vor. In diesem Ansatz wird das starre Vorgehen klassischer Technologieplanungsmethoden aufgehoben. In Anlehnung an die agile Softwareentwicklung wird ein sprintweises, zum Entwicklungsprozess parallel durchgeführtes Vorgehen zur Gestaltung von Fertigungssystemen sowie zur Identifikation von Stellhebeln zur systematischen Reduzierung von Unsicherheiten vorgestellt. [REY20]

*REY (2020): „Methodik zur hochiterativen Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen“*

REY entwickelte eine Methodik zur hochiterativen Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen und Abhängigkeiten von Produkt- und Technologieunsicherheiten. Ziel der Arbeit von REY war es, Anwendende der Methodik bei der systematischen Informationsbeschaffung durch die Modellierung von Produkt- und Technologieunsicherheiten sowie bei der Gestaltung und Auswahl von Fertigungsprozessfolgen in der agilen Produktentwicklung zu unterstützen. [REY20, S. 41] Die Methodik besteht aus den drei Hauptschritten Modellierung von unsicheren Bauteilinformationen, Generierung und Modellierung sowie der hochiterativen Bewertung unsicherer Fertigungsprozessfolgen. Die einzelnen Module der Hauptschritte werden abschließend in ein hochiteratives Gesamtkonzept zusammengeführt (Abbildung 4.4).

Im ersten Schritt, der Modellierung unsicherer Bauteilinformationen, erfolgt zunächst die Modellierung von Bauteilen durch Beschreibung der Bauteilstruktur und der Bauteilmerkmale. Hierzu wird das Bauteil in Fertigungsfeatures und Merkmale unterteilt und die einzelnen Merkmale im Informationsmodell durch Angabe von Wertebereichen in Form von Einzelinformationen beschrieben. Zu jeder Einzelinformation werden die Sicherheit der Information sowie die Vertrauenswürdigkeit der Informationsquelle angegeben. Anschließend erfolgt die Aggregation der Einzelinformationen. [REY20, S. 53 ff.] Hierzu greift REY auf die von den Mathematikern DEMSTER [DEMP67] und SHAFER [SHAF76] entwickelte Evidenztheorie, auch DEMPSTER-SHAFFER-Theorie genannt [RAKO07], zurück. [REY20, S. 53 ff.] Da die Evidenztheorie

von KUKULIES [KUKU17] und REY [REY20] erfolgreich zur Modellierung von Unsicherheiten eingesetzt wurde und einen potenziellen Lösungsansatz für die vorliegende Arbeit darstellt, wird im Folgenden detaillierter auf Adaption der Evidenztheorie in die Technologieplanung eingegangen.

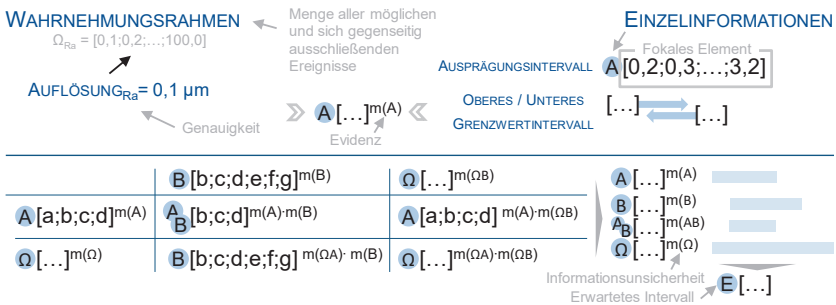


**Abbildung 4.4 Hochiteratives Konzept zur Gestaltung unsicherer Fertigungsprozessfolgen nach REY [REY20]**

*Highly Iterative Concept for the Design of Uncertain Manufacturing Process Sequences According to REY [REY20]*

Die **Evidenztheorie** ist eine Theorie des plausiblen Schließens [BEIE14, S. 465]. In Abgrenzung zur klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie, bei der der Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen eines Ereignisses immer eine entsprechende Gegenwahrscheinlichkeit zugeordnet ist, sodass die Summe der Wahrscheinlichkeiten eins ergibt [LAUX14b, S. 100 ff.], beschreibt die **Evidenz** im Allgemeinen eine unmittelbare Einsichtigkeit von Erkenntnissen und unbeweisbaren Aussagen, deren Korrektheit erst durch das Eintreffen, bzw. Nicht-Eintreffen festgestellt werden kann [BEIE14, S. 78]. Durch Kombination verschiedener Einzelinformationen unterschiedlicher Informationsquellen ist es möglich, eine Gesamtaussage unter Berücksichtigung der Glaubwürdigkeit jeder Informationsquelle zu treffen [AUER10]. Entgegen der Wahrscheinlichkeitstheorie ist es möglich, auch widersprüchliche Informationen [TRÖG18, S. 47 f.] verschiedener Informationsquellen unter Berücksichtigung des Konfliktausmaßes in die Modellierung einzubeziehen [SENT02, S. 12]. Liegen starke Konflikte zwischen den Einzelinformationen vor, so kommt es häufig zu kontraintuitiven Ergebnissen durch die Normierung der kombinierten Evidenzen bei der Aggregation [SENT02, S. 17]. Folglich ist die Kombinationsregel nach DEMPSTER in der wissenschaftlichen Literatur kritisiert [DEZE12]. Eine Weiterentwicklung der Kombinationsregel nach DEMPSTER stellt die Kombinationsregel nach YAGER dar [YAGE87], welche ebenfalls von REY erfolgreich in die agile Technologieplanung adaptiert wurde [REY20].

Um die Anwendbarkeit der Evidenztheorie zu ermöglichen, erfolgt zunächst die Definition des **Wahrnehmungsrahmens**  $\Omega$  [REY20, S. 61 ff.], welcher die Menge aller möglichen und sich gegenseitig ausschließenden Ereignisse beschreibt [BEIE14, S. 465], siehe Abbildung 4.5. Hierzu werden die bisher metrisch kontinuierlich skalierten Ausprägungen der Bauteilmerkmale durch Festlegung deren Auflösung diskretisiert [REY20, S. 61 ff.]. **Evidenz** wird nach REY als Maß an Glauben bzw. Unterstützung einer Einzelinformation bezeichnet. Dabei können Einzelinformationen sowohl als einzelne Elemente des Wahrnehmungsrahmens als auch in Form von Intervallen (mehrere Elemente des Wahrnehmungsrahmens) modelliert werden. Die Einzelinformationen werden als **fokale Elemente** bezeichnet. Die **Evidenz**  $m(A)$  einer **Einzelinformation**  $A$  berechnet sich nach REY aus der Multiplikation der Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit einer Einzelinformation(-squelle). [REY20, S. 61 ff.] Anschließend erfolgt die Kombination der Einzelinformationen (bspw. Einzelinformationen  $A$  und  $B$  in Abbildung 4.5) mit Hilfe der Kombinationsregel nach YAGER. Die **kombinierte Evidenz des Wahrnehmungsrahmens**  $m(\Omega)$  ist nach REY ein Maß für die Ungewissheit bezüglich erwarteter Bauteilmerkmalsausprägungen bzw. Grenzwerte und wird daher als Maß für die epistemische Unsicherheit (Produktunsicherheit) definiert (siehe Abschnitt 3.2.4). [REY20, S. 65 ff.]



**Abbildung 4.5 Evidenztechnische Modellierung von Informationen und Unsicherheiten nach REY [REY20]**

*Evidence-based Modeling of Information and Uncertainty According to REY [REY20]*

Abschließend erfolgt die Berechnung erwarteter Merkmalsausprägungs- bzw. Grenzwertintervalle auf Basis der vorliegenden (aggregierten) fokalen Elemente der aggregierten Einzelinformationen durch Berechnung oberer und unterer Erwartungswerte. Basierend auf den zuvor modellierten (bspw.  $m(A)$ ,  $m(B)$ ) und aggregierten Evidenzen (bspw.  $m(AB)$ ) erfolgt die Berechnung der **Informationsunsicherheit**  $m(\Omega)$  des erwarteten Grenzwert- bzw. Ausprägungsintervalls  $E$ . [REY20, S. 72 ff.] Im zweiten Schritt der Methodik erfolgt die Generierung und Modellierung unsicherer Fertigungsprozessfolgen. Hierzu werden zunächst potenziell geeignete Technologieketten vorausgewählt [REY20, S. 77 ff.]. Anschließend erfolgt die Modellierung von Wechselwirkungen und Einflüssen von Fertigungsprozessen auf Bauteilmerkmale. Hierzu

werden zunächst relevante Zwischenzustände identifiziert und durch analoge Anwendung der Evidenztheorie geforderte Grenzwerte und Ausprägungen der Zwischenzustände ermittelt. Abschließend werden herstellbare Merkmalsausprägungen durch die evidenztechnische Modellierung der Fähigkeitsbereiche von Fertigungsprozessen bestimmt. [REY20, S. 82 ff.] Im abschließenden Schritt wird zunächst die Robustheit eines Fertigungsprozesses gegenüber Bauteiländerungen durch die Kombination erwarteter Bauteilgrenzwertintervalle (Ausprägungsintervalle) und den technologischen Fähigkeiten der Fertigungsprozesse ermittelt. Mit Hilfe der anschließenden Modellierung von Abhängigkeiten der Informationssicherheiten in den Fertigungsprozessfolgen erfolgt die Bestimmung der Planungssicherheit von Fertigungsprozessen sowie Fertigungsprozessfolgen. [REY20, S. 89 ff.] REY definiert die Robustheit und Planungssicherheit als zentrale Kenngrößen für die iterative Reduktion von Unsicherheiten bei der Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen in der agilen Produktentwicklung [REY20, S. 89]. Im letzten Methodikschritt erfolgt die Bewertung unsicherer Fertigungsprozessfolgen. Hierzu entwickelte REY ein Kostenmodell zur evidenztheoretischen Bewertung unsicherer Herstellstückkosten auf Basis von Fertigungskosten, mit Hilfe derer evidenztheoretisch modellierte Nutzwerte für die potenziellen Prozessfolgen bestimmt werden. [REY20, S. 104 ff.] Abschließend wird von REY ein Modell zur Verfügung gestellt, welches auf Basis der Sensitivitätsanalyse die Priorisierung der Prozessfolgen nach ihrem Informationsbedarf sowie die Bewertung des Informationsbedarfs innerhalb der Prozessfolgen ermöglicht (Abbildung 4.4). [REY20, S. 113 ff.]

REY berücksichtigt erstmals fertigungstechnologische Aspekte bei der Gestaltung von Fertigungsfolgen (K2) im Rahmen der agilen Produktentwicklung und stellt einen ersten Ansatz zur Modellierung der Unsicherheiten auf Basis der Evidenztheorie von DEMPSTER-SHAFFER in Kombination mit YAGER vor (K5). Die gezielte Reduzierung von Restentwicklungsumfängen und Instabilitäten (K3) unter Berücksichtigung der Anlaufphase (K1) ist kein Bestandteil der Arbeit. Die Ermittlung von unsicherheitsbehafteten Anlaufkurven (K5) und Anlaufkosten (K6) ist mit dem Ansatz nicht möglich.

**Zwischenfazit:** Die Arbeit von REY stellt eine wesentliche Grundlage zur Modellierung von Unsicherheiten innerhalb der vorliegenden Arbeit dar. Insbesondere die **Kombination und Weiterentwicklung der Ansätze von REY** [REY20], **STAUDER** [STAU17] **und LANZA** [LANZ05] **bieten** durch den fertigungstechnologischen Bezug sowie ersten Ansätzen zur Modellierung von Unsicherheiten in der Fertigungsplanung und dem Serienanlauf **Potenzial als Anknüpfungspunkt für die Begegnung der Herausforderung und Lösung der wirtschaftlichen Problemstellung** (siehe Abschnitt 3.4).

*DE LANGE (2020): „Prozessmodell für den Werkzeugbau im iterativen Produktentwicklungsprozess“*

Ziel der Dissertation von DE LANGE war es, ein organisatorisches Rahmenwerk zu entwickeln, welches die systematische und gezielte Integration des Werkzeugbaus in die agile Produktentwicklung ermöglicht. Als Zielzustand wurde ein integratives

Prozessverständnis von Produktentwicklung und Werkzeugbau angestrebt. [DELA20, S. 3] Zur Erreichung des Ziels wurde ein Prozessmodell entwickelt, welches übergeordnet die Phasen Engineering Support, Prototypen, Nicht-Serienwerkzeugbau und Serienwerkzeuge unterteilt. Das Prozessmodell besteht aus sechs Gestaltungselementen welche sowohl die Funktions- und Leistungssicht als auch die Daten- und Steuerungssicht abbilden. [DELA20, S. 138 ff.] Aus Funktions- und Leistungssicht definiert DE LANGE im Prozessmodell die Gestaltungselemente Entwicklungsphasen mit Entwicklungsschritten, Entwicklungsziele und Entwicklungsleistungen des Werkzeugbaus. [DELA20, S. 140 ff.] Aus Daten- und Steuerungssicht werden die Gestaltungselemente Ablauf- und Iterationsbedingungen, Wissensweitergabe und -rückführung sowie digital vernetzte Prozessteuerung betrachtet [DELA20, S. 142 ff.].

Die Arbeit von DE LANGE liefert ein organisatorisches Rahmenwerk zur methodischen Integration des Werkzeugbaus in die agile Produktentwicklung und bietet umfangreiche Gestaltungsempfehlungen, um das Prozessmodell in der Praxis anzuwenden (K1). DE LANGE verdeutlicht das Potenzial der Wissensgenerierung und -nutzung durch Prototypen im agilen Entwicklungskontext. Die Modellierung von Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4) sowie die unsicherheitsbehaftete Prognose von Anlaufkuren (K5) und -kosten (K6) sind nicht möglich. Darüber hinaus erfolgt keine Betrachtung der Fertigungstechnologien (K2) sowie Instabilitäten und Restentwicklungsumfänge (K3) zur Stabilisierung von Serienanläufen.

**Zwischenfazit:** Nach aktuellem Stand der Forschung fehlt es insbesondere an Ansätzen, welche die Reduzierung von Instabilitäten und Restentwicklungsumfängen sowie die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Prognose von Serienanläufen unter Einbezug der operativen Technologieplanung ermöglichen.

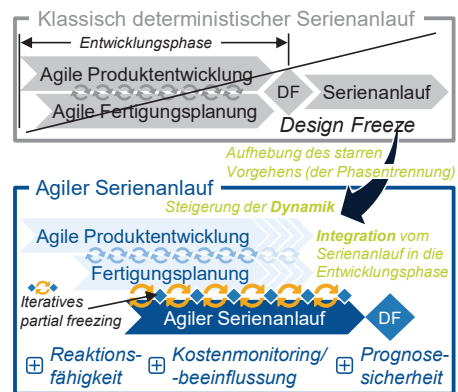
Im Zuge aktueller Entwicklungen steigt der Bedarf seitens der produzierenden Unternehmen im Rahmen aktueller Forschung eine gesteigerte Agilität von Serienanläufen sowie eine engere Vernetzung zwischen agiler Produktentwicklung und Serienanlauf in der operativen Technologieplanung zu berücksichtigen [SCHU17]. In ihrem Whitepaper thematisieren KLINK et al. bspw. die Notwendigkeit einer gesteigerten Agilität von Organisationen und Serienanläufen im Kontext von Wiederanlaufszszenarien aufgrund disruptiver pandemischer Ereignisse [KLIN20].

In der Vergangenheit wurde die Aufhebung der starren, methodischen Phasentrennung und Vorgehensweise bzw. die Idee der methodisch integrativen Betrachtung zweier bisher getrennt betrachteter Disziplinen in Anlehnung an das Konzept des Simultaneous Engineerings erforscht. Fokus des Sonderforschungsbereichs – Integrative Produkt- und Prozessgestaltung (SFB 361) war die Parallelisierung von Produktentwicklung und operativer Technologieplanung in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses. Zur Begegnung der Herausforderung im Umgang mit Unsicheren und unscharfer Daten bzw. Informationen wurde die Modellierung unscharfer Mengen durch Anwendung von Fuzzy-Mengen erforscht. [EVER05] Die Ergebnisse des SFB 361 bilden durch bspw. die Arbeiten von FALLBÖHMER [FALL00] und TROMMER [TROM01] eine

wesentliche Grundlage der heutigen operativen Technologieplanung. Die sich aus agiler Produktentwicklung und agiler Fertigungsplanung ergebenden zusätzlichen Unsicherheiten und Wechselwirkungen zwischen diesen beiden Planungsbereichen sowie notwendige Umplanungen und damit verbundene Restentwicklungsumfänge (K3) wurden nicht behandelt. Außerdem wurden keine Modelle formuliert, mit denen Anlaufszensarien für die Serienfertigung simuliert und deren Diskussion unter Berücksichtigung von Zielkriterien ermöglichen, um Optimierungsmaßnahmen einzuleiten.

Die Übertragung des Grundgedankens einer integrativen Betrachtung von *Serienanlauf* und *agiler Produktentwicklung* (K1) bietet eine Möglichkeit dem Bedarf gerecht zu werden (welches im Folgenden als **agiler Serienanlauf** bezeichnet wird) und bildet den **Lösungsansatz der vorliegenden Forschungsarbeit**<sup>1</sup> (siehe Abbildung 4.6).

Der agile Serienanlauf bietet Potenzial, zeit- und kostenintensive Änderungsmaßnahmen (Restentwicklungsumfänge) und somit Instabilitäten zukünftiger Serienanläufe frühzeitig zu reduzieren, den Informationsfluss bzw. Wissenstransfer zwischen agiler Produktentwicklung und Serienanlauf zu optimieren und somit Serienanläufe zu stabilisieren. Ziel ist es, die sprintweise und frühzeitige Prototypenfertigung und somit das generierte Wissen des agilen Produktentwicklungsprozesses in die Anlaufphase zu integrieren, um so das Anlaufverhalten durch systematische Identifikation und Analyse vorherrschender Unsicherheiten zur Reduktion von Restentwicklungsumfängen zu stabilisieren sowie die Reaktionsfähigkeit, das Kostenmonitoring/die Kostenbeeinflussung und die Prognosesicherheit zu steigern.



**Abbildung 4.6** Konzept des agilen Serienanlaufs

*Concept of Agile Ramp-up Production*

Basierend auf den analysierten Forschungsansätzen ist es bisher nicht möglich, die Abhängigkeiten zwischen dem im agilen Produktentwicklungsprozess generierten Wissen bzw. vorherrschender Unsicherheiten und Restentwicklungsumfängen unter technologischen und wirtschaftlichen Aspekten bei der Gestaltung agiler Serienanläufe zu analysieren (K1-K3). Bislang wurde nicht erforscht, welche Auswirkungen sich aus der agilen Produktentwicklung durch vorherrschende Produkt- und Technologieunsicherheiten (K4) auf das Anlaufverhalten der Fertigungsfolgen ergeben (K5). Es ist unbekannt, wie die unsicherheitsbehafteten Fertigungskosten von agilen Serienanläufen bestimmt werden (K6), um die wirtschaftlichen Auswirkungen der gesteigerten

<sup>1</sup> Erste Lösungsansätze und Herausforderungen sowie das Konzept des agilen Serienanlaufs wurden im Journal of Manufacturing Letters (MFGLET) [BERG21] veröffentlicht.

Agilität zu bewerten. Bedingt durch die methodische Integration steigt die Notwendigkeit, die vorherrschenden Unsicherheiten im agilen Produktentwicklungsprozess systematisch zu identifizieren und zu analysieren, um diese bei der Gestaltung agiler Serienanläufe zu berücksichtigen. Zur Stabilisierung von Serienanläufen ist es somit zwingend erforderlich, zu identifizieren, welche Unsicherheiten zu welcher Zeit und an welcher Stelle vorliegen und welche Auswirkungen daraus resultieren. Aufgrund der geringen Übertragbarkeit agiler Methoden der Softwareindustrie auf den Entwicklungsprozess physischer Produkte [SCHU16a] sowie fehlender Modelle und Methoden bleibt das Potenzial agiler Serienanläufe zur Reduzierung von Restentwicklungsumfängen und somit einer Stabilisierung von Serienanläufen bisher ungenutzt [BASS18]. Das Potenzial der methodisch integrativen Betrachtung von Serienanlauf und agiler Produktentwicklung wurde von F. BASSE erkannt.

*F. BASSE (2018): „Gestaltung eines adaptiven Änderungssystems für einen beherrschten Serienhochlauf“*

F. BASSE entwickelte eine Methodik zur komplexitätsorientierten Gestaltung eines adaptiven Änderungssystems für einen beherrschten Serienhochlauf. Ziel der Arbeit war es, eine latenzzeitminimale und prozessqualitätgesicherte Änderungshandhabung im agilen Prototypenbau sicherzustellen. Als übergeordnete Voraussetzung zur Stabilisierung von Serienanläufen zielt die Arbeit von F. BASSE auf die systematische und schnelle Steigerung des Produktreifegrades ab. [BASS18, S. 5] Die Methodik umfasst fünf Teilmodelle. Zunächst erfolgt im Unternehmenssystemmodell die Beschreibung der für das Änderungssystem relevanten Umweltkomplexität [BASS18, S. 89 ff.]. Im Änderungssystemmodell wird anschließend die strukturelle Komplexität des soziotechnischen Änderungssystems modelliert [BASS18, S. 105 ff.]. Das Maßnahmenmodell beschreibt mögliche Gestaltungsmaßnahmen zur Erhöhung der funktionalen Komplexität [BASS18, S. 144 ff.]. Anschließend werden die Abhängigkeiten zwischen Unternehmenssystem und Änderungssystem im Wirkmodell abgebildet [BASS18, S. 163 ff.]. Abschließend erfolgt die Entwicklung eines Änderungsmodells zur Adaption und Gestaltung des Änderungssystems zur komplexitätsgerechten Vermeidung von Instabilitäten [BASS18, S. 172 ff.].

F. BASSE entwickelte in seiner Dissertation eine Methodik mit Hilfe derer bei der Abwicklung von Änderungen während des agilen Prototypenbaus die Minimierung der Latenzzeit und Sicherung der geforderten Prozessqualität ermöglicht wird. Die Dissertation von F. BASSE bildet einen ersten organisatorischen Ansatz für die Integration der Prototypenfertigung des agilen Produktentwicklungsprozesses in den Serienanlauf und somit zur Gestaltung agiler Serienanläufe (K1). Fertigungstechnologien werden nicht in die Betrachtung eingeschlossen (K2). Es erfolgt keine Berücksichtigung von Unsicherheiten und Restentwicklungsumfängen (K3-K4). Die Prognose von Anlaufkure und -kosten ist mit der Arbeit nicht möglich (K5-K6).

### 4.3 Forschungsdefizite und wissenschaftliche Problemstellung

#### *Research Deficits and Scientific Problem Statement*

Aus der Analyse etablierter Forschungsansätze resultiert, dass die Herausforderung der Einhaltung vorgegebener Ziele im Serienanlauf aufgrund des instabilen Verhaltens von Serienanläufen nicht gelöst wurde. Es wurde gezeigt, dass eine Vielzahl an Forschungsarbeiten existiert, welche sich den Herausforderungen im Serienanlauf stellen (Abschnitt 4.1). Dabei weisen die analysierten Ansätze größtenteils einen organisatorischen Charakter auf. Technologische Aspekte zur Betrachtung und Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen im Serienanlauf werden lediglich von LANZA, NAU und STAUDER thematisiert. Ausgangsbasis der Arbeiten stellt der traditionell deterministische Entwicklungsprozess dar, indem davon ausgegangen wird, dass die Produkthanforderungen in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses festgelegt werden und sich im späteren Verlauf nicht mehr ändern. Eine methodisch integrative Betrachtung und somit der gezielte Wissenstransfer zwischen Serienanlauf und Produktentwicklung wird unzureichend thematisiert. Die Modellierung von Prognoseunsicherheiten durch die Berücksichtigung von Produkt- und Technologieunsicherheiten ist ebenfalls kein Bestandteil der Arbeiten. Insgesamt ist mit Hilfe der analysierten Forschungsansätze die gezielte und systematische Reduktion von Restentwicklungsumfängen und Instabilitäten im Serienanlauf sowie die Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven unter Berücksichtigung von Produkt- und Technologieunsicherheiten nicht möglich. Unter der Annahme, dass Restentwicklungsumfänge im Serienanlauf eine ähnliche Problematik wie die variierenden Kundenanforderungen im Produktentwicklungsprozess darstellen, wurden etablierte wissenschaftliche Forschungsansätze der agilen Entwicklung hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die zugrundeliegende Problemstellung analysiert (Abschnitt 4.2). Mit Ausnahme der Arbeit von REY weisen auch die Forschungsarbeiten agiler Entwicklungen größtenteils einen organisatorischen Charakter auf. Es wurde gezeigt, dass die gesteigerte Agilität und Einbindung von Prototypenversuchen in die Informationsbeschaffung Potenzial bieten, Fehler und Änderungspotenziale frühzeitig zu identifizieren und entsprechende Reaktionsmaßnahmen abzuleiten. Eine Übertragbarkeit bisheriger agiler Methoden auf den Serienanlauf ist aufgrund fehlender Prognosemodelle für Ausbringungsmengen und Kosten im Anlauf nicht möglich. Basierend auf der aktuellen Forderung nach einer gesteigerten Agilität von Serienanläufen sowie einer engeren Vernetzung zwischen agiler Produktentwicklung und Serienanlauf wurde das Konzept des agilen Serienanlaufs als potenzialträchtiger Lösungsansatz hergeleitet. Aktuelle Forschungsarbeiten, wie die Arbeit von F. BASSE fokussieren die methodische Zusammenführung von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf. Die analysierten Forschungsansätze bilden eine relevante Grundlage der vorliegenden Arbeit. Aktuell existieren keine Modelle und Methoden, zur Lösung der wirtschaftlichen Problemstellung. Basierend auf dem analysierten Stand der Forschung lässt sich die wissenschaftliche Problemstellung durch die Konkretisierung der Forschungsdefizite operationalisieren.

### Forschungsdefizit 1:

---

Durch die methodisch integrative Betrachtung von Serienanlauf und agiler Produktentwicklung wird die traditionell deterministische Vorgehensweise und somit der Design Freeze agiler gestaltet. Die unsicheren und unvollständigen Planungsinformationen der Entwicklungsphase haben somit einen direkten Einfluss auf die Gestaltung agiler Serienanläufe. Bedingt durch die methodische Integration steigt die Notwendigkeit, die vorherrschenden Unsicherheiten im agilen Produktentwicklungsprozess systematisch zu identifizieren und zu analysieren, um diese bei der Gestaltung agiler Serienanläufe zu berücksichtigen. Zur Stabilisierung von Serienanläufen ist es somit zwingend erforderlich, zu identifizieren, welche Unsicherheiten zu welcher Zeit und an welcher Stelle vorliegen und welche Auswirkungen oder Wechselwirkungen im agilen Serienanlauf resultieren. Die Arbeiten von STAUDER und REY stellen eine wesentliche Grundlage zur Modellierung von Unsicherheiten dar. Es wurde bisher nicht erforscht, welche Auswirkungen oder Wechselwirkungen sich aufgrund unvollständiger Planungsinformationen und der methodischen Kombination auf das Anlaufverhalten von Fertigungsfolgen ergeben. Insbesondere fehlt es aktuell an Modellen und Methoden, welche die Identifikation und Analyse phasenübergreifender Auswirkungen und Wechselwirkungen von Unsicherheiten im agilen Serienanlauf ermöglichen.

Die Analyse **phasenübergreifender Auswirkungen und Wechselwirkungen** von **Produkt- und Technologieunsicherheiten** durch eine methodisch integrative Betrachtung von Serienanlauf und agiler Produktentwicklung ist aktuell nicht erforscht.

### Forschungsdefizit 2:

---

Die Analyse bestehender Forschungsansätze hat gezeigt, dass die Herausforderungen der Instabilitäten und Änderungen im Serienanlauf nach wie vor nicht gelöst wurde und somit ein herausforderndes Forschungsfeld darstellen. Die analysierten Ansätze weisen einen reagierenden organisatorischen Charakter auf. Lediglich in den Arbeiten von LANZA, NAU und STAUDER werden Fertigungstechnologien sowie deren Instabilitäten in die Gestaltung von Serienanläufen mit einbezogen. Nach aktuellem Stand der Forschung ist es nicht möglich, die Abhängigkeiten zwischen dem im agilen Produktentwicklungsprozess generierten Wissen bzw. den Unsicherheiten und auftretenden Restentwicklungsumfängen unter technologischen und wirtschaftlichen Aspekten zur Gestaltung agiler Serienanläufe zu analysieren. Insbesondere ist nicht bekannt, welche Auswirkungen sich durch die gesteigerte Agilität und Unsicherheiten aufgrund unvollständiger Planungsinformationen auf das Auftreten von Restentwicklungsumfängen ergeben und wie diese prognostiziert werden können.

Die **Modellierung und Prognose von Restentwicklungsumfängen** im agilen Serienanlauf als Folge **unvollständiger Planungsinformationen** und **Unsicherheiten** unter Berücksichtigung der **Fertigungsfolge** ist bisher nicht möglich.

### Forschungsdefizit 3:

Aktuell existieren verschiedene Forschungsansätze, welche sowohl die reifegradorientierte Betrachtung des Entwicklungsfortschritts als Indikator der Serienreife analysieren, als auch die Prognose von Anlaufkurven und -kosten ermöglichen. Lediglich mit der Arbeit von STAUDER ist die Integration von Unsicherheiten und insbesondere die Berücksichtigung von Instabilitäten und unvollständigen bzw. unsicheren Planungsinformationen der operativen Technologieplanung erstmalig möglich. STAUDER geht in seiner Arbeit von einem abgeschlossenen Entwicklungsprozess aus wodurch Produktunsicherheiten bei der Prognose von Anlaufkurven und -kosten nicht berücksichtigt werden. Nach aktuellem Stand der Forschung fehlt es an Wissen, welche Auswirkungen sich aufgrund der Wechselwirkungen einer methodisch integrativen Betrachtung im agilen Serienanlauf ergeben (Forschungsdefizit 1). Dies führt dazu, dass unbekannt ist, wie auf Basis unsicherer und unvollständiger Produkt- und Technologieinformationen das Anlaufverhalten von Fertigungsfolgen sowie die resultierenden Fertigungskosten prognostiziert werden können. Weiterhin ist nicht bekannt, wie die gesteigerte Agilität sowie potenzielle Restentwicklungsumfänge (Forschungsdefizit 2) in die Prognosemodelle integriert und technologieindividuelle Anlaufentscheidungen bzw. Anlaufsteuerung ermöglicht werden können. Es fehlt an Wissen darüber, wie das generierte Wissen zur Stabilisierung des Anlaufverhaltens von Fertigungsfolgen und somit zur kontinuierlichen Steigerung der Prognosegüte genutzt werden kann.

Die Prognose **unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten** auf Basis **unsicherer Produkt- und Technologieinformationen** sowie potenziell auftretender **Restentwicklungsumfänge** unter Berücksichtigung des **agilen Vorgehens** und **technologieindividueller Anlaufentscheidungen** ist aktuell nicht möglich.

Aus der Analyse etablierter Forschungsarbeiten und den abgeleiteten Forschungsdefiziten lässt sich die wissenschaftliche Problemstellung wie folgt formulieren:

#### Wissenschaftliche Problemstellung

Aufgrund des **fehlenden Wissens über Zusammenhänge und Wechselwirkungen** der methodischen Kombination von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf sowie **Auswirkungen vorherrschender Produkt- und Technologieunsicherheiten** im agilen Serienanlauf ist aktuell nicht bekannt, wie der agile Serienanlauf zur **frühzeitigen Identifikation und Reduktion von Restentwicklungsumfängen** und **Instabilitäten der Fertigungsfolgen** sowie zur **Steigerung der Prognosesicherheit** von Serienanläufen und somit zur Einhaltung von Anlaufzielen zu gestalten ist.



## 5 Zielsetzung und Forschungshypothese

### *Objective and Research Hypothesis*

Basierend auf der terminologisch-deskriptiven Ableitung praxisrelevanter Probleme (Kapitel 3) und der empirisch-induktiven Analyse problemrelevanter Theorien und Verfahren im Stand der Forschung (Kapitel 4) wurden die wirtschaftliche (Abschnitt 3.4) und wissenschaftliche Problemstellung (Abschnitt 4.3) hergeleitet. Basierend auf den Problemstellungen wird im Kapitel 1 entsprechend dem Forschungsprozess der angewandten Wissenschaft der Anwendungszusammenhang der vorliegenden Arbeit durch Formulierung der Zielsetzung (Abschnitt 5.1) sowie der Definition der zugrundeliegenden Forschungshypothese (Abschnitt 5.2) spezifiziert.

### 5.1 Zielsetzung der Arbeit

#### *Objective of the Thesis*

Um den Kontext der Arbeit vor dem Hintergrund des Forschungsgebiets des agilen Serienanlaufs und den bestehenden Wissenslücken (Forschungsdefiziten) zu fokussieren, wird die Zielstellung wie folgt formuliert:

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Gestaltung agiler Serienanläufe.

Basierend auf einer integrativen Betrachtung von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf befähigt die Methodik Anwendende dazu, die Wechselwirkungen von unsicheren Planungsinformationen im agilen Serienanlauf zu identifizieren, zu modellieren und zu analysieren. Hierdurch wird es ermöglicht, deren Auswirkungen auf das Anlaufverhalten von Fertigungsfolgen reifegradbasiert unter technologischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zu prognostizieren. Insbesondere werden Anwendende dabei unterstützt, Informationsdefizite, Restentwicklungsumfänge bzw. Instabilitäten und Performancedefizite der Fertigungsfolge im agilen Serienanlauf systematisch abzuleiten und den Serienanlauf durch gezielte Reduzierung der Defizite zu stabilisieren. Durch die gesteigerte Agilität und Integration technologieindividueller Anlaufentscheidungen wird die Verkürzung der Produktentstehungszeit sowie die Steigerung der Prognosesicherheit forciert und die notwendige Serienreife zum Start of Production (SOP) sichergestellt.

## 5.2 Forschungshypothese und Forschungsfragen

### *Research Hypothesis and Research Questions*

Um das Forschungsziel der vorliegenden Arbeit zu erreichen, darf die folgende Forschungshypothese nicht falsifiziert werden:

Durch die iterative Vorgehensweise im **agilen Serienanlauf** wird es ermöglicht, **Restentwicklungsumfänge** und **Unsicherheiten** in frühen Entwicklungsphasen **systematisch zu reduzieren** und die **Anlaufziele zu erreichen**.

Um die Forschungshypothese zu verifizieren, gilt es im Rahmen der Methodikentwicklung der vorliegenden Arbeit die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

#### Forschungsfrage 1

---

Wie sind Unsicherheiten im agilen Serienanlauf als Simulationsgrundlage zu modellieren, um deren Auswirkungen auf den Entwicklungsfortschritt entscheidungsabhängig zu bewerten und potenziell resultierende Restentwicklungsumfänge zu prognostizieren?

#### Forschungsfrage 2

---

Wie ist ein stochastisches Prognosemodell zu gestalten, welches Anwendenden die Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven durch Integration unvollständiger, sprintweise generierter Informationen unter Berücksichtigung einer iterativen Bedarfspriorisierung ermöglicht, um die unsicherheitsbehafteten Anlaufkosten im agilen Serienanlauf zu bewerten?

#### Forschungsfrage 3

---

Wie ist eine Methode zu gestalten, um die sprintweise generierten Ergebnisse aus Prototypen- und Validierungsversuchen in die Modellierung der unsicheren Simulationsgrundlage im agilen Serienanlauf zu integrieren?

## 6 Konzeptionierung der Methodik

### *Conceptual Design of the Methodology*

Im folgenden Kapitel (Kapitel 6) wird, basierend auf der Zielstellung (Kapitel 1), die zu entwickelnde Methodik konzeptioniert. Hierzu erfolgt die Herleitung formaler und inhaltlicher Anforderungen an die Methodik (Abschnitt 6.1). In Abschnitt 6.2 werden die in der vorliegenden Arbeit geltenden Annahmen und Eingrenzungen definiert. Abschließend wird das Grobkonzept der Methodik beschrieben (Abschnitt 6.3).

### 6.1 Anforderungen an die Methodik

#### *Requirements for the Methodology*

Zur Sicherstellung einer zielorientierten Entwicklung der Methodik gilt es, die zu erfüllenden Anforderungen an die Methodik explizit zu formulieren, welche als Leitbild der Entwicklung und als Maßstab zur empirischen Validierung zu sehen sind [SCHÖ06, S. 41]. Die Anforderungen lassen sich in formale (Abschnitt 6.1.1) und inhaltliche Anforderungen (Abschnitt 6.1.2) differenzieren, welche im Folgenden detailliert werden.

#### 6.1.1 Formale Anforderungen

##### *Formal Requirements*

Das Verhältnis zwischen Anwendungsaufwand und Nutzen der Methodik zugrundeliegenden Modelle ist für die Wirksamkeit der Methodik entscheidend [REY20, S. 47]. Basierend auf dem Trade-off zwischen Anwendungsaufwand und Nutzen leitete PATZAK fünf Charakteristika für ein nach seinem Verständnis gutes Modell als Abstraktionsform eines Phänomens ab [PATZ82, S. 309 f.]. Die Charakteristika nach PATZAK bilden die Grundlage für die formalen Anforderungen an die in der Methodik zu entwickelnden Modelle.

Da die Entwicklung von Modellen eine Abstraktion eines Phänomens/Phänomenssystems darstellt, gilt es einen hohen Realitätsbezug (Abbildungseigenschaften, bezogen auf die Realität) sicherzustellen. Daraus lässt sich ableiten, dass das Verhalten des Modells eine hohe Übereinstimmung mit Beobachtungen aus dem Phänomensystem, also eine **empirische Richtigkeit**, aufweist. Insbesondere gilt es, den Kriterien Genauigkeit (in welchem Rahmen werden Aussagen noch als richtig angesehen) und Sicherheit (mit welcher Wahrscheinlichkeit trifft die getätigte Aussage auf die Realität zu) Folge zu leisten. [PATZ82, S. 309 f.] Durch die empirische Richtigkeit wird zum einen Transparenz geschaffen und zum anderen die notwendige Vollständigkeit des Modells sichergestellt [SCHÖ06, S. 45]. Neben der empirischen Richtigkeit gilt es zur Überprüfbarkeit sicherzustellen, dass das entwickelte Modell reproduzierbare Aussagen generiert und sowohl widerspruchsfrei als auch formal einwandfrei ist und somit dem Charakteristikum der **formalen Richtigkeit** entspricht [PATZ82, S. 310]. Ergebnisse gilt es in möglichst quantitativer Form zu generieren, um eine hohe

Aussagequalität zu erreichen [SCHÖ06, S. 45]. Darüber hinaus gilt es sicherzustellen, dass das Modell inhaltlich und formal geeignete Antworten auf spezifische Fragestellungen liefert und somit dem Charakteristikum der **Zweckbezogenheit bzw. Produktivität** folgt. Neben den bisher formulierten Charakteristika bzw. formalen Anforderungen gilt es, die Nutzungsfreundlichkeit durch leichte Anwendbarkeit des Modells sowie durch leichte Interpretierbarkeit der Ergebnisse und somit die **Handhabbarkeit** sicherzustellen. Dem gegenüber ist es erforderlich, dass die Implementierung des Modells mit möglichst niedrigem Aufwand (**nicht aufwändig**) ermöglicht wird. [PATZ82, S. 310]

Basierend auf der Beschreibung der formalen Anforderungen ist es offensichtlich, dass die ersten drei Anforderungen bzw. Charakteristika nach einer hohen Realitätsnähe (empirische Richtigkeit, formale Richtigkeit und Zweckbezogenheit) im Konflikt mit den letzten beiden Anforderungen (Charakteristika) an die Wirtschaftlichkeit der Modellanwendung (Handhabbarkeit und nicht aufwändig) stehen [PATZ82, S. 310]. Es ist möglich, dem Konflikt durch die Reduktion der Vollständigkeit, dem Verzicht auf Formalisierung bzw. Quantifizierung sowie durch Reduktion der Genauigkeit und somit durch Vereinfachung der Modelle zu begegnen [PATZ82, S. 315 f.].

Somit stellt jedes Modell einen Kompromiss zwischen Realitätsnähe und Wirtschaftlichkeit dar [PATZ82, S. 310]. Es gilt bei der Entwicklung und Anwendung von Modellen ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Reduktion des Entwicklungs- bzw. Anwendungsaufwands und dem Verlust an Modellnutzen abzuwägen [SCHÖ06, S. 46].

## 6.1.2 Inhaltliche Anforderungen

### *Content Specific Requirements*

Neben der Wirksamkeit von Modellen der Methodik gilt es, die Leistungsfähigkeit der zu entwickelnden Methodik durch Formulierung der inhaltlichen Anforderungen zu definieren [SCHÖ06, S. 44]. Die inhaltlichen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik lassen sich aus den formulierten Forschungsdefiziten (Abschnitt 4.3) sowie der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit (Abschnitt 5.1) ableiten. Die inhaltlichen Anforderungen sind in Abbildung 6.1 zusammengefasst. Die Basis des agilen Serienanlaufs stellt die methodisch integrative Betrachtung von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf im Sinne des Simultaneous Engineerings dar. Aufgrund der Parallelisierung dieser Entwicklungsphasen wird der Design Freeze agiler gestaltet und es liegen die unsicheren und unvollständigen Planungsinformationen des agilen Entwicklungsprozesses auch im Serienanlauf vor. Daher ist es zwingend erforderlich, die vorherrschenden Unsicherheiten zu modellieren und für weitere Anwendung und Analysen zu quantifizieren (Anforderung 1). Durch die methodisch integrative Betrachtung ergeben sich entscheidende Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Produktentwicklung und Serienanlauf, welche Auswirkungen auf den Verlauf, die Kosten und somit die Zielerreichung des Produktentstehungsprozesses haben. Daher ist es erforderlich, zu wissen, wo Unsicherheiten auftreten, in welcher Form sie auftreten und welche

Auswirkungen sowohl die Unsicherheiten als auch Anlaufentscheidungen auf das Anlaufverhalten von Fertigungsfolgen haben. Somit gilt es, diese fertigungstechnologischen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zu identifizieren, in die Modellierung einzubeziehen und zu analysieren (Abhängigkeit 2). Neben den Unsicherheiten und Wechselwirkungen stellen Restentwicklungsumfänge eine weitere potenzielle Ursache zur Verfehlung der Anlaufziele dar. Daher ist es für den Erfolg von Serienanläufen erforderlich, potenzielle Restentwicklungsumfänge zu prognostizieren (Anforderung 3) und hinsichtlich ihrer Auswirkungen zu bewerten (Anforderung 4).

<p>Unsicherheiten, Instabilitäten und Restentwicklungsumfänge</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modellierung und Quantifizierung von unsicheren Planungsinformationen im agilen Serienanlauf</li> <li>2. Identifikation und Analyse fertigungstechnologischer Wechselwirkungen und Abhängigkeiten</li> <li>3. Prognose potenzieller Restentwicklungsumfänge</li> <li>4. Bewertung potenzieller Restentwicklungsumfänge</li> </ol>
<p>Unsicherheits-behaftete Anlaufkurven und -kosten</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Kombinierte Bewertung des Entwicklungsfortschritts von Produkt und Fertigungsfolge</li> <li>6. Einbezug von technologieindividuellen Anlaufentscheidungen in die Bewertung des Entwicklungsfortschritts</li> <li>7. Systematische Identifikation von Unsicherheiten</li> <li>8. Systematische Reduktion der Unsicherheiten</li> <li>9. Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven</li> <li>10. Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkosten</li> <li>11. Algorithmusbasiertes und iteratives Vorgehen</li> </ol>
<p>Nutzung von Realdaten</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>12. Bewertung der Evidenz von Prototypenversuchen</li> <li>13. Einbezug sprintweise generierter Realdaten</li> </ol>

**Abbildung 6.1** Inhaltliche Anforderungen an die Methodik

*Content Specific Requirements for the Methodology*

Die prognostizierte Anlaufkurve sowie die Anlaufkosten stellen die Planungsgrundlage für produzierende Unternehmen dar und bilden den Entwicklungsfortschritt (Stabilität der Fertigung(-sfolge)) über der Zeit ab. Durch die integrative Modellierung im agilen Serienanlauf ist es erforderlich, den Entwicklungsfortschritt als kombinierte Betrachtung von Produkt und Fertigungsfolge zu bewerten (Anforderung 5). Dabei gilt es, insbesondere Anlauffreigaben und -entscheidungen in die Bewertung zu integrieren, um eine gesteigerte Agilität und systematische Steuerung des Serienanlaufs zu ermöglichen (Anforderung 6). Eine Ziel- und Steuergröße des agilen Serienanlaufs stellt die systematische und bedarfsorientierte Reduzierung von Produkt- und Technologieunsicherheiten dar. Daher gilt es diese systematisch zu identifizieren (Anforderung 7). Basierend auf den identifizierten Unsicherheiten gilt es, Anwendende bei der systematischen Reduktion zu unterstützen, um den Entwicklungsfortschritt effizient zu steigern

(Anforderung 8). Der Entwicklungsfortschritt über der Zeit wird mit Hilfe einer Anlaufkurve visualisiert und dient als wichtige Planungsgrundlage für produzierende Unternehmen. Im Rahmen der Methodik gilt es daher, ein Prognosemodell zu entwickeln, welches die Ableitung der Anlaufkurve agiler Serienanläufe unter Berücksichtigung von Unsicherheiten im Entwicklungsprozess und resultierenden Prognoseunsicherheiten ermöglicht (Anforderung 9). Neben der Anlaufkurve ist es für eine zielorientierte Planung erforderlich, die unter anderem aus der Reduktion von Unsicherheiten resultierenden Anlaufkosten zu prognostizieren (Anforderung 10). Um die Anwendbarkeit der Methodik in der Praxis zu ermöglichen, gilt es, die Modelle und Methoden algorithmusbasiert zu entwickeln und in einer planungsbegleitenden, iterativen Gesamtmethodik zu synchronisieren (Anforderung 11).

Basierend auf Anforderung 8 gilt es, im agilen Entwicklungskontext Prototypen als Informationsquelle in die Reduzierung der Unsicherheiten als Informationsquelle bzw. Validierungsmöglichkeit zu integrieren. Somit ist es erforderlich, die Prototypenversuchsergebnisse evidenztechnisch zu bewerten (Anforderung 12). Neben dem iterativen und planungsbegleitenden Vorgehen ist die Methodik so zu gestalten, dass die sprintweise generierten Realdaten bzw. der reale Entwicklungsfortschritt kontinuierlich in die Methodik integriert werden (Anforderung 13).

## 6.2 Annahmen und Eingrenzungen

### *Assumptions and Constraints*

Basierend auf der Herleitung formaler Anforderungen an die Methodik (Abschnitt 6.1.1) unterliegt die vorliegende Forschungsarbeit Annahmen und Eingrenzungen, um ein ausgewogenes Verhältnis von Aufwand in der Methodikimplementierung und Anwendungsnutzen zu erzielen. Die Annahmen und Eingrenzungen gilt es somit sowohl bei der Entwicklung der Methodik als auch bei der späteren Anwendung zu berücksichtigen. Die in der vorliegenden Forschungsarbeit zugrundeliegenden Annahmen und Eingrenzungen werden im Folgenden beschrieben:

- Das zu entwickelnde Bauteil stellt ein Bauteil für die Serienanfertigung dar, welches in hohen Stückzahlen gefertigt wird.
- Die Gestalt sowie die konstruktions- und kundenseitigen Anforderungen an die Bauteilgestalt sind bekannt, sodass das Bauteil durch Fertigungsfeatures beschrieben werden kann. Es besteht lediglich Unsicherheit über die Ausprägung von Bauteilmerkmalen. Änderungen der Anforderungen werden nicht berücksichtigt.
- Die Überführung der Anforderungen in geforderte Bauteilmerkmale ist Teil der Konstruktion und wird in der vorliegenden Arbeit vorausgesetzt.
- Die potenziellen Fertigungsfolgen sind bekannt.
- Die Fähigkeitsbeschreibungen von Fertigungsfolgen (Fertigungs- und Handhabungsprozessen) liegen in quantifizierter Form vor. Es besteht lediglich Unsicherheit bezüglich ihrer Ausprägungen.

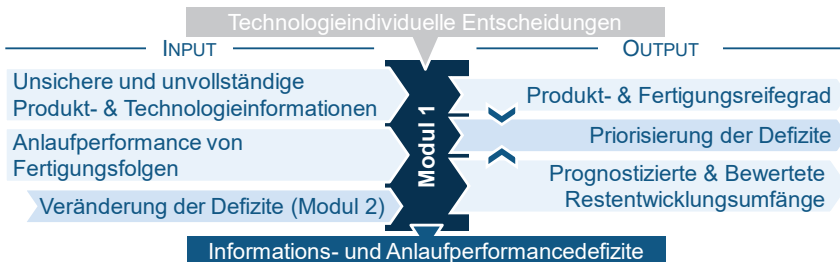
- Transport-, Lager- und Prüfschritte sowie Montagevorgänge werden nicht berücksichtigt.
- Die Durchführung der Prototypenversuchsplanung sowie die konkrete Informationsbeschaffung ist kein Bestandteil der Arbeit. Die Methodik schafft die Grundlage für die Identifikation von Stellhebeln und ermöglicht die Prognose potenzieller Zukunftsszenarien.
- Die Methodik bildet die Grundlage zur Analyse der Auswirkungen variierender Sprintkapazitäten auf das Anlaufverhalten von Fertigungsfolgen. Die Sprintkapazität wird als Regelgröße vorgegeben. Die Ermittlung optimaler Sprintkapazitäten ist nicht Teil der Arbeit.

### 6.3 Ableitung des Grobkonzepts

#### *Derivation of the Conceptual Design*

Basierend auf der formulierten Zielsetzung (Abschnitt 5.1), den abgeleiteten Forschungsfragen (Abschnitt 5.2) sowie den formalen und inhaltlichen Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik (Abschnitt 6.1) wird das folgende Grobkonzept der Methodik (Simulationsmethodik) abgeleitet. Das Grobkonzept der Simulationsmethodik folgt dem Regelkreisgedanken und besteht aus drei Modulen, welche zu Teilen im Realsprint (Generierung von Realdaten) und in der Sprintsimulation (Simulation der Informationsbeschaffung) durchlaufen werden, siehe Abbildung 6.5.

Grundlage der Methodik und somit Eingangsinformationen (Input) von Modul 1 stellen unsicheren und unvollständigen Produkt- und Technologieinformationen sowie die Anlaufperformance von Fertigungsfolgen dar (Abbildung 6.2). Das erste Modul (**Modul 1 – Modellierung der Simulationsgrundlage**), zielt darauf ab, vorhandene Produkt- und Technologieunsicherheiten zu erfassen und zu modellieren sowie den Entwicklungsstand durch die Ableitung von Informations- und Anlaufperformancedefizite zu bewerten und zu analysieren (Abschnitt 7.1).



**Abbildung 6.2** Input und Output von Modul 1 der Methodik

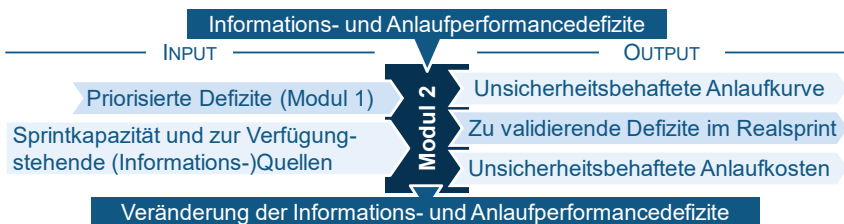
*Input and Output of Modul 1 of the Methodology*

Als Ergebnis von Modul 1 liegen Informationen zum Produkt- und Fertigungsreifegrad sowie prognostizierte und bewertete Restentwicklungsumfänge vor. Diese

Informationen bilden die Grundlage der Simulationsmethodik und somit zur Priorisierung der Informations- und Anlaufperformancedefizite.

Zur Erreichung des Ziels werden in Modul 1 zunächst die Produkt- und Technologieinformationen und die Anlaufperformance der Fertigungs- und Handhabungsprozesse modelliert (Abbildung 6.5). Liegen unsichere und unvollständige Plandaten vor, wird dies auf ein Defizit in der Informationsgrundlage bzw. Informationsbeschaffung zurückgeführt. Analog zur Informationsgrundlage werden durch eine vom zu erreichenden Plandatum abweichende Anlaufperformance eines Fertigungs- bzw. Handhabungsprozesses dessen Anlaufperformancedefizite abgeleitet (Abschnitt 7.1.1). Die Informations- und Anlaufperformancedefizite bilden die Grundlage für die Identifikation und Bewertung potenzieller zukünftiger Restentwicklungsumfänge (Abschnitt 7.1.2) sowie für die Bewertung des Entwicklungsfortschritts mit Hilfe des Produkt- und Fertigungsreifegrads (Abschnitt 7.1.3). Basierend auf der Reifegradbewertung und der Prognose von Restentwicklungsumfängen werden die Zielkriterien (ZK 1 - Produktreifegrad = 1, ZK 2 – Fertigungsreifegrad = 1 und ZK 3 keine Restentwicklungsumfänge mehr prognostiziert) geprüft. Ist ein Zielkriterium nicht erfüllt, wird die Informationsbeschaffung bzw. Anlaufperformancesteigerung in den Sprints des agilen Serienanlaufs simuliert (Modul 2).

Die abgeleiteten Informations- und Anlaufperformancedefizite aus Modul 1 bilden die zentralen Simulationsvariablen (Input) im stochastischen Prognosemodell aus Modul 2 (Abbildung 6.3). Basierend auf der Priorisierung der Informations- und Anlaufperformancedefiziten aus Modul 1 sowie der zur Verfügung stehenden Sprintkapazität ist das Ziel von Modul 2 (**Modul 2 – Stochastisches Prognosemodell**) die Auswirkungen der systematischen Reduktion der Defizite zu prognostizieren. Durch den iterativen Austausch und Wiederholprozesse von Modul 1 und 2 werden die Reifegrade systematisch gesteigert bzw. die Restentwicklungsumfänge reduziert. Als Ergebnis von Modul 2 lassen sich die unsicherheitsbehafteten Anlaufkurve und -kosten prognostizieren.



**Abbildung 6.3** Input und Output von Modul 2 der Methodik

*Input and Output of Modul 2 of the Methodology*

Zur systematischen Reduktion der Informations- und Anlaufperformancedefizite ist Modul 2 in zwei Teilbereiche untergliedert. Im ersten Teil erfolgt die algorithmusba-

sierte Bedarfpriorisierung der Informationsbeschaffung bzw. Anlaufperformanceteigerung (Abschnitt 7.2.1). Anschließend wird auf Basis der Priorisierung in Abschnitt 7.2.2 die stochastische Simulation der theoretischen Informations- und Anlaufperformancedefizitreduktion durchgeführt. Regelgröße stellt die zur Verfügung stehende Sprintkapazität dar, welche Anwendenden zur Informationsbeschaffung/Anlaufperformanceteigerung zur Verfügung steht. Durch Anpassung der Sprintkapazität ist es Anwendenden möglich, den agilen Serienanlauf hinsichtlich der Zielerreichung zu steuern. Basierend auf den Simulationsergebnissen werden Auswirkungen der simulierten Informations- und Anlaufperformancedefizitreduktion (Veränderung der Defizite) auf die Simulationsgrundlage (Abschnitt 7.2.3) prognostiziert. Anschließend werden die durch die Informationsbeschaffung/Anlaufperformanceteigerung anfallenden Anlaufsprintkosten in Abschnitt 7.2.4 ermittelt. Der Simulationsdurchlauf (Modul 1 und 2) wird so oft wiederholt, bis die Zielkriterien (ZK 1-ZK 3) erreicht sind. Sind die Zielkriterien erfüllt, werden die Ergebnisse durch die Anlaufkurve visualisiert und die entstandenen Anlaufkosten des agilen Serienanlaufs prognostiziert (Abschnitt 7.2.5). Im zweiten Teil des Moduls erfolgt nach Erreichen der für die Simulation notwendigen Wiederholung des ersten Teils die statistische Ableitung unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten agiler Serienanläufe (Abschnitt 7.2.6). Die Prognoseunsicherheit wird dabei durch ein Unsicherheitsband um die erwartete Anlaufkurve und der erwarteten Anlaufkostenkumulation visualisiert.

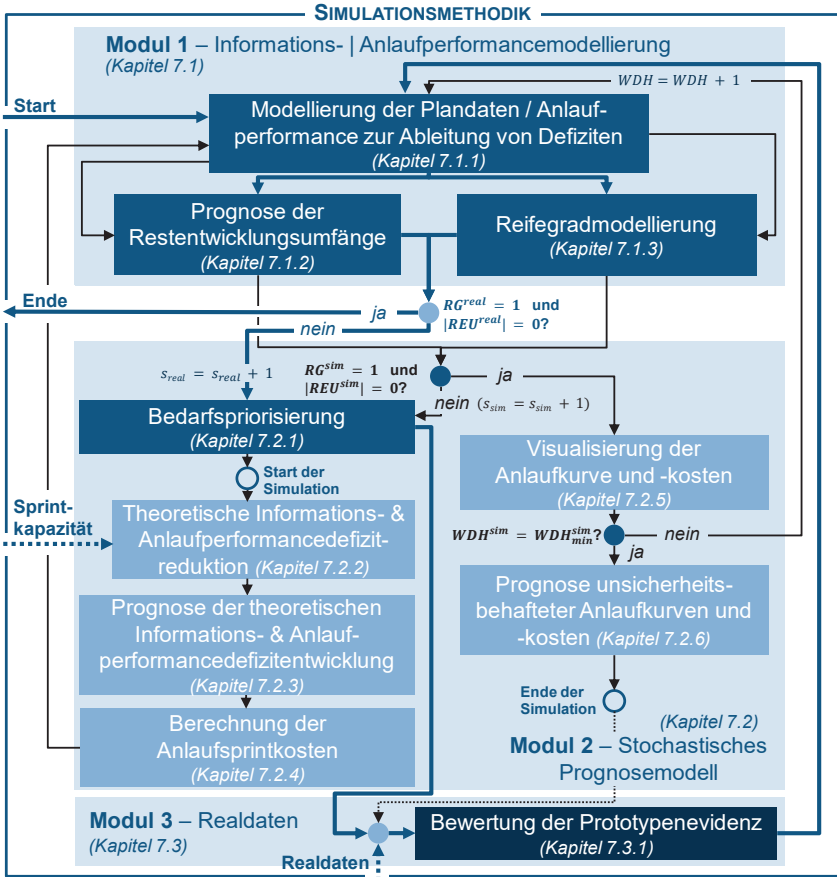
Realdaten aus dem Einsatz von Prototypen und durch Validierungsversuche spielen eine zentrale Rolle bei der Informationsbeschaffung und Anlaufperformanceteigerung im agilen Serienanlauf. Da Prototypen und Validierungsversuchsergebnisse sich nicht direkt in die Evidenzmodellierung (Modul 1) integrieren lassen, ist eine Transformation der Versuchsergebnisse notwendig. Im dritten Modul (**Modul 3 – Realdaten**) erfolgt daher die Transformation der generierten Realdaten (Versuchsergebnisse) aus den Prototypen- und Validierungsversuchsergebnissen (Input) in mittels Evidenz Theorie verarbeitbare Informationen (Output) (Abbildung 6.4). Diese Transformation ermöglicht es, die generierten Realdaten als zusätzliche Information bzw. Prototypen- und Validierungsversuche als zusätzliche Quelle mit in die Modellierung der Informationsgrundlage in Modul 1 zu integrieren. Basierend auf den ermittelten Evidenzen und Informationen erfolgt die Aktualisierung der Informations- und Anlaufperformancemodellierung (Modul 1).



**Abbildung 6.4** Input und Output von Modul 3 der Methodik

*Input and Output of Modul 3 of the Methodology*

Zur Integration von Prototypen und Validierungsversuchsergebnissen erfolgt zunächst in Abschnitt 7.3.1 die Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Evidenz von Prototypen- und Validierungsversuchsergebnissen. Nach der Integration der Realdaten wird die Methodik (Simulationsmethodik) erneut durchlaufen und das Anlaufverhalten von Fertigungsfolgen basierend auf den aktuell vorliegenden Realdaten für die nachfolgenden Sprints prognostiziert, bis nach Realdaten die Zielkriterien erfüllt sind.



$REU^{sim/real}$ : simulierte bzw. reale Restentwicklungsumfänge |  $RG^{sim/real}$ : simulierter bzw. realer Reifegrad |  $s_{sim}$ : Simulationssprint |  $s_{real}$ : realer Sprint |  $WDH^{sim}$ : Wiederholungen der Simulation |  $WDH_{min}^{sim}$ : Mindestwiederholungen für Simulation

■ Methodenelemente für Real-/Simulationsspfad ■ Methodenelemente für Realpfad ■ Methodenelemente für Simulationsspfad

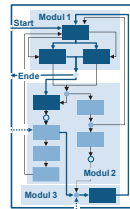
Abbildung 6.5 Grobkonzept der Methodik

Conceptual Design of the Methodology

# 7 Detaillierung der Methodik

## *Detailing of the Methodology*

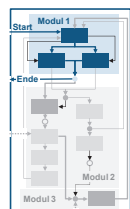
Im folgenden Kapitel (Kapitel 7) erfolgt die deduktive detaillierte Entwicklung der in Kapitel 6 vorgestellten Konzeptionierung. Die Gliederung des Kapitels orientiert sich dabei an den Modulen des Grobkonzepts (Abschnitt 6.3) sowie den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Forschungsfragen. In Abschnitt 7.1 erfolgt zunächst die Modellierung der Simulationsgrundlage zur Ableitung von Informations- und Anlaufperformancedefiziten sowie, basierend auf den Defiziten, die Bewertung des Entwicklungsfortschritts und Prognose von Restentwicklungsumfängen (Modul 1). Anschließend wird in Abschnitt 7.2 das stochastische Prognosemodell zur Ermittlung unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten erläutert (Modul 2). Abschließend erfolgt in Abschnitt 7.3 die Integration von Realdaten. Um die iterative Realdatenintegration in das Prognosemodell zu ermöglichen, wird eine Bewertungsmethode zur Ableitung der Evidenz von Prototypen- und Validierungsversuchsergebnissen vorgestellt (Modul 3). Ziel ist es, ein Simulationsmodell für die iterative stochastische Simulation agiler Serienanläufe zu entwickeln. Aus diesem Grund werden die einzelnen Module so entwickelt, dass sie die automatisierte (algorithmusbasierte) Verarbeitung der Daten und Informationen in der Gesamtmethodik ermöglichen. Um sicherzustellen, dass die entwickelten Modelle und Methoden konsistent und valide sind (nicht falsifiziert, siehe Abschnitt 2.1), erfolgt die empirisch-induktive Durchführung der Validierung anhand eines Fallbeispiels im Anschluss an die Beschreibung der Module.



### 7.1 Modellierung der Simulationsgrundlage (Modul 1)<sup>2</sup>

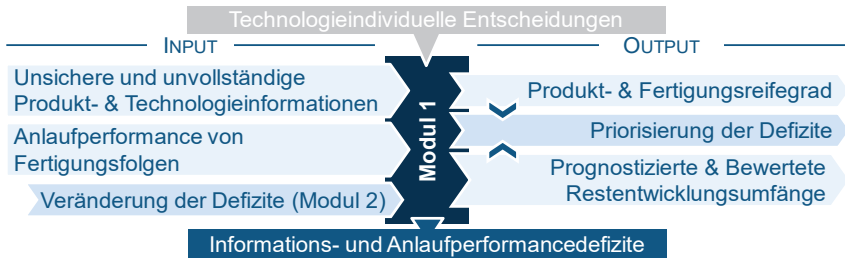
#### *Modeling of the Information (Module 1)*

Die methodische Kombination von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf stellt das zentrale Element des agilen Serienanlaufs dar. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, bietet der Lösungsansatz produzierenden Unternehmen das Potenzial durch die gesteigerte Agilität und somit Flexibilität systematisch und frühzeitig auf Änderungen und Abweichungen im Entwicklungsprozess zu reagieren. Durch die methodische Kombination ergeben sich weitreichende Auswirkungen der im agilen Produktentwicklungsprozess vorliegenden unvollständigen und unsicheren Simulationsgrundlage auf das Anlaufverhalten von Fertigungsfolgen im agilen Serienanlauf. Der Fokus von Abschnitt 7.1. liegt auf der Entwicklung der für die Modellierung und Bewertung der Simulationsgrundlage notwendigen Modelle und Methoden in Modul 1. Grundlage der Methodik und somit Eingangsinformationen (Input) von Modul 1 stellen unsichere und unvollständige Produkt- und Technologieinformationen sowie die



<sup>2</sup> Einzelne Lösungsansätze des Abschnitts 7.1 wurden in den Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA '22) [BERG22] veröffentlicht und auf der Konferenz diskutiert.

Anlaufperformance von Fertigungsfolgen dar (Abbildung 7.1). Das **erste Modul (Modul 1 – Modellierung der Simulationsgrundlage)**, zielt darauf ab, vorhandene Produkt- und Technologieunsicherheiten zu erfassen und zu modellieren sowie den Entwicklungsstand durch die Ableitung von Informations- und Anlaufperformancedefizite zu bewerten und zu analysieren.



**Abbildung 7.1** Input und Output von Modul 1 der Methodik

*Input and Output of Modul 1 of the Methodology*

Als Ergebnis von Modul 1 liegen Informationen zum Produkt- und Fertigungsreifegrad sowie prognostizierte und bewertete Restentwicklungsumfänge vor. Diese Informationen bilden die Grundlage der Simulationsmethodik und somit zur Priorisierung der Informations- und Anlaufperformancedefizite. Hierzu wird die Beantwortung der Forschungsfrage 1 fokussiert:

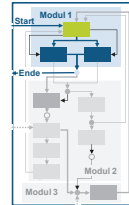
**Forschungsfrage 1:** *Wie sind Unsicherheiten im agilen Serienanlauf als Simulationsgrundlage zu modellieren, um deren Auswirkungen auf den Entwicklungsfortschritt entscheidungsabhängig zu bewerten und potenziell resultierende Restentwicklungsumfänge zu prognostizieren?*

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 erfolgt in Abschnitt 7.1.1 die Detaillierung einer Methode zur Modellierung von Unsicherheiten und somit der Simulationsgrundlage im agilen Serienanlauf. Basierend auf den modellierten Unsicherheiten werden Informations- und Anlaufperformancedefizite abgeleitet. Aufbauend auf den in Abschnitt 7.1.1 abgeleiteten Defiziten erfolgt in Abschnitt 7.1.2 die Entwicklung einer Methode zur Prognose und Bewertung von Restentwicklungsumfängen (REU) im agilen Serienanlauf. Zudem erfolgt in Abschnitt 7.1.3 die Entwicklung eines entscheidungsabhängigen Reifegradbewertungsmodells. Ziel ist es, basierend auf den modellierten Unsicherheiten (Defiziten) unter Einbezug anlaufrelevanter Entscheidungen den Entwicklungsfortschritt reifegradbasiert zu bewerten. Das Modell bildet die Grundlage für die Modellierung der Anlaufkurve im weiteren Verlauf der Methodik. Zur wissenschaftlich fundierten Überprüfung der gewonnenen Erkenntnisse sowie zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der Methodik erfolgt in Abschnitt 7.1.4 die Bewertung und Validierung der entwickelten Modelle und Methoden anhand eines Fallbeispiels.

### 7.1.1 Modellierung von Plandaten und der Anlaufperformance zur Ableitung von Informations- und Anlaufperformancedefizite

*Modeling of Planning Data and Ramp-Up Performance to Derive Information and Ramp-Up Performance Deficits*

**Informationen** sind zweckbezogenes Wissen [BUSS93, S. 3], welches den Anteil einer Nachricht umfasst, der für Empfangende einen Wert besitzt und Wahrscheinlichkeitsurteile, bezogen auf entscheidungsrelevante Daten (Ereignisse), verändert [SPRI13, S. 193]. Unsichere und unvollständige Informationen zum Bauteil und zur Fertigungsfolge sind zentraler Bestandteil der agilen Produktentwicklung [REY20]. Durch die methodische Kombination von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf im agilen Serienanlauf haben diese Unsicherheiten einen direkten Einfluss auf das Anlaufverhalten und somit auf die technologische und wirtschaftliche Gestaltung von Fertigungsfolgen im agilen Serienanlauf [BERG22]. Um die Zusammenhänge, Wechselwirkungen und Auswirkungen zu analysieren, ist eine wesentliche Grundlage der vorliegenden Arbeit, die unsichere und unvollständige Informationsgrundlage und somit existierende Unsicherheiten zu modellieren. REY entwickelte in seiner Dissertation eine Methodik zur Modellierung von Produkt- und Technologieunsicherheiten zur Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen in der agilen Produktentwicklung [REY20]. Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, stellt die Evidenztheorie, welche erfolgreich in der Methodik von REY eingesetzt wurde, eine wesentliche Grundlage der vorliegenden Arbeit dar. Im Zuge der Methodikentwicklung wird daher auf der Methodik von REY aufgebaut und diese für die Anwendbarkeit im agilen Serienanlauf erweitert. Die wesentlichen Bestandteile der Methodik wurden in Abschnitt 4.2 erläutert. Daher wird im Folgenden die Adaption bzw. Erweiterung der Methodik fokussiert. Für eine detaillierte Ausführung der Grundlagen sei an dieser Stelle auf die Dissertation von REY [REY20] sowie Grundlagenliteratur von DEMPSTER [DEMP67], SHAFER [SHAF76], RAKOWSKI [RAKO07] und YAGER [YAGE87] verwiesen. Die Evidenztheorie ist eine Theorie des plausiblen Schließens [BEIE14, S. 465]. In Abgrenzung zur klassischen Wahrscheinlichkeitstheorie, beschreibt Evidenz im Allgemeinen eine unmittelbare Einsichtigkeit von Erkenntnissen und unbeweisbaren Aussagen, deren Korrektheit erst durch das Eintreffen, bzw. Nicht-Eintreffen festgestellt werden kann [BEIE14, S. 78]. Durch Kombination verschiedener Einzelinformationen unterschiedlicher Informationsquellen ist es möglich, eine Gesamtaussage unter Berücksichtigung der Glaubwürdigkeit jeder Informationsquelle zu treffen [AUER10]. Mit Hilfe der Evidenztheorie wird im Folgenden die Informationsgrundlage modelliert.



#### Modellierung der Informationsgrundlage (Plandaten)

Die Informationsgrundlage stellt einen wesentlichen Bestandteil der Planungsgrundlage von agilen Serienanläufen sowie der späteren Serienfertigung dar. Die im Folgenden als **Plandaten** bezeichneten Informationen (Daten) werden definiert als Informationen (bzw. Daten) die vom Anwendenden der Methodik durch das Sammeln und

Aggregieren von Einzelinformationen festgelegt werden und umfassen die mit Hilfe der Methodik von REY erhobenen Daten [REY20]. Plandaten enthalten somit alle Informationen zum *Produkt* bzw. zu den *Produktanforderungen* (Produktgeometrie bzw. Merkmalsgrenzwerte, Informationen zum Werkstoff, etc.), zur *Fertigungsfolge* (Fähigkeit der Fertigungs-/Handhabungsprozesse bzw. Prozessgrenzwerte, Zwischenzuständen in der Fertigungshistorie, etc.) sowie zu *Variablen der Kostenkalkulation* (Rüstzeiten, Planbelegungszeiten, etc.). Plandaten bilden im Folgenden die Informationsgrundlage und liegen zu Beginn des Entwicklungsprozesses und somit zu Beginn des agilen Serienanlaufs in ungenauer und unsicherer Form vor. Ziel ist es, die Plandaten im Entwicklungsprozess durch das Sammeln von Einzelinformationen zu präzisieren und deren Unsicherheit zu reduzieren [BERG22]. Durch die Präzisierung der Plandaten wird die Informationsgrundlage für Entscheidungen und Bewertungen im agilen Serienanlauf verbessert. Endzustände der Bauteilmerkmale in der Fertigungshistorie stellen spezielle Plandaten dar, welche die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von Produkt und Fertigungsfolge beschreiben. Die seitens des Produkts geforderten Plandaten zu Bauteilmerkmalen werden als Plandaten für Endzustände in der Fertigungshistorie modelliert. Die Plandaten werden zur Abbildung der Informationsgrundlage im Folgenden so modelliert, dass eine Verarbeitung und Integration der Informationen in die Simulationsmethodik ermöglicht wird. Für die Verarbeitung der Plandaten gilt es, die vorliegenden Einzelinformationen zu diskretisieren (Teil a) in Abbildung 7.2).

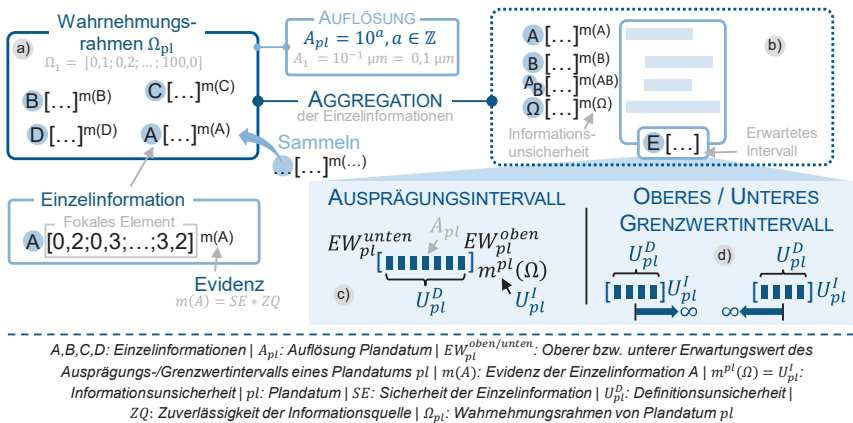


Abbildung 7.2 Modellierung der Informationsgrundlage (Plandaten) i. A. a. REY [REY20]

Modeling of the Information Basis (Planning Data) Referring to REY [REY20]

Für die Diskretisierung wird die **Auflösung**  $A_{pl}$  für jedes **Plandatum**  $pl$  festgelegt mit der die jeweiligen Plandaten ausreichend genau beschrieben werden [REY20, S. 61 ff.]. Beispielsweise wird bei der Modellierung von Produktinformationen für jedes **Merkmal**  $m$  des **Features**  $f$  des betrachteten **Bauteils**  $b$  die Auflösung definiert, mit der das Merkmal  $m$  mit ausreichender Genauigkeit beschrieben wird. Für die

Definition des Mittenrauwerths  $Ra$  eines Merkmals ist bspw. eine Genauigkeit von  $A_{pl} = 10^{-1} \mu m$  realistisch. Die Angabe der Härtemessung nach Rockwell hingegen erfolgt mit einer Auflösung von  $A_{pl} = 10^0 HRC$  [MACH11, S. 74]. Basierend auf der Auflösung wird der **Wahrnehmungsrahmen**  $\Omega_{pl}$  eines Plandatums  $pl$  definiert [REY20, S. 61 ff.] (Teil a) in Abbildung 7.2). BEIERLE et al. definieren den Wahrnehmungsrahmen als Menge aller möglichen und sich gegenseitig ausschließenden Ereignisse [BEIE14, S. 465]. Die über verschiedene Informationsquellen **gesammelten Einzelnformationen** (**A, B, C, ...**) zu den Plandaten stellen Teilmengen des Wahrnehmungsrahmens dar und werden als **fokale Elemente** bezeichnet [REY20, S. 63]. **Potenzielle Informationsquellen** sind bspw. erfahrene Mitarbeitende, Expertinnen und Experten, Fach- und wissenschaftliche Literatur oder Normen. Die Teilmengen liegen nach REY sowohl als einzelne Elemente (fester Wert) oder als Intervall in Form von mehreren Elementen des Wahrnehmungsrahmens vor. Jeder Einzelnformation wird eine Evidenz zugeschrieben. REY definiert die **Evidenz**  $m(A)$  **einer Einzelnformation**  $A$  als Maß an Glauben bzw. Unterstützung exakt dieser Teilmenge. Die Evidenz errechnet sich aus der Multiplikation der zur Einzelnformation angegebenen **Sicherheit** ( $SE$ ) und der **Zuverlässigkeit der Informationsquelle** ( $ZQ$ ). [REY20, S. 63] Anschließend erfolgt die Aggregation der Einzelnformationen eines Plandatums mit Hilfe der Kombinationsregel nach YAGER [REY20, S. 66 ff.] (Teil b) in Abbildung 7.2). Die **kombinierte Evidenz des Wahrnehmungsrahmens**  $m^{pl}(\Omega)$  wird als Maß für die **Informationsunsicherheit**  $U_{pl}^I$  (epistemische Unsicherheit) bzgl. des Plandatums definiert. Die Informationsunsicherheit stelle eine zentrale Steuergröße agiler Serienanläufe dar. Mit Hilfe der Berechnung von Erwartungswerten werden die einzelnen, aus Kombination resultierenden, fokalen Elemente zu einer Gesamtaussage kombiniert. Plandaten liegen somit als alternative Formen als erwartete Grenzwertintervalle (oberes und unteres Grenzwertintervall) oder als erwartete Ausprägungsintervalle (Konkretisierung eines exakten Wertes) vor (Teil c) und d) in Abbildung 7.2). [REY20, S. 72 ff.] Basierend auf den generierten erwarteten Ausprägungs- und Grenzwertintervalle wird mit Hilfe der zuvor definierten Auflösung  $A_{pl}$  die **Definitionsunsicherheit**  $U_{pl}^D$  als Maß für die Genauigkeit der Plandaten definition abgeleitet. Die Definitionsunsicherheit stellt eine weitere zentrale Steuergröße agiler Serienanläufe dar. Zur Ermittlung der Definitionsunsicherheit wird die **Distanz**  $\Delta_{pl}$  zwischen dem oberen und unteren Erwartungswert berechnet, siehe Formel (1)

$$\Delta_{pl} = |EW_{pl}^{oben} - EW_{pl}^{unten}| \quad (1)$$

Die Definitionsunsicherheit wird im Bereich zwischen einer Distanz von Null und einer **maximal zulässigen Distanz**  $\Delta_{pl}^{max}$  von der  $\Delta_{apl}$ -fachen Auflösung  $\Delta_{pl}^{max} = \Delta_{apl} \cdot A_{pl}$  definiert [REY20, S. 92]. Die Grenzen sind so zu wählen, dass in einem sinnvollen Rahmen unsichere Plandaten für den Serienanlauf zugelassen werden (bspw.  $\Delta_{apl} = 10$ ). Anwendende der Methodik können  $\Delta_{pl}^{max}$  auf die spezifische Situation, unter der Bedingung, dass dies für alle Plandaten erfolgt, anpassen. Die Definitionsunsicherheit ergibt sich entsprechend Formel (2).

$$U_{pl}^D = \begin{cases} 1, & \text{für } \Delta_{pl} \geq \Delta_{pl}^{\max} \\ \frac{\Delta_{pl}}{\Delta_{pl}^{\max}}, & \text{für } 0 < \Delta_{pl} < \Delta_{pl}^{\max} \\ 0, & \text{für } \Delta_{pl} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Neben den produkt- und fertigungsprozessbezogenen Plandaten werden wie oben beschrieben die Kostenvariablen, wie geplante Rüstzeitangaben oder geplante Standzeiten und Produktionsmengen, zur Ermittlung der Fertigungs- und Herstellkosten ebenfalls als Plandaten evidenztechnisch modelliert [REY20, S. 104 ff.]. Durch die Kombination verschiedener Plandaten lassen sich mit Hilfe der von REY entwickelten Methodik weitere Informationen im Planungsprozess wie bspw. die Gesamtinformationssicherheit, Robustheit und Planungssicherheit als zentrale Planungskenngrößen generieren [REY20, S. 89]. Die **Gesamtinformationssicherheit**  $GIS_{pl}^p$  beschreibt die Informationssicherheit der Zwischen- und Endzustände eines Bauteilmerkmals in einer Fertigungsfolge unter Berücksichtigung der geforderten und herstellbaren bzw. über die Fertigungsfolge korrigierten Informationssicherheiten [REY20, S. 94 ff.]. Die **Robustheit**  $R_{pl}^p$  beschreibt nach REY das Maß eines (**Handhabungs-)/Fertigungsprozesses**  $p$  auf Änderungen der Produkthanforderungen reagieren zu können [REY20, S. 90]. Die **Planungssicherheit**  $PS^p$  verknüpft diese beiden Planungskenngrößen und wird als Maß definiert, welches die Sicherheit beschreibt, mit der ein Fertigungsprozess auf Basis der im aktuellen Sprint vorliegenden Informationen fähig ist, die geforderten Bauteilzwischenzustände zu fertigen [REY20, S. 98 f.]. Für eine detaillierte Beschreibung der Ermittlung dieser Kenngrößen wird auf die Arbeit von REY verwiesen [REY20, S. 89 ff.].

Prototypen und Validierungsversuche stellen eine zentrale Informationsquelle im agilen Serienanlauf zur Beschaffung realer direkter Informationen zum Produkt und zur Fertigungsfolge sowie aus deren Interaktionssystem dar. Grundvoraussetzung der Modellierung beschaffter Einzelinformationen mittels Evidenztheorie ist die Angabe eines Werts bzw. Wertebereichs und der Informationssicherheit einer Einzelinformation sowie die Vertrauenswürdigkeit bzw. Zuverlässigkeit einer Informationsquelle [REY20]. Da ein Validierungsversuch bzw. ein Prototyp keine direkten Informationen und Angaben über die Sicherheit der erzielten Ergebnisse gibt, gilt es ein Bewertungsmodell der Prototypenevidenz zu entwickeln, mit Hilfe dessen die Integration der Ergebnisse der Validierungs- und Prototypenversuche in die Informationsmodellierung ermöglicht wird. Die Entwicklung des Bewertungsmodells erfolgt im Rahmen des dritten Moduls in Abschnitt 7.3.

### Modellierung der Anlaufperformance von Fertigungs- / Handhabungsprozessen

Das Ziel des Serienanlaufs ist es, die Fertigungsfolge von einem instabilen in einen stabilen Serienbetrieb zu überführen [KIRS08, S. 45]. Aufgrund der methodischen Kombination von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf im agilen Serienanlauf liegen zu Beginn die unsicheren und unvollständigen Informationen als Planungsgrundlage vor (siehe Abschnitt 4.2). Aufgrund der methodischen Kombination ist es

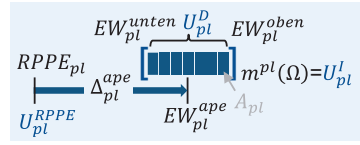
erforderlich, die Erreichung der im vorherigen Abschnitt eingeführten Plandaten durch die Fertigungsfolge zu bewerten. Neben den Fertigungsprozessen gilt es, ebenfalls Handhabungsprozesse in die Betrachtung zu integrieren (siehe Abschnitt 3.1). Die **Anlaufperformance eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses bezogen auf ein Plandatum**  $APE_{pl}$  wird folglich als Fähigkeit eines Fertigungsprozesses bzw. eines Handhabungsprozesses zur sicheren Erreichung des erwarteten Plandatums definiert. Die Anlaufperformance beschreibt, wie gut ein Fertigungs- oder Handhabungsprozess im aktuellen Sprint die angestrebten Plandaten erfüllt und stellt eine weitere zentrale Steuergröße agiler Serienanläufe dar. Wird beispielsweise eine erwartete Rüstzeit von 10 Min (Intervall zwischen 8 und 12 Min) angestrebt und liegt die aktuelle reale Rüstzeit eines Fertigungsprozesses bei 15 Min, wird die Anlaufperformance mit  $APE_{pl} < 1$  bewertet. Wird die erwartete Rüstzeit erreicht, so liegt eine Anlaufperformance von  $APE_{pl} = 1$  vor. Die schematische Ermittlung der Kenngrößen zur Bewertung der Anlaufperformance ist in Abbildung 7.3 gezeigt. In einem ersten Schritt wird die **aktuelle reale Prozessperformance**  $RPPE_{pl}$  eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses des Planungssprints durch einen Abgleich mit dem im Realsprint generierten Realdaten bspw. aus Prototypenversuchen bewertet. Anschließend wird der **Erwartungswert** des erwarteten Grenzwert- oder Ausprägungsintervalls der Plandaten (im Folgenden zusammenfassend als **Plandatumintervall** bezeichnet)  $EW_{pl}^{ape}$  berechnet. Mit Hilfe von Formel (3) wird die **Distanz der Anlaufperformance**  $\Delta_{pl}^{ape}$  zwischen dem erwarteten Plandatum  $EW_{pl}^{ape}$  und der aktuellen realen Prozessperformance  $RPPE_{pl}$  ermittelt.

$$\Delta_{pl}^{ape} = |EW_{pl}^{ape} - RPPE_{pl}| \tag{3}$$

Analog zur Ermittlung der Definitionsunsicherheit im vorangegangenen Abschnitt wird die Distanz auf ein Intervall von Null bis zur maximalen Distanz von der  $\Delta_{apl}$ -fachen Auflösung des Plandatums begrenzt. Die Anlaufperformance wird abschließend mit Hilfe von Formel (4) berechnet.

$$APE_{pl} = \begin{cases} 1, & \text{für } \Delta_{pl}^{ape} \geq \Delta_{pl}^{\max} \\ 1 - \frac{\Delta_{pl}^{ape}}{\Delta_{pl}^{\max}}, & \text{für } 0 < \Delta_{pl}^{ape} < \Delta_{pl}^{\max} \\ 0, & \text{für } \Delta_{pl}^{ape} = 0 \end{cases} \tag{4}$$

**ANLAUFPERFORMANCE VOM FERTIGUNGS-/HANDHABUNGSPROZESS**



- $RPPE_{pl}$ : Reale Prozessperformance von Fertigungs-/Handhabungsprozess  $p$
- $EW_{pl}^{ape}$ : Erwartungswert des Plandatumintervalls für die Ermittlung der Anlaufperformance
- $EW_{pl}^{unten}$ : Unterer Erwartungswert des Intervalls
- $EW_{pl}^{oben}$ : Oberer Erwartungswert des Intervalls
- $U_{pl}^D$ : Definitionsunsicherheit
- $U_{pl}^l$ : Informationsunsicherheit
- $U_{pl}^{RPPPE}$ : Performanceunsicherheit
- $pl$ : Plandatum
- $\Delta_{pl}^{ape}$ : Distanz zwischen der aktuellen Anlaufperformance und dem erwarteten Plandatum

**Abbildung 7.3 Anlaufperformance**  
Ramp-Up Performance

Da die beschafften Informationen zur realen Prozessperformance aufgrund vereinfachter Validierungsversuche ebenfalls unsicherheitsbehaftet sind, werden die gesammelten Informationen zur realen Prozessperformance über die **Performanceunsicherheit**  $U_{pl}^{RPPE}$  modelliert. Die Performanceunsicherheit wird aus der Auswertung der Versuchsdaten ermittelt und stellt ebenfalls eine zentrale Steuergröße agiler Serienanläufe dar. Das Vorgehen zur Auswertung sowie die benötigten formelmäßigen Zusammenhänge werden in Abschnitt 7.3.1 detailliert. Die Performanceunsicherheit wird mit Hilfe der Formel (5) aus der **Sicherheit der Versuchsdaten**  $SE_{pl}^{PT|Spez}$  (Formel (88) bzw. (96)) und der **physischen Vertrauenswürdigkeit des Versuchs**  $PV_{pl}^{PT}$  (Formel (99)) berechnet (siehe Abschnitt 7.3.1).

$$U_{pl}^{RPPE} = 1 - m_{pl}^{PT} = 1 - (SE_{pl}^{PT|Spez} \cdot PV_{pl}^{PT}) \quad (5)$$

Erst mit einer Anlaufperformance von  $APE_{pl} = 1$  bei einer Performanceunsicherheit von  $U_{pl}^{RPPE} = 0$  ist von einer sicheren Erreichung des Plandatums auszugehen.

### Ableitung von Informations- und Anlaufperformancedefiziten (Simulationsgrundlage)

Basierend auf der evidenztechnischen Modellierung der unsicheren und unvollständigen Informationsgrundlage der Plandaten sowie durch Erfassung und Bewertung der realen Prozessperformance wurden im vorherigen Abschnitt die zentralen Steuergrößen Informationsunsicherheit, Definitionsunsicherheit, Anlaufperformance und Performanceunsicherheit hergeleitet. Das Gegenteil zur Performance-/Informations- und Definitionsunsicherheit wird als **Performance-/Informations- und Definitionssicherheit bzw. Genauigkeit**  $S_{pl}^I = 1 - U_{pl}^I$  bzw.  $S_{pl}^D = 1 - U_{pl}^D$  und  $S_{pl}^{RPPE} = 1 - U_{pl}^{RPPE}$  bezeichnet. Ziel ist es, zum Start of Production eine Sicherheit und Anlaufperformance von 1 zu erreichen. Wie eingangs beschrieben, sind Unsicherheiten definiert als Informationsdefizite, welche sich durch geeignete zusätzliche Informationen reduzieren lassen [KLIR06, S. 6 ff.]. Liegt eine Unsicherheit bezüglich eines Plandatums vor, so resultiert ein Informationsdefizit. Ein **Informationsdefizit**  $ID_i$  mit  $i \in I$  ( $I$  bezeichnet die Menge aller Defizite) beschreibt somit im Folgenden ein Maß für die Höhe einer vorliegenden Unsicherheit aufgrund fehlender Informationen, welche es durch systematisch Informationsbeschaffung zu Reduzieren gilt, siehe Formel (6).

$$ID_i = U_{pl}^u \text{ mit } u \in \{I, D\} \quad (6)$$

Zur späteren Differenzierung der Defizite in der Priorisierung (siehe Abschnitt 7.2.1) wird ein Informationsdefizit  $i$  durch den **Index P** für ein Informationsdefizit basierend auf einer Produktunsicherheit (Endzustand) oder dem **Index FF** für ein Informationsdefizit basierend auf einer Prozessunsicherheit der Fertigungsfolge ergänzt. Im Folgenden wird zur einfacheren Lesbarkeit auf eine durchgehende Indexierung verzichtet, da die entwickelten Schritte und Zusammenhänge unabhängig für jedes Informationsdefizit gelten. Da sowohl aus den Plandaten der geforderten Bauteilmerkmale als auch aus den modellierten Endzuständen der Fertigungshistorie

Informationsdefizite resultieren, welche sich auf dasselbe Plandatum beziehen, sind diese im Folgenden als Redundant zu betrachten. Dabei besteht die Möglichkeit die Reduzierung des Informationsdefizits aus der Produktsicht und somit über die Produktanforderungen, als auch aus der Fertigungssicht und somit über die Endzustände zu steuern. Wird beispielsweise ein Informationsdefizit eines Endzustands in der Fertigungsmodellierung reduziert, so reduziert sich automatisch das Informationsdefizit des entsprechenden Bauteilmerkmals in der Produktmodellierung. Grundlage der Reduzierung von Informationsdefiziten stellt in der vorliegenden Arbeit die fertigungsorientierte Sichtweise dar. Durch das gezielte Sammeln von Informationen im agilen Serienanlauf wird darauf abgezielt, die Informationsdefizite zu adressieren und systematisch zu reduzieren. Liegt kein Informationsdefizit mehr vor, so sind alle notwendigen Plandaten mit ausreichender Genauigkeit und Sicherheit beschrieben.

Entgegen dem Informationsdefizit resultiert ein **Anlaufperformancedefizit**  $PD_i$  mit  $i \in I$  ( $I$  bezeichnet die Menge aller Defizite) aus der Abweichung der realen Prozessperformance bezogen auf das zu realisierende Plandatum ( $APE_{pl} < 1$ ), siehe Formel (7). Zur Reduzierung von Anlaufperformancedefiziten wird in der vorliegenden Arbeit die Annahme zugrunde gelegt, dass durch die physische Fertigung von Prototypen und Durchführung von Validierungsversuchen, Lerneffekte genutzt werden, um die Performance in Richtung des zu adressierenden Plandatums zu steigern. Performanceunsicherheiten werden durch das Treffen von Entscheidungen und die Steigerung verknüpfter Reifegrade indirekt reduziert. Ein direkter Zusammenhang ergibt sich ebenfalls aus der Nutzung von Lerneffekten aus der Durchführung von Prototypen- und Validierungsversuchen, um die Prozessstreuung und Instabilitäten zu reduzieren.

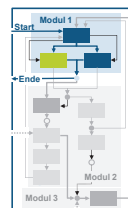
$$PD_i = \begin{cases} 1 - APE_{pl}, & \text{aus der Anlaufperformance} \\ U_{pl}^{RPPE}, & \text{aus der Performanceunsicherheit} \end{cases} \quad (7)$$

Hieraus ergibt sich, dass sich Performancedefizite ausschließlich durch den Einsatz von Prototypen und die Durchführung von Validierungsversuchen reduzieren lassen. Da die Methodikschritte für Informations- und Anlaufperformancedefizite identisch sind, wird zur einfacheren Lesbarkeit der Methodik im Folgenden auf eine Differenzierung zwischen Informations- und Performancedefiziten verzichtet und übergreifend als **Defizit**  $D_i$  bezeichnet.

### 7.1.2 Identifikation, Bewertung und Priorisierung von Restentwicklungsumfängen

#### *Identification, Evaluation and Prioritization of Residual Development Efforts*

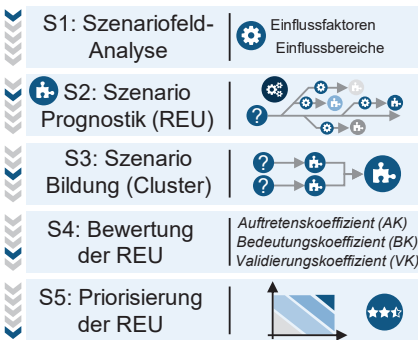
Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben lassen sich Restentwicklungsumfänge im Serienanlauf auf nicht erkannte Probleme in den dem Serienanlauf vorgelagerten Phasen [PÖSC21, S. 7], eine unzureichende Kommunikation betroffener Unternehmensbereiche (Informations- und Wissensdefizite/ Schnittstellenproblematik) [MONE11, S. 193 ff.] sowie eine unzureichende Produkt- und Prozessreife zum SOP



zurückführen [TÜCK10, S. 35]. Im agilen Serienanlauf wird die Problematik durch die unsichere Planungsgrundlage, Instabilitäten der Fertigungsfolgen sowie einer nicht erreichten Anlaufperformance zusätzlich verstärkt. Ziel des Methodikschritts ist es daher, potenzielle zukünftige Restentwicklungsumfänge systematisch zu identifizieren, deren Auswirkung und Bedeutung zu bewerten und entsprechend der Bewertung für eine gezielte und effiziente Informationsbeschaffung und Steigerung der Anlaufperformance zu priorisieren.

Dem Vorgehen liegt folgende Hypothese zu Grunde:

Jedes Informations- und Anlaufperformancedefizit resultiert in dem Risiko potenziell mindestens einen Restentwicklungsumfang zu verursachen, dem durch das Einholen von Informationen und der Durchführung von Prototypen- und Validierungsversuchen im Entwicklungsprozess entgegengewirkt wird.



**Abbildung 7.4** Vorgehen zur Identifikation, Bewertung und Priorisierung von Restentwicklungsumfängen

*Steps for the Identification, Evaluation and Prioritization of Residual Development Efforts*

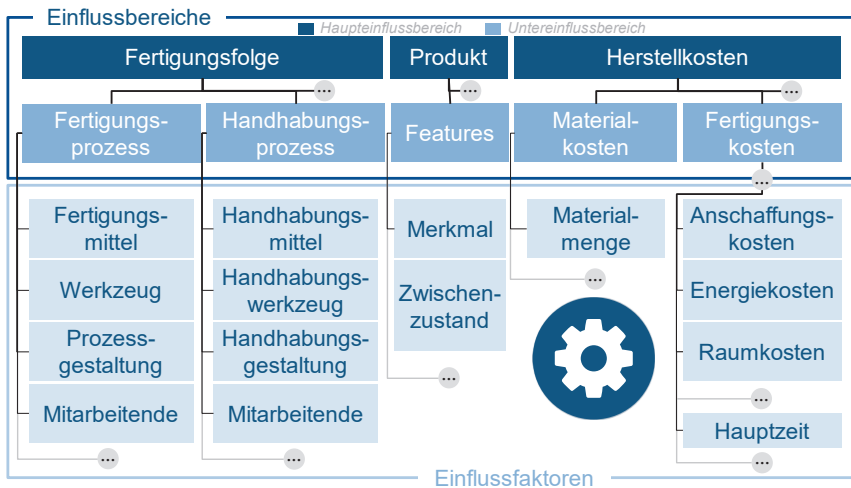
**Restentwicklungsumfänge (REU)** stellen potenzielle in der Zukunft liegende Auswirkungen bzw. Ereignisse als Folge der Defizite dar und lassen sich als Szenarien betrachten. Das Vorgehen zur Identifikation, Bewertung und Priorisierung von Restentwicklungsumfängen folgt somit der Grundstruktur der Szenariotechnik und ist schematisch in Abbildung 7.4 dargestellt. Ein Szenario ist eine verständliche Beschreibung einer potenziellen und in der Zukunft liegenden Situation, die auf verschiedenen Einflussfaktoren basiert. Es stellt eine mögliche Entwicklung dar, die von der gegenwärtigen Situation zu dieser zukünftigen Situation führen könnte. [GAUS16, S. 2] Ziel

der Szenariotechnik ist es, alternative Entwicklungsmöglichkeiten der Umwelt systematisch zu erfassen und durch gezielte schrittweise Aufteilung Strategien abzuleiten [REIM22, S. 585]. Die Szenariotechnik basiert auf den fünf Schritten (1) Szenariofeld-Analyse, (2) Szenario Prognostik, (3) Szenario Bildung, (4) Szenario Bewertung und (5) Konsequenzanalyse [BAUE21, S. 8 ff.].

### S1 – Szenariofeld-Analyse (Identifikation von Einflussbereichen/-faktoren)

Im ersten Schritt (S1) erfolgt die Entwicklung des Einflusssystems von Defiziten. Das **Einflussystem** umfasst die Einflussbereiche und Einflussfaktoren, welche potenziell ursächlich für die Entwicklung zukünftiger Szenarien und somit für das Auftreten von Restentwicklungsumfängen im agilen Serienanlauf sind (Abbildung 7.5). Als **Einflussbereich** werden die Interaktionssysteme (z. B. Fertigungsfolge und Produkt) des Szenariofeldes "agiler Serienanlauf" definiert. **Einflussfaktoren** beschreiben im

Folgenden spezifische Akteure der Interaktionssysteme (z.B. Fertigungsmittel oder Werkzeug einer Fertigungsfolge) lassen sich als Schnittstellen der Einflussbereiche (Werkzeug-Komponenten-Interaktion) interpretieren. [GAUS16, S. 3 .f]



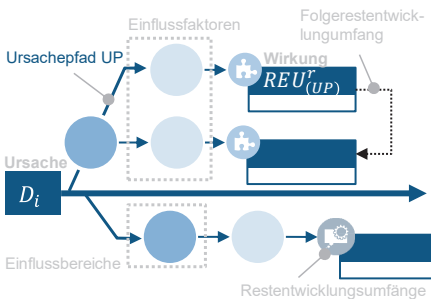
**Abbildung 7.5** Definition von Einflussbereichen und Einflussfaktoren

*Definition of Areas of Influence and Influencing Factors*

Insbesondere die Einflussfaktoren stellen zentrale Faktoren dar, die es in Hinblick auf das Auftreten potenzieller zukünftiger Restentwicklungsumfänge auf Basis verschiedener Defizite zu analysieren gilt. Im Rahmen der Methodik wurde ein Modell entwickelt, das die systematische Identifikation wichtiger Einflussbereiche und Einflussfaktoren agiler Serienanläufe ermöglicht. Der in Abbildung 7.5 gezeigte Ausschnitt des Modells erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da die jeweilige Anlaufsituation gesondert analysiert werden muss. Es besteht daher die Möglichkeit, das Einflusssystem entsprechend der bestehenden Anlaufsituation anpassen. Einflussbereiche lassen sich strukturell in Haupt- und Untereinflussbereiche aufteilen, wobei Untereinflussbereiche eine Teilmenge des Haupteinflussbereichs darstellen. Potenzielle Haupteinflussbereiche im agilen Serienanlauf sind die Fertigungsfolge, das Produkt und die Herstellkosten. Der Haupteinflussbereich Fertigungsfolge wird in die Untereinflussbereiche Fertigungsprozess und Handhabungsprozess unterteilt. Der Haupteinflussbereich Produkt lässt sich weiter in die Untereinflussbereiche Feature und Werkstoff aufteilen. Den Einflussbereichen werden anschließend deren Einflussfaktoren zugeordnet. Beispielsweise wird dem Einflussbereich Fertigungsprozess die Einflussfaktoren Fertigungsmittel, Werkzeug, Prozessgestaltung und Mitarbeitende zugeschrieben. Mit dem Einflusssystem wird Anwendenden somit ein Werkzeug an die Hand gegeben, die Auswirkungen der Defizite für die weitere Anwendung der Methodik systematisch zu erfassen. Das Einflusssystem stellt somit die strukturelle Grundlage für den nachfolgenden Schritt zur Identifikation der Restentwicklungsumfänge dar.

## S2 – Szenario Prognostik (Identifikation von Restentwicklungsumfängen)

Die Identifikation potenzieller und zukünftiger Restentwicklungsumfänge stellt ein zentrales Element agiler Serienanläufe zur Reduktion von plötzlich auftretenden und unvorhergesehenen Änderungsaufwänden dar. Ziel des zweiten Schritts (S2) ist es, die Auswirkungen vorliegender Defizite (Ursache) im Hinblick auf das Verursachen bzw. Auftreten von Restentwicklungsumfängen (Wirkung) zu analysieren. Das Ursache-Wirkungsdiagramm (Ishikawa-Diagramm), welches von KAORU ISHIKAWA entwickelt wurde, ist ein etabliertes Verfahren zur Kategorisierung und Visualisierung sowie zur Analyse von Ursachen auf bestimmte Probleme oder deren Auswirkungen [KERN09].



$D_i$ : Defizit  $i$  (Informations- / Anlaufperformancedefizit)  
 $REU_{(UP)}^r$ : Restentwicklungsumfang  $r$  nach Ursachepfad  $UP$

**Abbildung 7.6** Strukturmodell zur Identifikation potenzieller zukünftiger Restentwicklungsumfänge

*Structural Model for the Identification of Potential Future Residual Development Efforts*

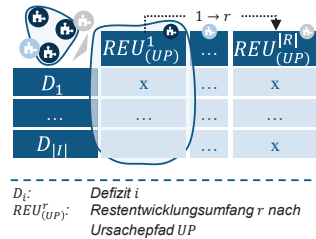
Die Ursachen lassen sich mit Hilfe des in Abschnitt 7.1.1 entwickelten Vorgehens in Form von Defiziten ermittelt. Daher gilt es im Folgenden, deren Wirkung durch REU zu modellieren. Das folgende Strukturmodell zur Analyse der Wirkung und somit zur Identifikation von Restentwicklungsumfängen folgt der rekursiven Grundstruktur des Ishikawa-Diagramms. Der schematische Aufbau des Strukturmodells ist in Abbildung 7.6 gezeigt. Eine detaillierte Ausführung ist in Abbildung A 1 (Anhang A.1) zu finden. Basierend auf den Defiziten  $D_i$  (Ursache) werden die in S1 definierten Einflussbereiche sowie deren Einflussfaktoren als Ursachepfade modelliert. Zur systematischen Ableitung

potenzieller zukünftiger REU wird jeder Ursachenpfad für ein Defizit durchlaufen und mit Hilfe von Szenariotechniken vorhergesagt, welche zukünftigen Umweltzustände bei den Einflussfaktoren auftreten bzw. welche Auswirkung die Defizite auf den Einflussfaktor haben. Diese zukünftigen Umweltzustände werden als Restentwicklungsumfänge  $REU_{(UP)}^r$  mit  $r \in R$  bezeichnet.  $R$  Bezeichnet die Menge aller potenziellen Restentwicklungsumfänge. Dabei ist es möglich, dass ein Defizit  $D_i$  ursächlich für das Auftreten mehrerer Restentwicklungsumfänge ist. Liegt beispielsweise eine unsichere Information und somit ein Defizit in der Dimensionierung eines Bauteils vor, so resultiert dies unter Umständen in einer fehlerhaften Kalkulation der benötigten Materialmenge (Kostenfehlkalkulation), einer Anpassung des Werkzeugs eines Handhabungsprozesses oder auch in einer Anpassung der Prozessgestaltung eines Fertigungsprozesses. Führt ein Restentwicklungsumfang zu einem Folgerestentwicklungsumfang eines anderen Einflussfaktors (der Kauf eines neuen Werkzeug bedingt eine zusätzliche Schulung der Mitarbeitenden), wird dies durch eine Querverbindung im Strukturmodell modelliert. Aufgrund der Vielzahl an REU besteht die Möglichkeit, dass

aus unterschiedlichen Defiziten dieselben oder sehr ähnliche Restentwicklungsumfänge resultieren. Daher gilt es, im nächsten Schritt identifizierte REU zu clustern.

### S3 – Szenario Bildung (Clustering von REU)

Ziel des dritten Schritts (S3) ist es, eine systematische und strukturiert Clustering der Restentwicklungsumfänge zu ermöglichen. Hierzu werden zunächst die in Abschnitt 7.1.1 identifizierten Defizite zeilenweise in der Cluster-Matrix aufgetragen (Abbildung 7.7). Anschließend werden die in S2 identifizierten REU spaltenweise aufgetragen. Dabei gilt es zu beachten, dass dieselben REU jeweils nur einmal in die Spalten eingetragen werden. Abschließend werden den  $REU_{(UP)}^r$  alle in S2 identifizierten ursächlichen Defizite  $D_i$  durch den Eintrag „x“ zugeordnet. Zeilenweise wird so deutlich, für welchen REU ein Defizit ursächlich ist. Eine spaltenweise Auswertung der Matrix beschreibt, welche Defizite potenziell ursächlich für einen REU sind.



**Abbildung 7.7 Cluster-Matrix der Restentwicklungsumfänge**

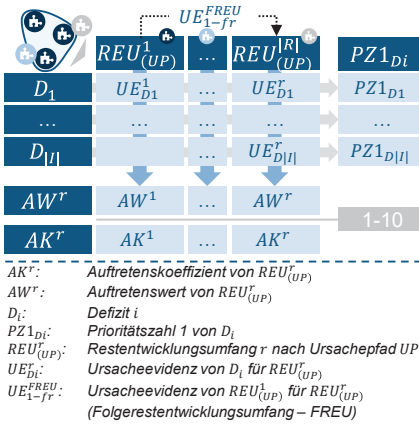
*Cluster Matrix of Residual Development Efforts*

### S4 – Szenario Bewertung (Bewertung der Restentwicklungsumfänge)

Nachdem die Cluster-Matrix die Identifikation von Ursache-Wirkbeziehungen zwischen Defiziten und dem Auftreten der REU ermöglicht, gilt es diese hinsichtlich ihrer Relevanz für den agilen Serienanlauf zu bewerten. Die Relevanzbewertung basiert auf der Analyse des Risikos, welches mit einem Restentwicklungsumfang einher geht. Eine etablierte Methode zur Risikobewertung ist die Bewertung der Risikoprioritätszahl der Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA). Das Risiko ist definiert als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit, Schadensausmaß und  $1 -$  Entdeckungswahrscheinlichkeit. [TIET20, S. 9] Entsprechend der Risikobewertung lassen sich die REU über die drei Faktoren Auftretenskoeffizient, Bedeutungskoeffizient und Validierungskoeffizient bewerten. Die Koeffizienten werden im Folgenden detailliert beschrieben.

#### Auftretenskoeffizient

Der **Auftretenskoeffizient** ( $AK^r$ ) wird als skaliertes Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit definiert, dass ein Restentwicklungsumfang im agilen Serienanlauf basierend auf der Simulationsgrundlage auftritt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines REUs hängt von der vorherrschenden Unsicherheit bezüglich der Plandaten und der Anlaufferformance der Fertigungsfolge (Defizite) ab. Da nicht jedes Defizit eines REU dieselbe Bedeutung für das Auftreten des REU hat, gilt es zunächst, die Ursacheevidenz eines Defizits für das Auftreten eines REU zu ermitteln. Die **Ursacheevidenz** ( $UE_{D_i}^r$ ) beschreibt folglich ein Maß eines Defizits, unabhängig von dessen Ausprägung, ursächlich bzw. entscheidend für das Auftreten eines REU zu sein. Grundlage der Bewertung stellt die Cluster-Matrix aus S3 (Abbildung 7.7) dar. Durch das Sammeln und



**Abbildung 7.8** Ermittlung des Auftretenskoeffizienten und der Prioritätszahl PZ1

*Determination of the Occurrence Coefficient and the Priority Number PZ1*

Aggregieren von Informationen mittels Evidenztheorie analog zur Modellierung von Unsicherheiten (Plandaten) in Abschnitt 7.1.1 wird für jede Ursacheposition (Eintrag „x“ in der Cluster-Matrix) die Ursachevidenz  $UE_{D_i}^r$  des Defizits  $D_i$  sowie die **Ursachevidenz**  $UE_{r-fr}^{FREU}$  eines Restentwicklungsumfangs  $r \in FR$  für das Auftreten **eines Folgerestentwicklungsumfangs** ( $fr \in FR$ ) ermittelt (Abbildung 7.8). Basierend auf den ermittelten Ursachevidenzen und Defiziten wird mit Hilfe der Formel (8) der Auftretenswert  $AW^r$  ermittelt. Der **Auftretenswert**  $AW^r$  ist eine Zwischengröße zur Ermittlung des Auftretenskoeffizienten  $AK^r$  und bezeichnet analog ein Maß für die Höhe der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Restentwicklungsumfangs in Abhängigkeit der ursächlichen Defizite und deren Ursachevidenzen.

In Anlehnung an die Ermittlung der Risikoprioritätszahl der Risikobewertung einer FMEA wird der Auftretenswert  $AW^r$  zur weiteren Verwendung auf eine Skala von 1 – 10 skaliert, siehe Formel (9) [TIET20, S. 45]. Der skalierte Auftretenswert  $AW^r$  wird im Folgenden als Auftretenskoeffizient  $AK^r$  bezeichnet.

$$AW^r = \sum_{i=1}^I (D_i \cdot UE_{D_i}^r) + \sum_{fr=1}^{FR} (AW^{fr} \cdot UE_{fr-r}^{FREU}) \tag{8}$$

$$AK^r = Rd \left( (10 - 1) \cdot \frac{AW^r - AW_{min}}{AW_{max} - AW_{min}} + 1 \right) \tag{9}$$

**Bedeutungskoeffizient**

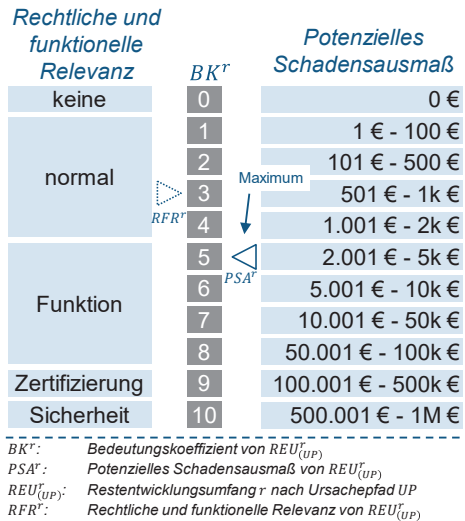
Der **Bedeutungskoeffizient**  $BK^r$  eines Restentwicklungsumfangs  $REU_{(UP)}^r$  beschreibt die Relevanz bzw. den Einfluss des Auftretens eines REU. Tritt ein Restentwicklungsumfang auf, so entstehen beispielsweise zusätzliche Kosten für Neuinvestitionen, Reparatur- oder Umbaumaßnahmen, aber auch durch die Verzögerung des Serienanlaufs durch Unterbrechungen des Serienanlaufs zur Behebung des REU. Daher gilt es, zunächst den Einfluss aus dem potenziellen monetären Schaden, der durch die Beseitigung bzw. das Auftreten des REU entsteht abzuleiten. Zur Bewertung des **potenziellen Schadensmaßes** ( $PSA^r$ ) wird vom Anwendenden der Methodik eine zehnstufige Schadensskalierung definiert. Abbildung 7.9 zeigt eine beispielhafte Aufteilung der Skalierung zwischen 0 € und 1 Mio. €. Die Schadensskalierung ist frei wählbar und im Vorhinein vom Anwendenden zu definieren sowie für alle REU

gleichermaßen anzuwenden. Anschließend wird vom Anwendenden das potenzielle Schadensausmaß aus der Summe aller potenziell anfallenden Kosten gebildet und entsprechend der Skalierung der Faktor  $PSA^r$  für die Bewertung des potenziellen Schadensausmaßes eines Restentwicklungsumfangs identifiziert.

Neben der Verursachung des monetären Schadens gilt es, den Einfluss aus der **rechtlichen und funktionellen Relevanz  $RFR^r$**  ursächlicher Defizite und somit des Restentwicklungsumfangs zu prüfen. Die rechtliche und funktionelle Relevanz basiert auf der in der DIN ISO/TS 16949 definierten Modellierung besonderer Merkmale zur Erfüllung aller (kritischen Kunden-) Anforderungen einschließlich rechtlicher Aspekte. **Besondere Merkmale** sind definiert als Produktmerkmale oder Prozessparameter mit Auswirkung auf die Weiterverarbeitung, die Leistung, die Funktion und Passform sowie auf die Sicherheit des Produkts und dessen Einhaltung von Vorschriften [DIN ISO/TS09]. In Anlehnung an die Modellierung und Bewertung besonderer Merkmale in der Automobilindustrie lässt sich die **rechtliche und funktionelle Relevanz eines Defizits  $RFR_{Di}$**  in die Kategorien keine Relevanz, normale Relevanz, Funktionsrelevanz (erhöhte Gewährleistungskosten bei Abweichung), Zertifizierungsrelevanz (Produktrückruf oder Vermarktungsstopp bei Abweichung) und Sicherheitsrelevanz (Anklage durch Gefahr von Leib und Leben) einteilen [VERB20].

Liegt ein Defizit vor, welches aus einem sicherheitsrelevanten Bauteilmerkmal oder Fertigungsprozess resultiert, so wird die rechtliche und funktionelle Relevanz des Defizits mit  $RFR_{Di} = 10$  bewertet. Zertifizierungsrelevante Defizite werden mit  $RFR_{Di} = 9$  und funktionsrelevante situationsbedingt im Bereich von  $RFR_{Di} = 8$  bis  $RFR_{Di} = 5$  bewertet. [SCHL16, S. 9] Liegt ein Defizit vor, welches zwar weder funktions-, zertifizierungs- noch sicherheitsrelevant ist, gleichzeitig aber eine gewisse Wichtigkeit bspw. für die Kundenzufriedenheit aufweist, erfolgt die Bewertung situationsspezifisch im Bereich  $RFR_{Di} = 4$  bis  $RFR_{Di} = 1$ . Die rechtliche und funktionelle Relevanz eines  $REU_{(UP)}^r$  ergibt sich gemäß Formel (10) aus dem Maximum der rechtlichen und funktionellen Relevanz der für den Restentwicklungsumfang  $r$  ursächlichen Defizite.

Für die abschließende Bewertung des Bedeutungskoeffizienten  $BK^r$  wird das Maximum aus der rechtlichen und funktionellen Relevanz sowie dem potenziellen



**Abbildung 7.9 Ermittlung des Bedeutungskoeffizienten**

*Determination of the Importance Coefficient*

Schadensausmaß gebildet, siehe Formel (11). Hierdurch wird sichergestellt, dass die maximale Relevanz (der maximale Einfluss) eines Restentwicklungsumfangs in die Priorisierung einbezogen wird.

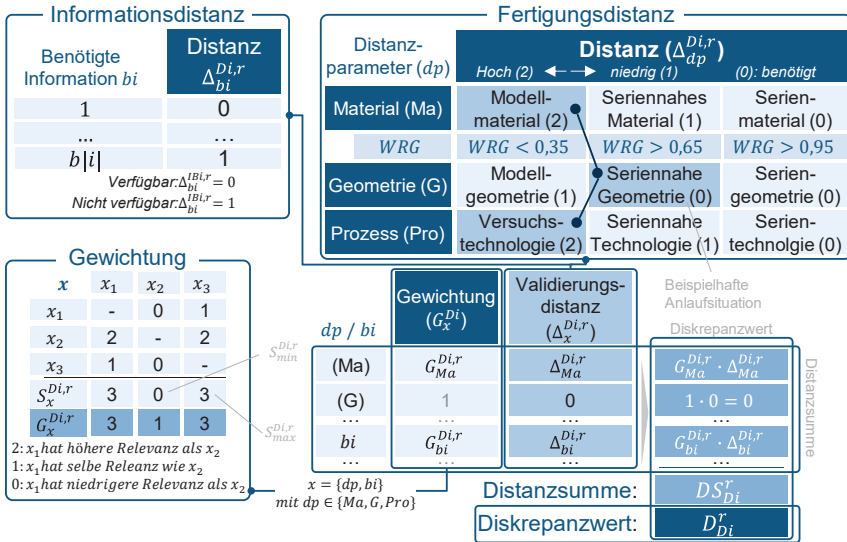
$$RFR^r = \max[RFR_{Di}]_r \quad (10)$$

$$BK^r = \max[PSA^r; RFR^r] \quad (11)$$

### Validierungskoeffizient

Der **Validierungskoeffizient  $VK^r$**  beschreibt die Möglichkeit der Validierung eines Restentwicklungsumfangs in Abhängigkeit vom aktuellen Entwicklungsstand und beschreibt ein Maß für die Sinnhaftigkeit der Defizitadressierung im Sprint unter Berücksichtigung der vorliegenden Anlaufsituation. Ist bspw. die Distanz zwischen dem für eine sinnvolle und effektive Validierung bzw. Reduzierung benötigten Soll-Entwicklungsstand im Serienanlauf und dem tatsächlichen Ist-Entwicklungsstand zu groß, liegt es nahe, dass beschaffte Informationen bzw. die durchgeführte Validierung unter Umständen zu unbrauchbaren oder sogar fehlerhaften Informationen führen. Daher gilt es REU bzw. Defizite mit niedrigen Distanzen den REU bzw. Defiziten mit hohen Distanzen in der Reduzierung von Defiziten vorzuziehen. Da, wie in S3 (Abschnitt 7.1.2) beschrieben, die Defizite ursächlich für verschiedene Restentwicklungsumfänge sein können, wird die Analyse der Distanz für jedes Defizit eines Restentwicklungsumfangs separat durchgeführt und im Hinblick auf die Validierung des jeweiligen Restentwicklungsumfangs bewertet. Grundlage bildet die Cluster-Matrix (Abbildung 7.7). Zunächst wird hierzu die aktuelle Anlaufsituation bewertet, indem der Validierungsabstand zwischen dem Sollzustand und der aktuellen Anlaufsituation modelliert und analysiert wird. Dazu werden zum einen über den **Validierungsabstand  $\Delta_{dp}^{Di,r}$**  der **Distanzparameter  $dp$**  Material, Geometrie und Prozess die Fertigungsdistanz zum anderen die Distanz der Verfügbarkeit benötigter Informationen  $\Delta_{bi}^{Di,r}$  (**Informationsdistanz**) bewertet (Abbildung 7.10). Um die Informationsverfügbarkeit zu bewerten, wird analysiert, ob die erforderlichen Informationen zur Validierung des Defizits vollständig verfügbar sind. Ist die Information verfügbar, wird die Validierungsdistanz mit  $\Delta_{bi}^{Di,r} = 0$  bewertet, ist die Information nicht verfügbar, wird die Distanz mit  $\Delta_{bi}^{Di,r} = 1$  bewertet. Die Bewertung der Fertigungsdistanz erfolgt basierend auf den Distanzparametern Material, Geometrie und Prozess. Zur Bewertung der Distanzparameter  $dp$  werden diese in die Distanzkategorien hoch, niedrig und benötigt unterteilt. Einer hohen Distanz wird ein Distanzwert von  $\Delta_{dp}^{Di,r} = 2$  und einem niedrigen Abstand  $\Delta_{dp}^{Di,r} = 1$  zugeordnet. Zur dynamischen, algorithmusbasierten Bewertung der Validierungsdistanzen werden mit den Distanzparametern Statusparameter (Reifegradvariablen) verknüpft. Die Ermittlung der Materialdistanz erfolgt über den Werkstoffreifegrad (siehe Abbildung 7.10). Die Ermittlung der Geometriedistanz erfolgt über Verknüpfung des Produktreifegrads. Die Bewertung des Distanzparameters Fertigung erfolgt über die direkte Analyse des Prozessstatus (Einsatz von Versuchswerkzeug und Versuchstechnologie bzw. Serienwerkzeug und Serientechnologie sowie deren Kombinationen). Ist der für die

Validierung notwendige Status gegeben, wird die Bewertung auf  $\Delta_{dp}^{Di,r} = 0$  gesetzt. Die Auswahl der Distanzparameter erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und stellt das Minimum der zu berücksichtigenden Parameter dar. Je nach Anwendungsfall besteht die Möglichkeit, weitere Parameter hinzuzufügen. Die folgende Auswertungslogik ist unabhängig von der Anzahl der Parameter.



$bi$ : Benötigte Information |  $D_{bi}^{Di}$ : Diskrepanzwert von  $D_i$  von  $REU_{(UP)}$  |  $DS_{Di}^r$ : Distanzsumme von  $D_i$  von  $REU_{(UP)}$  |  $G_x^{Di,r}$ : Gewichtung der Distanz |  $REU_{(UP)}^r$ : Restentwicklungsumfang  $r$  nach Ursachepfad  $UP$  |  $WRG$ : Werkstoffefizientgrad |  $S_{max}^{Di,r}$ : Maximale Gewichtungssumme der Distanz |  $S_{min}^{Di,r}$ : Minimale Gewichtungssumme der Distanz |  $S_x^{Di,r}$ : Gewichtungssumme der Distanz |  $\Delta_x^{Di,r}$ : Informations-( $bi$ ) / Fertigungsdistanz ( $dp$ ) |

Abbildung 7.10 Ermittlung des Validierungskoeffizienten

Determination of the Validation Coefficient

Die Auswertung basiert auf dem Prinzip des morphologischen Kastens. Der morphologische Kasten gilt als Kreativtechnologie der konstruktiven Systementwicklung und erlaubt die systematisch Bildung von Lösungen basierend auf einer Vielzahl bekannter Ausprägungen zu erfüllender Einzelfunktionen [FLE16, S. 4]. Anschließend werden die Diskrepanzwerte  $D_{Di}^r$  ermittelt. Der **Diskrepanzwert**  $D_{Di}^r$  bezeichnet ein Maß für die gewichtete Distanz des Defizits  $D_i$  zur Validierung eines Restentwicklungsumfangs  $r$  zwischen Soll- und Ist-Entwicklungsstand. Hierzu werden die zuvor ermittelten Distanzen ( $\Delta_{dp}^{Di,r}$ ;  $\Delta_{bi}^{Di,r}$ ) zunächst hinsichtlich ihrer Validierungsrelevanz mit Hilfe der Methode des Paarweisen Vergleichs gewichtet (Abbildung 7.10) [BINN16, S. 43 ff.]. Der **Gewichtungsfaktor**  $G_x^{Di}$  ergibt sich aus Anwendung der Formel (12).  $G_{max}$  bezeichnet den Maximalwert der Gewichtung,  $S_{min}^{Di,r}$  und  $S_{max}^{Di,r}$  jeweils die minimale und maximale Gewichtungssumme. Anschließend wird die **Distanzsumme**  $DS_{Di}^r$

ermittelt. Hierzu werden die Distanzen eines Defizits mit der jeweiligen Gewichtung kombiniert summiert, siehe Formel (13).

$$G_x^{Di,r} = \left[ (G_{max} - 1) \cdot \frac{S_x^{Di,r} - S_{min}^{Di,r}}{S_{max}^{Di,r} - S_{min}^{Di,r}} + 1 \right] \text{ mit } x \in \{dp, bi\} \quad (12)$$

$$DS_{Di}^r = \sum_{x=\{dp,bi\}} \Delta_x^{Di,r} \cdot G_x^{Di,r} \quad (13)$$

Basierend auf der ermittelten Distanzsumme  $DS_{Di}^r$  lässt sich der Diskrepanzwert  $D_{Di}^r$  eines Restentwicklungsumfangs im Vergleich zur maximal möglichen Distanz mit Hilfe der Formel (14) berechnen.

$$D_{Di}^r = \frac{DS_{Di}^r}{\sum_{dp=\{Ma,G,P\}} G_{dp}^{Di,r} \cdot 2 + \sum_{bi=1}^{BI} G_{bi}^{Di,r} \cdot 1} \quad (14)$$

Der **mittlere Diskrepanzwert**  $MD_{Di}$  eines Defizits über der **Anzahl der von  $D_i$  beeinflussten Restentwicklungsumfänge**  $ABER_{Di}$  beschreibt ein Maß für die Validierungsfähigkeit eines Defizits und wird im Folgenden als Bewertungsgröße für die Priorisierung der Defizite herangezogen, siehe Formel (15).

$$MD_{Di} = \frac{\sum_{r=1}^R D_{Di}^r}{ABER_{Di}} \quad (15)$$

Durch die mit der Ursachevidenz  $UE_{Di}^r$  kombinierte Summierung aller Diskrepanzwerte der ursächlichen Defizite eines Restentwicklungsumfangs  $D_{Di}^r$  wird unter Anwendung der Formel (16) der **Validierungswert eines Restentwicklungsumfangs**  $VW^r$  ermittelt.

$$VW^r = \frac{\sum_{i \in I} UE_{Di}^r \cdot D_{Di}^r}{\sum_{i \in I} UE_{Di}^r} \quad (16)$$

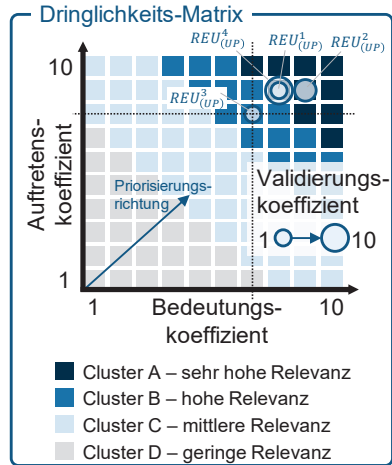
Analog zur Bewertung des Auftretenskoeffizienten  $AK^r$  wird der Validierungskoeffizient  $VK^r$  durch Skalierung des Validierungswerts  $VW^r$  auf ein Intervall von eins bis zehn mit Hilfe der Formel (17) ermittelt.

$$VK^r = 10 - \left[ (10 - 1) \cdot \frac{VW^r - VW_{min}}{VW_{max} - VW_{min}} \right] \quad (17)$$

### S5 – Konsequenzanalyse (Priorisierung der Restentwicklungsumfänge)

Ziel der vorangegangenen Schritte (S1-S4) war es, basierend auf der unsicheren und unvollständigen Simulationsgrundlage sowie einer unzureichenden Anlaufperformance (Defizite) potenzielle, zukünftige Restentwicklungsumfänge (Szenarien) zu identifizieren und zu bewerten. Die Reduzierung von Restentwicklungsumfängen und somit von Defiziten zur Reduzierung von Unsicherheiten und Steigerung der Anlaufperformance erfolgt durch systematische Informationsbeschaffung und Performancesteigerung. Da dies mit Zeit und Kosten verbunden ist und in einem Sprint nur begrenzte Kapazitäten zur Verfügung stehen, ist es nicht möglich, alle Defizite

gleichzeitig zu bearbeiten. Daher ist es notwendig, die Defizite zu priorisieren und somit eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der zu beschaffenden Informationen bzw. zu steigernden Anlaufperformance zu schaffen. Zur Priorisierung wird zunächst die Rangfolge der Restentwicklungsumfänge festgelegt. Ziel ist es, Restentwicklungsumfänge mit einer hohen Auftretenswahrscheinlichkeit, einer hohen Bedeutung (Einfluss) für den Serienanlauf oder welche gut zu validieren sind entsprechend höher zu gewichten als REUs mit einer niedrigeren Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. Bedeutung oder schlechteren Validierungsmöglichkeit (Abbildung 7.11). In der Entscheidungstheorie wird bei multikriteriellen Entscheidungsproblemen die Dominanzanalyse als Entscheidungsgrundlage für die Rangfolgebildung bzw. Reduzierung der Menge zu untersuchender Alternativen (Auswahlentscheidung) beim Vergleich mehrerer Alternativen eingesetzt [YOON95, S. 17 f.]. Eine Alternative  $A_1$  dominiert eine Alternative  $A_2$  (absolut) formal dann, wenn sie in einer oder mehreren Zielgrößen besser und in allen verbleibenden Zielgröße mindestens gleichwertig ist. Ist eine Alternative  $A_1$  in allen Zielgrößen mindestens gleichwertig mit Alternative  $A_2$  wird dies als Zustandsdominanz bezeichnet. [LAUX14b, S. 98 f.] Zielgrößen zur Priorisierung von REU im agilen Serienanlauf stellen die in S4 ermittelten Bewertungsgrößen Auftretenskoeffizient  $AK^T$ , Bedeutungskoeffizient  $BK^T$  und Validierungskoeffizient  $VK^T$  dar. Dabei gilt es zu beachten, dass dem Auftretens- und Bedeutungskoeffizienten auf Grund des potenziell entstehenden Schadens eine höhere Dringlichkeit in Bezug auf einen direkten Handlungsbedarf im Serienanlauf als dem Validierungskoeffizienten zukommt. Neben der Dominanzanalyse ist die Risikomatrix der Portfolioanalyse für die Abschätzung des Risikos von Fehlern eine etablierte Methode bei der Ermittlung der Risikoprioritätszahl und somit Handlungsbedarfen einer FMEA nach dem VDA [TIET20, S. 41 ff.] und [WERD12, S. 54 f.]. WERDICH schlägt einen Vergleich von Bedeutung und Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fehlers oder einer Fehlerfolge zur Ableitung von Handlungsbedarfe entsprechend einer Clusterung in der Risikomatrix vor [WERD12, S. 55]. Basierend auf dem Grundgedanken der Risikomatrix werden für die Dominanzanalyse bzw. Priorisierung der Restentwicklungsumfänge im Hinblick auf die Notwendigkeit einer zielgerichteten und systematischen Reduzierung von Defiziten der Auftretenskoeffizient und der Bedeutungskoeffizient in der Dringlichkeits-Matrix kombiniert (Abbildung 7.11) und zur Zielgröße **Dringlichkeit  $DR^T$**  zusammengefasst,



**Dominanzanalyse: ( $DR^T$  ;  $VK^T$ )**

$$REU^2_{(UP)} > REU^4_{(UP)} > REU^1_{(UP)} > REU^3_{(UP)}$$

Rang  $RG^T$ : (1) (2) (3) (4)

- $DR^T$ : Dringlichkeit von  $REU^T_{(UP)}$
- $RG^T$ : Rang eines  $REU^T_{(UP)}$
- $VK^T$ : Validierungskoeffizient von  $REU^T_{(UP)}$

**Abbildung 7.11 Priorisierung von REU**

*Prioritization of REU*

siehe Formel (18). Nach dem Dominanzprinzip werden anschließend die REU hinsichtlich ihrer Dominanz bezogen auf die Koeffizienten  $DR^r$  und  $VK^r$  analysiert. Ist bspw.  $DR^r < DR^{r+1}$ , dann gilt,  $DR^{r+1}$  dominiert  $DR^r$  (analog  $VK^r$ ). Dominiert ein  $REU_{(UP)}^r$  einen anderen  $REU_{(UP)}^{r+1}$  in mindestens dem Zielkriterium (Koeffizient)  $DR^r$ , so wird dieser höher als der dominierte REU priorisiert. Bei Koeffizienten Gleichheit ( $DR^r = DR^{r+1}$ ) entscheidet die Dominanz im Koeffizienten  $VK^r$ .

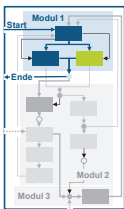
$$DR^r = AK^r \cdot BK^r \quad (18)$$

Das Ziel des agilen Serienanlaufs ist es, systematisch Defizite (und somit Unsicherheiten) zu reduzieren. Daher gilt es, im nachfolgenden Schritt, basierend auf der Rangfolgebildung der REU die Defizite zu priorisieren. Hierzu werden die Ursacheevidenzen eines Defizits (siehe Ermittlung von  $AK^r$  in S4) für die jeweiligen Restentwicklungsumfänge mit dem jeweiligen Rang des Restentwicklungsumfangs und der mittleren Discrepanz des Defizits (siehe Formel (15)) kombiniert und als Prioritätszahl 1 ( $PZ1_{Di}$ ) bezeichnet, siehe Formel (19). **Prioritätszahl 1 ( $PZ1_{Di}$ )** gibt somit Auskunft darüber, für wie viele REU (mit welcher Dringlichkeit) ein Defizit ursächlich ist und welche Möglichkeit für dessen Validierung besteht.

$$PZ1_{Di} = \sum_{r=1}^R \left( UE_{Di}^r \cdot \frac{1}{RG^r} \right) \cdot (1 - MD_{Di}) \quad (19)$$

### 7.1.3 Bewertung des Entwicklungsfortschritts – Entscheidungsabhängiges Reifegradmodell

*Evaluation of the Development Success – Decision-Dependent Maturity Level Model*



Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben ist die Bewertung des Entwicklungsfortschritts ein essenzieller Teil des Serienanlaufs. Eine etablierte Methode zur Bewertung des Entwicklungsfortschritts ist die Bewertung von Reifegraden (siehe Abschnitt 3.2). **Reife** beschreibt im Allgemeinen den Wert an geleisteter Arbeit bei der Durchführung von Projekten oder Vorgängen, welcher zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelt wird [DIN09]. Die Quantifizierung der Reife erfolgt mit Hilfe des **Reifegrads**, welcher den Ausprägungsgrad einer Sammlung zeitabhängiger Merkmale (Reifeindikatoren) bezogen auf die zum jeweiligen Zeitpunkt geltenden Anforderungen beschreibt [HELL06, S. 50], siehe Abschnitt 3.2. Im weiteren Verlauf der Methodik dienen Reifegrade als Ist-Zustand, welche den quantitativen Vergleich mit dem Soll-Zustand basierend auf Anforderungen der Anlaufphasen zur Anlaufzielerreichung ermöglichen. Nach dem integrativen Phasenmodell von WINKLER [WINK07, S. 13] (Grundlage der vorliegenden Arbeit) sowie durch die methodisch integrative Betrachtung von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf im agilen Serienanlauf ist es notwendig, sowohl die Produktreife als auch die Reife der Fertigungs- und Handhabungsprozesse (Prozessreife) sowie deren Verknüpfung (Fertigungsreife) in die Bewertung des

Entwicklungsfortschritts einzubeziehen. Im Folgenden werden die Bewertung des Produktreifegrades und des Fertigungsreifegrades als zentrale Bewertungsgrößen des Entwicklungsfortschritts basierend auf der unsicheren Simulationsgrundlage im agilen Serienanlauf beschrieben. Die der Defizitermittlung zugrundeliegenden Unsicherheitsvariablen bzw. Steuerungsgrößen Definitions-/ Informations- und Performanceunsicherheit ( $U_{pl}^u$  ( $u \in \{D, I, RPPE\}$ )) und die Anlaufperformance  $APE_{pl}$ , siehe Abschnitt 7.1.1, stellen die kleinste, nicht mehr weiter aufteilbare Bewertungsgröße im Reifegradmodell dar und werden zur Vereinheitlichung in der weiteren Verwendung in **Reifegradvariable (RG-Variable)  $RGV_{pl}^v$**  mit  $v \in \{D, I, APE, RPPE\}$  umgerechnet, siehe Formel (20). Zur späteren Rücktransformation der  $RGV_{pl}^v$  in Defizite ( $D_i$ ) und besseren Übersicht werden die Defizite den  $RGV_{pl}^v$  direkt im Reifegradmodell zugeordnet. Neben den aus Plandaten resultierenden Defiziten resultieren Defizite aus der Ermittlung der Reifegrade. Im Folgenden werden die plandatenbasierten Defizite (siehe Abschnitt 7.1.1) um reifegradbasierte Defizite aus bspw. der Beschreibungsvollständigkeit eines Features erweitert und in der Methodik subsumierten weiterhin als Plandaten bezeichnet.

$$RGV_{pl}^v = \begin{cases} 1 - U_{pl}^v & v \in \{D, I, RPPE\} \\ APE_{pl} & v \in APE \end{cases} \quad (20)$$

Die finale Definition eines Plandatums im Verlauf des agilen Serienanlaufs durch Anwendende oder beim Erreichen der maximal möglichen Reife, wird im Folgenden in Bezug auf die agile Gestaltung des Design Freeze als **partielle Fixierung  $P_{fix}$**  bezeichnet. Gilt ein Plandatum als partiell fixiert, so werden die Reifegradvariablen  $RGV_{pl}^D$  **und  $RGV_{pl}^I$  (Definitions-/Informationssicherheit)** des Plandatums auf den Wert 1 gesetzt.

### Produktreifegrad

Der Definition von WANGENHEIM [WANG98, S. 123 ff.] und TÜCKS [TÜCK10, 35 f.] folgend wird der **Produktreifegrad (PDRG)** definiert als Maß für die Erreichung der Kundenanforderungen in Form und Funktion (siehe Abschnitt 3.2). Basierend auf der Definition und der in der Arbeit zu Grunde gelegten merkmalsbezogene Bauteilbeschreibung (siehe Abschnitt 3.2), setzt sich der Produktreifegrad aus der **Leistungsvollständigkeit** (Funktion), den **Featurereifegraden** (Form) und dem **Werkstoffreifegrad** zusammen (Abbildung 7.12). Der Featurereifegrad setzt sich aus den **Merkmalsreifegraden** der zum Feature  $f$  zugehörigen Merkmale  $m$  und der **Beschreibungsvollständigkeit** (Merkmalsvollständigkeit) des Features  $f$  zusammen. Der Merkmalsreifegrad ergibt sich aus der Bewertung der Plandaten **Genauigkeit** bzw. **Definitions-** und der **Informationssicherheit** der Merkmale. Die Bewertung des Werkstoffreifegrades ergibt sich analog zur Bewertung der Merkmalsreife durch Bewertung der Plandaten der Werkstoffdefinition. Die Berechnung des Produktreifegrads **PDRG** erfolgt durch Kombination und Mittelung der **Leistungsvollständigkeit** des Produkts (**LVK**), der im Hinblick auf die Relevanz zur Funktionserfüllung des Bauteils **gewichteten ( $g_j^{FRG}$ ) Featurereifegrade**

( $FRG_f$ ) sowie des *Werkstoffreifegrades* ( $WRG$ ), siehe Formel (21). Der Produktreifegrad wird durch einen Wert im Intervall zwischen 0 bis 1 abgebildet, wobei ein Wert von 1 ein Produkt (Bauteil) mit vollständig definierten Features und Werkstoff sowie voller Funktionserfüllung beschreibt.

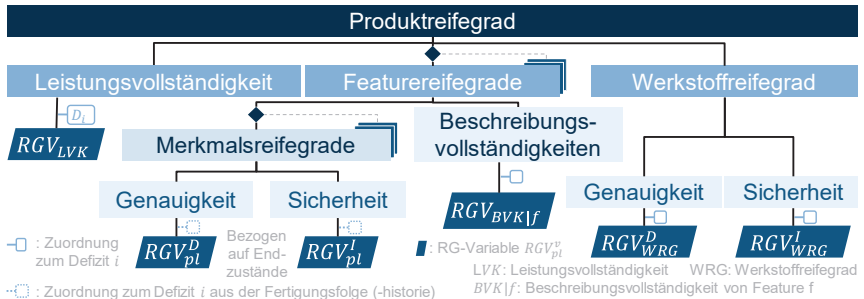


Abbildung 7.12 Übersicht zur Bewertung des Produktreifegrades

Overview of the Evaluation of the Product Maturity Level

In der Simulationstheorie wird zwischen dem **realen Produktreifegrad**  $PDRG_{real}^s$  (Bewertung durch Realdaten) im Sprint  $s$  und dem **simulierten Produktreifegrad**  $PDRG_{sim}^s$  (Ergebnis der Sprintsimulationen) differenziert. Bei der Berechnung beziehen sich die Variablen somit ebenfalls auf die realen oder simulierten Werte. Zur einfachen Lesbarkeit wird im Folgenden in der Herleitung der Formeln auf eine Indexierung in den Formeln verzichtet. Die Formeln gelten analog für den realen und simulierten Fall in einem Real- bzw. Simulationssprint  $s$  ( $s \in S_{real}$  bzw.  $S_{sim}$ ).

$$PDRG = \frac{LVK + \frac{\sum_{f=1}^F FRG_f \cdot g_f^{FRG}}{\sum_{f=1}^F g_f^{FRG}} + WRG}{3} \quad (21)$$

Ein Wert von 0 bildet ein vollständig undefiniertes Produkt ab. Die Bewertungsgrößen ( $LVK$ ,  $FRG_f$ ,  $WRG$ ) sowie deren formelmäßigen Zusammenhänge werden im Folgenden detailliert beschrieben.

### Leistungsvollständigkeit

Ziel von Produkten ist die Erfüllung der Kundenanforderungen und somit der aus den Anforderungen abgeleiteten Funktionen bzw. Teilfunktionen, siehe Abschnitt 3.2. Die **Leistungsvollständigkeit (LVK)** wird definiert als Maß für die Vollständigkeit der Abbildung geforderter (Teil-)Funktionen und somit als Maß für die Erfüllung der Kundenanforderungen. Eine Leistungsvollständigkeit von  $LVK = 1$  beschreibt somit ein Bauteil, welches alle an das Bauteil gestellten Kundenanforderungen bzw. (Teil-)Funktionen erfüllt. Die Leistungsvollständigkeit stellt kein Plandatum nach Abschnitt 7.1.1 dar und wird als zusätzliche Ursache für ein Defizit aufgefasst. Das Defizit ergibt sich analog zur Anlaufperformance aus der noch fehlenden Leistungsvollständigkeit und wird somit den Informationsdefiziten  $ID_i$  zugeordnet. Zur Berechnung der

Leistungsvollständigkeit wird der **Erfüllungsgrad**  $\nabla_{LVK}^{tf}$  der durch das Bauteil **erfüllen (Teil-) Funktionen (tf)** im Vergleich zu der **Menge geforderter (Teil-) Funktionen TF** berechnet. Wird eine geforderte (Teil-) Funktion durch das Bauteil erfüllt, so wird deren Erfüllungsgrad mit  $\nabla_{LVK}^{tf} = 1$  bewertet. Wird eine (Teil-) Funktion nicht erfüllt, wird deren Erfüllungsgrad mit  $\nabla_{LVK}^{tf} = 0$  bewertet. Die Leistungsvollständigkeit ergibt sich aus der Summe der Erfüllungsgrade im Verhältnis zur Menge der geforderten und somit zu erfüllenden (Teil-) Funktionen, siehe Formel (22).

$$LVK = RGV_{LVK} = \frac{\sum_{tf=1}^{TF} \nabla_{LVK}^{tf}}{TF} \quad (22)$$

### Werkstoffreifegrad

Die Definition des Werkstoffs hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl von Fertigungsprozessen in der Serienfertigung und ist somit eine notwendige Voraussetzung für einen erfolgreichen Serienanlauf [FALL00, S. 42 ff.]. Durch die methodische Kombination von agiler Produktentwicklung und Serienanlauf besteht die Möglichkeit, dass der Werkstoff im Serienanlauf noch nicht festgelegt ist. Um sicherzustellen, dass zum SOP eine vollständige Definition des Produkts erfolgt, gilt es, die Definition des Werkstoffs bei der Berechnung des Produktreifegrades zu berücksichtigen. Der **Werkstoffreifegrad (WRG)** beschreibt ein Maß für die Definition des zu verwendenden Serienwerkstoffs und wird im Intervall zwischen 0 und 1 abgebildet. Grundlage zur Bewertung der Definitionsgenauigkeit stellt die Ermittlung der **Erfüllungsgrade**  $\nabla^{WRG}$  in Anlehnung an die Werkstoffklassifizierung nach FISCHER dar, siehe Formel (23). FISCHER unterscheidet die drei Ebenen Werkstofffamilie, Werkstoffgruppe und den spezifischen Werkstoff. Die Werkstofffamilie bezeichnet eine Klassifikation nach Eisenwerkstoffen, Nicht-Eisenwerkstoffen, Polymerwerkstoffen etc. Eine Werkstofffamilie lässt sich weiter in Werkstoffgruppen, wie bspw. die Werkstofffamilie Eisenwerkstoffe in die Werkstoffgruppen unlegierte, niedriglegiert und hochlegierte Eisenwerkstoffe, unterteilen. Den Werkstoffgruppen werden spezifische Werkstoffe zugeordnet. [FISC93, S. 50 ff.]

$$\nabla^{WRG} = RGV_{WRG}^D = \begin{cases} 1 & \text{spezifischer Werkstoff} \\ 0,66 & \text{Werkstoffgruppe} \\ 0,33 & \text{Werkstofffamilie} \\ 0 & \text{keine Werkstoffdefinition} \end{cases} \quad (23)$$

Da die eingeholten Informationen zum Werkstoff Unsicherheiten unterliegen, wird der Werkstoffreifegrad aus der Kombination der Reifegradvariablen des ermittelten Erfüllungsgrades  $RGV_{WRG}^D$  und der Informationsunsicherheit  $RGV_{WRG}^I$  bewertet, siehe Formel (24).

$$WRG = \frac{RGV_{WRG}^D + RGV_{WRG}^I}{2} \quad (24)$$

Der Werkstoffreifegrad bzw. die Reifegradvariablen des Werkstoffreifegrads stellen keine Plandaten nach Abschnitt 7.1.1 dar und werden als zusätzliche Ursachen für das

Auftreten eines Defizits aufgefasst. Das Defizit ergibt sich analog zur Anlaufperformance aus der noch fehlenden Genauigkeit  $RGV_{WRG}^D$  bzw. Sicherheit  $RGV_{WRG}^I$  der Werkstoffdefinition und wird den Informationsdefiziten  $ID_i$  zugeordnet. Wird im Verlauf des agilen Serienanlaufs durch das Treffen einer Entscheidung ein spezifischer Werkstoff bestimmt, gilt dieser als final festgelegt.

### Featurereifegrad

Der **Featurereifegrad**  $FRG_f$  beschreibt ein Maß für die Genauigkeit, Sicherheit und Vollständigkeit der Featuredefinition eines Bauteils. Der Featurereifegrad eines Features  $f$  setzt sich aus der Mittelung der Beschreibungsvollständigkeit  $BVK_f$  des Features durch dessen **relevante Merkmale**  $m$  und der Summe der gemittelten **Merkmalsreifegrade**  $MRG_m^f$  zusammen ( $M$  beschreibt die Menge der Merkmale eines Features,  $m \in M$ ), siehe Formel (25).

$$FRG_f = \frac{\frac{\sum_{m=1}^M MRG_m^f}{|M|} + BVK_f}{2} \quad (25)$$

Die Ermittlung der **Beschreibungsvollständigkeit**  $BVK_f$  dient zur Prüfung, ob ein Feature durch dessen Merkmale ausreichend gut beschrieben wird. Die Merkmale sind featureabhängig und im Einzelfall zu definieren. BUCHHOLZ definiert die für die operative Technologieplanung im Allgemeinen relevanten Merkmalstypen *Makrogeometrie, Form- und Lagetoleranzen, Härte, Oberflächenrauheit* und *Eigenspannung* (siehe Abschnitt 3.2) [BUCH14, S. 63]. Ist ein Merkmal definiert, wenn auch unter Unsicherheit, wird der **Erfüllungsgrad**  $\nabla_m^f$  mit 1 bewertet. Liegen keine Informationen zu einem Merkmal vor, so wird der Erfüllungsgrad  $\nabla_m^f$  mit 0 bewertet. Die Beschreibungsvollständigkeit ergibt sich aus der Summe der Erfüllungsgrade der für das jeweilige Feature relevanten Merkmale, siehe Formel (26). Die Beschreibungsvollständigkeit stellt kein Plandatum nach Abschnitt 7.1.1 dar und wird als zusätzliche Ursache für einen Defizit aufgefasst. Das Defizit ergibt sich analog zur Anlaufperformance aus der noch fehlenden Beschreibungsvollständigkeit eines Features und wird den Informationsdefiziten  $ID_i$  zugeordnet.

$$BVK_f = RGVBVK|f = \frac{\sum_{m=1}^M \nabla_m^f}{|M|} \quad (26)$$

Der **Merkmalsreifeegrad**  $MRG_m^f$  beschreibt ein Maß für die Definitionssicherheit (Genauigkeit) ( $S_{pl}^D = RGV_{pl}^D$  mit  $pl = m$ ) und (Informations-)Sicherheit ( $S_{pl}^I = RGV_{pl}^I$  mit  $pl = m$ ) eines Merkmals  $m$ , siehe Formel (27).

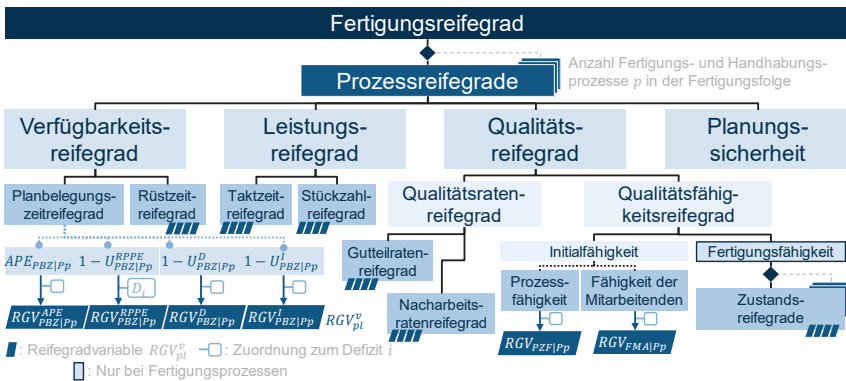
$$MRG_m^f = \frac{RGV_m^D + RGV_m^I}{2} \quad (27)$$

Da Grundlage der vorliegenden Arbeit die fertigungsorientierte Sicht ist, bezieht sich das Plandatum  $pl$  eines Merkmals  $m$  auf den Endzustand des Merkmals in der Fertigungshistorie ( $m = EZ - m|Pp$ ).

**Reifegrad der Fertigungsfolge – Fertigungsreifegrad (FERG)**

Der **Fertigungsreifegrad (FERG)** wird in der vorliegenden Arbeit, an die Beschreibung der Prozessreife von WANGENHEIM [WANG98, S. 123 ff.] und TÜCKS [TÜCK10, S. 10 f.] angelehnt, definiert als Maß für die Herstellbarkeit von Bauteilen in ausreichender Qualität und Quantität, bezogen auf eine Fertigungsfolge. In der Simulationsmethodik wird zwischen dem **realen Fertigungsreifegrad  $FERG_{real}^s$**  (Bewertung durch Realdaten) im Sprint  $s$  und dem **simulierten Fertigungsreifegrad  $FERG_{sim}^s$**  (Ergebnis der Sprintsimulationen) differenziert. Bei der Berechnung beziehen sich die Variablen somit ebenfalls auf die realen oder simulierten Werte. Zur einfachen Lesbarkeit wird im Folgenden in der Herleitung der Formeln auf eine Indexierung in den Formeln verzichtet. Die Formeln gelten analog für den realen und simulierten Fall in einem Real- bzw. Simulationssprint  $s$  ( $s \in S_{real}$  bzw.  $S_{sim}$ ). Basierend auf der in Abschnitt 3.1 eingeführten terminologischen Grundlage wird hierzu der **Prozessreifegrad ( $PZRG_p$ )** auf einen Fertigungs- bzw. Handhabungsprozess bezogen ermittelt. Der Fertigungsreifegrad ergibt sich entsprechend Formel (28) aus der Summe der Prozessreifegrade der in der Fertigungsfolge enthaltenen Fertigungs- und Handhabungsprozesse  $p$  (Abbildung 7.13).

$$FERG = \sum_{p=1}^P PZRG_p \tag{28}$$



**Abbildung 7.13** Übersicht zur Bewertung des Fertigungsreifegrades

*Overview of the Evaluation of the Manufacturing Maturity Level*

Die Bewertung des **Prozessreifegrades ( $PZRG_p$ )** erfolgt in Anlehnung an die Ermittlung der Overall Equipment Effectiveness (OEE), welche von LANZA als planungs- und anlaufbegleitende Bewertungskenngröße im Serienanlauf zur Bewertung instabiler Fertigungsfolgen eingesetzt wurde [LANZ05, S. 61 ff.]. Die OEE ist ein Bewertungsmaß aus dem Total Productive Maintenance Ansatz (TPM) [NAKA88, S. 21 ff.]. In der Praxis wird TPM zur systematischen und kontinuierlichen Verbesserung der

Gesamtanlageneffektivität eingesetzt [LANZ05, S. 62]. TPM basiert auf der Annahme, dass jeder Prozess einer Fertigungsfolge ein ideales Arbeitspotenzial aufweist. Dieses Potenzial wird durch die drei Verlustgruppen *Stillstandsverluste* (bspw. Anlagenausfall), *Geschwindigkeitsverluste* (bspw. verringerten Taktgeschwindigkeiten) und *Qualitätsverluste* (bspw. Ausschuss und Nacharbeit) verringert. [NAKA88, S. 21 ff.]

In Anlehnung an die Kennzahlen des Grundmodells der OEE wird der Prozessreifeegrad eines Fertigungs- bzw. Handhabungsprozesses  $p$  aus dem *Verfügbarkeitsreifeegrad*  $VRG_p$ , dem *Leistungsreifeegrad*  $LRG_p$  und dem *Qualitätsreifeegrad*  $QRG_p$  bestimmt. Die Bewertung des Prozessreifeegrad (siehe Formel (29)) wird im agilen Serienanlauf durch die von REY eingeführte Bewertungskennzahl der *Planungssicherheit*  $PS_p$  (siehe Abschnitt 7.1.1) erweitert. Die einzelnen Bewertungsgrößen werden im Folgenden detailliert beschrieben.

$$PZRG_p = \frac{VRG_p + LRG_p + QRG_p + PS_p}{4} \quad (29)$$

#### *Verfügbarkeitsreifeegrad*

Der *Verfügbarkeitsreifeegrad*  $VRG_p$  eines Fertigungs- bzw. Handhabungsprozesses (Prozess  $p$ ) beschreibt ein Maß für die Erreichung der geplanten Verfügbarkeit eines Prozesses unter Berücksichtigung von Stillstandsverlusten durch bspw. Anlagenausfälle und Rüstzeiten [LANZ05, S. 65]. Gemäß der verwendeten Reifeegradmodellierung ergibt sich der Verfügbarkeitsreifeegrad (Formel (30)) aus den Basisreifeegraden *Planbelegungszeitreifeegrad* und *Rüstzeitreifeegrad*.

$$VRG_p = \frac{PBZRG_p + RZRG_p}{2} \quad (30)$$

Der *Planbelegungszeitreifeegrad*  $PBZRG_p$  (Formel (31)) beschreibt ein Maß der Erreichung der geplanten Planbelegungszeit zum SOP. Zur Ermittlung eines Basisreifegrades ( $PBZRG_p$ ) werden im Folgenden die vier RG-Variablen  $RGV_{pl}^{APE}$ ,  $RGV_{pl}^{RPPE}$ ,  $RGV_{pl}^D$  und  $RGV_{pl}^I$  (mit  $pl = PBZ|Pp$ ) basierend auf der Unsicherheitsmodellierung in Abschnitt 7.1.1 für die Bewertung der Anlaufperformance sowie der Performance-, Informations- und Definitionssicherheit herangezogen. Die reale Prozessperformance der Planbelegungszeit eines Prozesses zur Bewertung der Anlaufperformance  $APE_{PBZ|Pp}$  ergibt sich bspw. aus der Differenz der Gesamtnutzungsdauer und den Zeitverlusten durch geplante Stillstände des Prozesses [LANZ05, S. 62 f.].

$$PBZRG_p = \frac{\sum_{v \in \{I, D, APE, RPPE\}} RGV_{PBZ|Pp}^v}{4} \quad (31)$$

Der *Rüstzeitreifeegrad*  $RZRG_p$  beschreibt ein Maß für das Erreichen der geplanten Serienrüstzeit. Der  $RZRG_p$  stellt ebenfalls ein Basisreifeegrad dar und wird analog zum  $PBZRG_p$  basierend auf den RG-Variablen ( $pl = RZ|Pp$ ) ermittelt, siehe Formel (32).

$$RZRG_p = \frac{\sum_{v \in \{I, D, APE, RPPE\}} RGV_{RZ|PP}^v}{4} \quad (32)$$

### Leistungsreifeegrad

Der **Leistungsreifeegrad**  $LRG_p$  eines Fertigungs- bzw. Handhabungsprozesses (Prozess  $p$ ) beschreibt ein Maß für die Erreichung der geplanten Fertigungsleistung unter Berücksichtigung von Geschwindigkeitsverlusten aufgrund von verringerter Taktgeschwindigkeiten und Leerläufen [LANZ05, S. 67]. Der Leistungsreifeegrad ergibt sich aus dem Mittel der Basisreifegrade *Taktzeitreifeegrad* und *Stückzahlreifeegrad*, siehe Formel (33).

$$LRG_p = \frac{TZRG_p + STKR G_p}{2} \quad (33)$$

Der **Taktzeitreifeegrad**  $TZRG_p$  beschreibt ein Maß für die Erreichung der geplanten Mindesttaktzeit (zum SOP), siehe Formel (34). Der **Stückzahlreifeegrad**  $STKR G_p$  beschreibt ein Maß für die Erreichung der geplanten Produktionsmenge zum SOP, siehe Formel (35).

$$TZRG_p = \frac{\sum_{v \in \{I, D, APE, RPPE\}} RGV_{TZ|PP}^v}{4} \quad (34)$$

$$STKR G_p = \frac{\sum_{v \in \{I, D, APE, RPPE\}} RGV_{STK|PP}^v}{4} \quad (35)$$

### Qualitätsreifeegrad

Die **Qualitätsrate** beschreibt im Allgemeinen das Verhältnis aus den produzierten, qualitätsgerechten Produkten (Gutteilen) und Qualitätsverlusten aufgrund von Ausschuss und Nacharbeit. Ursachen für Qualitätsverluste im Serienanlauf liegen im instabilen Verhalten der Fertigungs- und Handhabungsprozesse begründet. [LANZ05, S. 69] Ein Fertigungsprozess wird als **stabil** bezeichnet, wenn er beherrscht und fähig ist. Als **beherrscht** gilt ein Fertigungsprozess dann, wenn der Fertigungsprozess einen gleichmäßigen und vorhersagbaren Verlauf von Mittelwert und Streuung der erzielten Merkmalsausprägungen aufweist. **Prozessfähigkeit** ist definiert als ein statistisches Maß für die Fähigkeit eines Prozesses die geforderten Merkmalsausprägungen (Ziel-/Toleranzwerte) zu erfüllen. Somit gilt ein Prozess als **fähig**, wenn sich die Streuung der erzielten Merkmalsausprägungen zu einer vorab definierten, hohen Wahrscheinlichkeit innerhalb der Toleranzgrenzen bewegt. [SCHM15, S. 222 f.] Die Fähigkeit eines Fertigungs- oder Handhabungsprozesses bzw. der Mitarbeitenden zur stabilen Erzeugung von Gutteilen wird im Folgenden zusammenfassend als **Qualitätsfähigkeit** bezeichnet. Basierend auf der allgemeinen Herleitung der Qualitätsrate und der Qualitätsfähigkeit beschreibt der **Qualitätsreifeegrad**  $QRG_p$  im Folgenden ein Maß zur Erreichung der geplanten Qualität im Serienanlauf. Der Qualitätsreifeegrad ergibt sich aus dem Mittel des *Qualitätsratenreifegrads* und des *Qualitätsfähigkeitsreifegrads*, siehe Formel (36).

$$QRRG_p = \frac{QRRG_p + QFRG_p}{2} \quad (36)$$

Der **Qualitätsratenreifegrad**  $QRRG_p$  wird definiert als Kennzahl für die Erreichung der geplanten Qualitätsrate und ergibt sich aus dem Mittel der Basisreifegrade *Gutteilratenreifegrad* und *Nacharbeitsratenreifegrad*, siehe Formel (37).

$$QRRG_p = \frac{GTRRG_p + NARRG_p}{2} \quad (37)$$

Der **Gutteilratenreifegrad**  $GTRRG_p$  und der **Nacharbeitsratenreifegrad**  $NARRG_p$  beschreiben ein Maß zur Erreichung der geplanten Gutteilrate bzw. Nacharbeitsrate des Fertigungs- bzw. Handhabungsprozesses. Die Rate der zunächst als Ausschuss geltenden Produkte, welche durch Nacharbeit die Qualitätsanforderungen erfüllen wird als Nacharbeitsrate bezeichnet. Der  $GTRRG_p$  und  $NARRG_p$  stellen ebenfalls Basisreifegrade dar und basierend auf den RG-Variablen ( $pl = GTR|Pp$  bzw.  $NAQ|Pp$ ) ermittelt, siehe Formel (38) und (39).

$$GTRRG_p = \frac{\sum_{v \in \{I,D,APE,RPPE\}} RGV_{GTR|Pp}^v}{4} \quad (38)$$

$$NARRG_p = \frac{\sum_{v \in \{I,D,APE,RPPE\}} RGV_{NAQ|Pp}^v}{4} \quad (39)$$

Der **Qualitätsfähigkeitsreifegrad**  $QFRG_p$  beschreibt, inwieweit ein Fertigungs- bzw. Handhabungsprozess bzw. Mitarbeitende befähigt wurden Gutteile zu produzieren (Initialfähigkeit) und fähig sind, die geplanten und somit geforderten Bauteilmerkmale zu erfüllen (Fertigungsfähigkeit). Die Initialfähigkeit ergibt sich aus dem Mittel der *initialen Prozessbefähigung*  $IPB_p$  und der *initialen Befähigung der Mitarbeitenden*,  $IBMA_p$  siehe Formel (40). In Abgrenzung zu den bisherigen Reifegradvariablen ist bei Handhabungsprozessen zwischen der Initialfähigkeit bei einer automatisierten Handhabung und der Initialfähigkeit von Mitarbeitenden bei manuell durchgeführten Tätigkeiten zu differenzieren. Da nicht beide Handhabungsformen gleichzeitig durchgeführt werden, wird bei Handhabungsprozessen entweder die initiale Prozessbefähigung oder die initiale Befähigung der Mitarbeitenden in die Berechnung des Qualitätsfähigkeitsreifegrades einbezogen.

$$QFRG_p = \begin{cases} IPB_p & , \text{ bei automatisierter Handhabung} \\ IBMA_p & , \text{ bei manuell durchgeführter Handhabung} \\ \frac{IPB_p + IBMA_p}{2} & , \text{ bei Fertigungsprozessen} \end{cases} \quad (40)$$

Da die Initialfähigkeit der Fertigungsprozesse von der Durchführung von Verbesserungsmaßnahmen zur Befähigung des Prozesses abhängt, wird die **initialen Prozessbefähigung**  $IPB_p$  aus dem Verhältnis der geplanten und durchgeführten Verbesserungsmaßnahmen im Serienanlauf ermittelt, siehe Formel (41). Die durchzuführenden (geplanten) Verbesserungsmaßnahmen sind vorab zu definieren und somit für einen Simulationsdurchlauf des Anlaufs fixiert. Sollten sich Änderungen im Verlauf des

Entwicklungsprozesses ergeben, besteht die Möglichkeit diese für die nächste Simulation anzupassen. Analog zur initialen Prozessbefähigung erfolgt die Qualifizierung von Mitarbeitenden durch die Durchführung von Schulungsmaßnahmen. Die **initiale Fähigkeit der Mitarbeitenden  $IBMA_p$**  ergibt sich daher aus dem Verhältnis der geplanten und durchgeführten Schulungsmaßnahmen, siehe Formel (42).

$$IPB_p = \frac{\text{Anzahl durchgeführter Verbesserungsmaßnahmen}_p}{\text{Anzahl geplanter Verbesserungsmaßnahmen}_p} \quad (41)$$

$$IBMA_p = \frac{\text{Anzahl durchgeführter Schulungsmaßnahmen}_p}{\text{Anzahl geplanter Schulungsmaßnahmen}_p} \quad (42)$$

Die stabile Erreichung der geforderten Endzustände  $EZ$  (Bauteilanforderungen) ist das primäre Ziel der Fertigung. Da nicht alle Endzustände direkt von einem Fertigungsprozess hergestellt werden können, werden verschiedene Fertigungsprozesse eingesetzt und zu einer Fertigungsfolge verknüpft. Jeder Fertigungsprozess hinterlässt charakteristische Veränderungen (Zwischenzustände  $ZWZ$ ) der Bauteilmerkmale (Fertigungshistorie), siehe Abschnitt 3.1 und Abschnitt 3.2. Die Endzustände eines Merkmals stellen somit Produktzustände nach dem letzten Fertigungsprozess der Fertigungsfolge dar. Zur Differenzierung wird das Plandatum von Merkmal  $m$  nach Prozess  $p$  um die Kennzeichnung  $EZ$  für einen Endzustand und  $ZWZ$  für einen Zwischenzustand erweitert ( $pl = EZ - m|Pp$  bzw.  $pl = ZWZ - m|Pp$ ). Rohzustände bezeichnen Zwischenzustände vor dem ersten Prozess und werden im Folgenden als Zwischenzustand vor dem ersten Prozess ( $p = 0$ ) der Fertigungsfolge bezeichnet. Zur Ermittlung von Roh-, Zwischen- und Endzuständen sowie zur Modellierung der Fertigungshistorie wird auf die Arbeit von REY verwiesen [REY20]. Zur Bestimmung der Prozessfähigkeit durch die Ermittlung von Prozessfähigkeitskennwerten ( $c_p$  und  $c_{pk}$ ) wird die Beherrschung des Fertigungsprozesses vorausgesetzt [SCHM15, S. 224]. Aufgrund der vorliegenden Unsicherheiten bezüglich der Fertigungsprozesse und Plandaten ist die Ermittlung der Beherrschbarkeit der Fertigungsprozesse ebenfalls unsicherheitsbehaftet und die Ermittlung der Prozessfähigkeit zur Prognose von Anlaufverhalten der Fertigungsprozesse nur indirekt möglich. Die **Fertigungsfähigkeit  $FFK_p$**  eines Fertigungsprozesses  $p$  beschreibt in Abgrenzung zur Prozessfähigkeit ein Maß der Erreichung der geforderten Zwischen- und Endzustände durch den Fertigungsprozess unter Berücksichtigung der Planungsunsicherheiten. Die indirekte Bewertung der Prozessfähigkeit und somit der Stabilität von Fertigungsprozessen erfolgt durch die statistische Bewertung der Anlaufperformance. Zu Ermittlung der Fertigungsfähigkeit werden die **Zustandsreife-  
grade  $ZRG_p^m$**  der Zwischen- und Endzustände eines Merkmals  $m$  des Fertigungsprozesses  $p$  berechnet, siehe Formel (43). Analog zum Featurereifegrad ergibt sich die Fertigungsfähigkeit aus der gemittelten Kombination der Zustandsreifegrade, siehe Formel (44).  $ZWZ_p$  bzw.  $EZ_p$  beschreibt die Menge der Zwischen- und Endzustände eines Fertigungsprozesses  $p$ .

$$ZRG_p^m = \frac{\sum_{v \in \{I, D, APE, RPPE\}} RGV_{ZWZ \text{ oder } EZ-m|Pp}^v}{4} \quad (43)$$

$$FFK_p = \frac{\sum_{m=1}^z ZRG_p^m}{|z|} \text{ mit } z \in \{ZWZ_p, EZ_p\} \quad (44)$$

Dem Anwendenden der Methodik obliegt es im Verlauf des agilen Serienanlaufs, Zwischen- und Endzustände auf Basis der aktuellen Simulationsgrundlage als final und somit als partiell fixiert zu definieren. Gilt ein Zwischen- oder Endzustand eines Plandatums als partiell fixiert, so werden die Reifegradvariablen  $RGV_{ZWZ-m|Pp}^D$  und  $RGV_{ZWZ-m|Pp}^I$  des Zwischenzustands bzw.  $RGV_{EZ-m|Pp}^D$  und  $RGV_{EZ-m|Pp}^I$  des Endzustands auf den Wert 1 gesetzt.

### Planungssicherheit

Die **Planungssicherheit**  $PS_p$  verknüpft die Robustheit und Informationssicherheit unter Berücksichtigung aller in der Fertigungsfolge zur Verfügung stehenden und relevanten Informationen und gilt als Maß, für die Fähigkeit eines Fertigungsprozesses unter Berücksichtigung von Informationsunsicherheiten einen Bauteilzwischen- und -endzustand sicher zu fertigen. Die Planungssicherheit stellt kein Plandatum nach Abschnitt 7.1.1 dar. Da sich die Planungssicherheit aus den Unsicherheiten der modellierten Plandaten der Zwischen- und Endzustände ergibt, resultiert aus der Planungssicherheit kein explizit zu berücksichtigendes Defizit. Für eine detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge und Ermittlung der Planungssicherheit wird auf die Arbeit von REY verwiesen. [REY20, S. 98 ff.] Die Planungssicherheit wird auf Handhabungsprozesse übertragen und bezeichnet im Folgenden ein Maß für die Fähigkeit eines Handhabungsprozesses zur sicheren Ausführung einer Handhabungstätigkeit.

### Entscheidungsabhängiges Reifegradmodell

Allgemein bezeichnet eine Entscheidung eine (bewusste) Auswahl einer Handlung bzw. einer von mehreren Handlungsalternativen [LAUX14a, S. 3]. Auch im Serienanlauf gilt es, von produzierenden Unternehmen zahlreiche Entscheidungen zu treffen, wie bspw. wann die Freigabe für den Serienanlauf erfolgt, wann Werkzeuge von Versuchs- auf Serienwerkzeuge umgestellt werden, wann welche Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt werden, wann welche Maschine beschafft wird oder wann die SOP-Freigabe erfolgt. Wird eine Entscheidung zur falschen Zeit oder aufgrund von unzureichenden Informationen falsch getroffen, hat dies weitreichende Auswirkungen auf den Erfolg des Serienanlaufs und somit auf das Erreichen der Anlaufziele. [STIC07, S. 14 ff.] Ziel des entscheidungsabhängigen Reifegradmodell ist es, relevante Entscheidungen im Serienanlauf zu modellieren und in die Reifegradmodellierung als steuerndes Element der systematischen Reifegradsteigerung zu integrieren. Zur Erreichung des Ziels werden zunächst relevante Entscheidungen im Serienanlauf identifiziert und modelliert (Abbildung 7.14). Anschließend werden die Abhängigkeiten zwischen den Entscheidungen bestimmt und die Entscheidungen mit den Reifegradvariablen der Reifegradmodelle und somit mit den Defiziten verknüpft. Zur

Priorisierung der zu reduzierenden Defizite erfolgt die Gewichtung der einzelnen Entscheidungen. Die Schritte werden im Folgenden detailliert beschrieben.

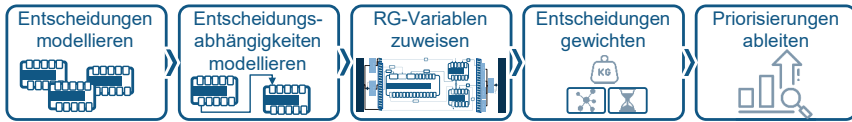


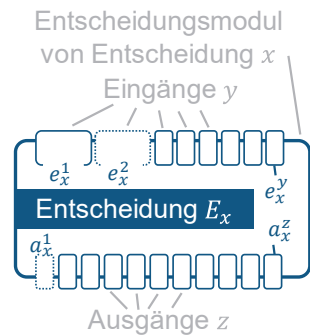
Abbildung 7.14 Grobkonzept des entscheidungsabhängigen Reifegradmodells

*Rough Concept of the Decision-Dependent Maturity Model*

*Entscheidungen modellieren*

In der vorliegenden Arbeit beschreiben Entscheidungen im agilen Serienanlauf diskrete Schritte im Transformationsprozess von einer instabilen zur stabilen Serienproduktion. Die Entscheidungen werden vorab von Anwendenden der Methodik definiert. Zur Identifikation relevanter Entscheidungen werden bestehende Methoden, wie Ursache-Wirkungs-Diagramme (ISHIKAWA-Diagramme), eingesetzt [ISHI76, S. 18 ff.]. Nach FRITSCHÉ sind bspw. Einflüsse aus den Bereichen Organisation, Personal, Informationen, Produkt, Vorgaben, Verfahren, Steuerung, Anlagen und Material zu berücksichtigen [FRIT98, S. 19]. Jeder Prozess wird einzeln in Bezug auf die jeweiligen Einflüsse analysiert. Beispielsweise führt die Analyse eines Fertigungsprozesses  $p$  auf Einflüsse aus dem Teilbereich Werkzeuge des Bereichs Anlagen zur Identifikation der Entscheidung „Serienwerkzeug beschaffen“ sowie aus dem Bereich Personal zur Entscheidung „Schulungsmaßnahme zur Qualifizierung von Mitarbeitenden durchführen“.

Die **Entscheidungen**  $E_x$  ( $x \in X$ ) werden mit Hilfe eines Entscheidungsmoduls modelliert (Abbildung 7.15). Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) sind heute aufgrund der einfachen und anwenderfreundlichen Programmierung ein zentrales Element der Automatisierung von Prozessen und Anlagen. Eine SPS ist durch den charakteristischen Aufbau einer Eingangsebene einer Verarbeitungsebene und einer Ausgangsebene beschrieben. Der Eingangsbereich dient der Erfassung, Aufbereitung und Anpassung der eingehenden Signale. Die Verarbeitungsebene verknüpft die eingehenden Signale. Die Ergebnisse der Verknüpfung werden in der Ausgangsebene an die zu steuernden Elemente (als deren Eingangssignale) ausgegeben. [BERN18, S. 1 ff.] Die Grundlagen und die Systematik der SPS wird im Folgenden auf die Modellierung von Entscheidungen als zentrale Steuerelemente in der Reifegradmodellierung übertragen. Ein Entscheidungsmodul besteht somit aus einer Eingangsebene, einer Verarbeitungsebene und einer Ausgangsebene. In der



$a_x^z$ : Ausgangswert beim Treffen der Entscheidung  $x$  an Ausgang  $z$  |  
 $E_x$ : Entscheidung  $x \in X$  |  
 $e_x^y$ : Notwendiger Eingangswert von Entscheidung  $x$  an Eingang  $y$

Abbildung 7.15 Entscheidungsmodul

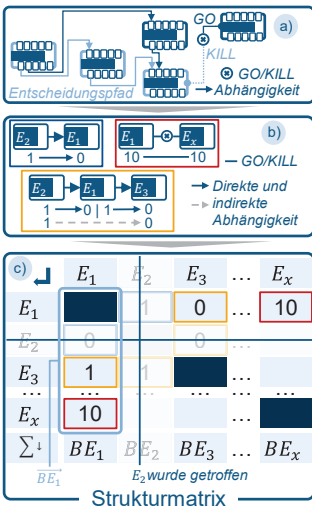
*Decision Module*

Eingangsebene, einer Verarbeitungsebene und einer Ausgangsebene. In der

notwendigen Informationen zum Treffen der Entscheidung modelliert und durch **Eingangswerte**  $e_x^y$  ( $y \in Y_x$ ) quantifiziert. Sind alle Eingangswerte erfüllt, wird durch die **Verknüpfungsebene** die Entscheidung als zu Treffen freigegeben und die **Ausgangswerte**  $a_x^z$  ( $z \in Z_x$ ) auf 1 gesetzt. Die Ein- und Ausgangebene dienen im Folgenden als Verknüpfungsschnittstellen zur Integration der Entscheidungen in die Reifegradmodellierung.

*Entscheidungsabhängigkeiten modellieren*

Basierend auf der Modellierung von Einzelentscheidungen gilt es, die komplexen Zusammenhänge von Einzelentscheidungen in einer Entscheidungsstruktur zu modellieren. Dabei besteht die Möglichkeit, dass Entscheidungen notwendige Voraussetzung für nachfolgende Entscheidungen (gerichtete Abhängigkeit) sind oder weitere Entscheidungen obsolet werden lassen (GO/KILL). Die Abhängigkeiten zwischen Entscheidungen lassen sich in Anlehnung an die VDI 3780 zur Beschreibung der Beziehungen von Zielen und Werten modellieren [VDI00]. Folgeentscheidungen werden durch einen gerichteten Pfeil, welcher die Richtung der Abhängigkeit angibt, verknüpft. Dabei geht die Verknüpfung vom Ausgang der notwendigen (vorgelagerten) Entscheidung zum Eingang der nachfolgenden Entscheidung.



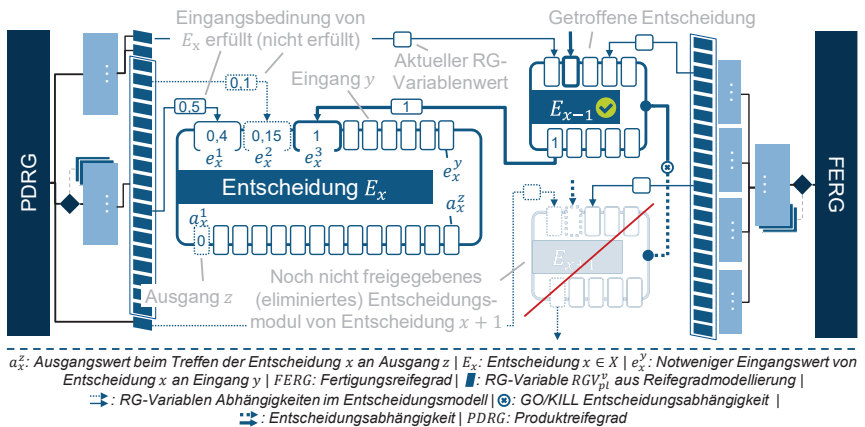
**Abbildung 7.16 Entscheidungsstruktur**  
Decision Structure

Die modellierten Abhängigkeiten werden in der Entscheidungsstrukturmatrix in algorithmuslesbare Zusammenhänge transformiert (Teil c) in Abbildung 7.16). Die Richtung der Abhängigkeit wird durch die Einträge 1 (Start) und 0 (Ende) quantifiziert. Hängen zwei Entscheidungen voneinander gerichtet ab, wird dies als **direkte Abhängigkeit** bezeichnet. Hängen mehr als zwei Entscheidungen gerichtet voneinander ab werden die weiteren Entscheidungsabhängigkeiten im Entscheidungspfad als **indirekte Abhängigkeiten** bezeichnet (Teil b) in Abbildung 7.16). Konkurrierende Entscheidungen erhalten aufgrund der höheren Entscheidungsrelevanz beide den Wert 10. Die

Spalteneinträge werden im **Beeinflussungsvektor einer Entscheidung**  $\overrightarrow{BE}_x$  zusammengefasst. Durch Bilden der Spaltensumme wird der **Beeinflussungswert**  $BE_x$  einer Entscheidung ermittelt, welcher die Stärke einer Entscheidung beschreibt, mit der nachfolgende Entscheidungen von der Entscheidung beeinflusst werden.

**Reifegradabhängiges Entscheidungsmodell**

Aufbauend auf den modellierten Abhängigkeiten und Verknüpfungen der Entscheidungen untereinander, werden die Einzelentscheidungen mit den für die Entscheidung relevanten Reifegradvariablen in einem Gesamtsystem verknüpft. Dabei gilt, dass jede Reifegradvariable mindestens einer Entscheidung zugeordnet wird. Hierzu werden die Reifegradvariablen ( $RGV_{pi}^y$ ) der für eine Entscheidung notwendigen Eingangsinformationen den Eingängen eines Entscheidungsmoduls zugeordnet und ein erforderlicher Eingangswert  $e_x^y$  festgelegt (Abbildung 7.17).



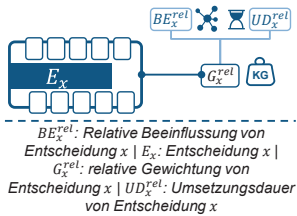
**Abbildung 7.17 Entscheidungsabhängiges Reifegradmodell**

*Decision-Dependent Maturity Model*

Wird der Eingangswert der Reifegradvariable mindestens erreicht, wird der Eingang als erfüllt freigeschaltet. Sind alle Eingänge freigeschaltet, wird die Entscheidung getroffen. Außerhalb des Simulationsdurchlaufs besteht die Möglichkeit, dass die Entscheidungen vom Anwendenden im Realsprint getroffen werden. Ist dies der Fall, wird die Entscheidung für die nächste Sprintsimulation manuell als getroffen markiert. Liegt an einem Eingang einer Entscheidung  $x$  eine vorgelagerte Entscheidung  $x - 1$  (Richtungsabhängigkeit) vor, deren Eingangsbedingungen noch nicht erfüllt sind, wird die Entscheidung  $x$  sowie alle nachfolgenden Entscheidungen im Entscheidungspfad als nicht freigegebene Entscheidung für die Reifegradentwicklung blockiert.

**Gewichtung der Entscheidungen**

Aufgrund der hohen Anzahl an Entscheidungen im Serienanlauf gilt es, diese hinsichtlich ihrer Anlaufrelevanz und Dringlichkeit zu priorisieren. Hierzu werden die



**Abbildung 7.18 Gewichtung der Entscheidung**

*Weighting of the Decision*

Entscheidungen hinsichtlich der Bewertungskennzahlen Beeinflussung und Umsetzungsdauer relativ zueinander gewichtet (Abbildung 7.18). Die **relative Beeinflussung**  $BE_x^{rel}$  gibt den Grad bzw. Wert der Beeinflussung einer Entscheidung von nachfolgenden Entscheidungen in Relation zur maximalen Beeinflussung im Reifegradmodell an, siehe Formel (45). Neben der Beeinflussung gehen mit den Entscheidungen unterschiedliche Umsetzungszeiten einher, die für die Realisierung der Entscheidung notwendig sind. Die Umsetzungszeiten haben einen entscheidenden Einfluss auf die Dauer des Serienanlaufs. Werden Entscheidungen, die eine hohe Umsetzungsdauer haben, wie bspw. lange Lieferzeiten einer Maschine, zu spät getroffen, führt dies zur Verfehlung von Anlaufzielen. Somit gilt es die **relative Umsetzungsdauer**  $UD_x$  einer Entscheidung in die Gewichtung mit einzubeziehen, siehe Formel (46). Der **relative Gewichtungswert**  $GW_x^{rel}$  einer Entscheidung ergibt sich aus der normierten Aggregation der Bewertungskennzahlen, siehe Formel (47). Anschließend werden die Gewichtungswerte auf ein Intervall zwischen eins und der maximalen Anzahl an Entscheidungen  $|X|$  skaliert, siehe Formel (48).

$$BE_x^{rel} = \frac{BE_x}{\max(BE_x)} \quad (45)$$

$$UD_x^{rel} = \frac{UD_x}{\max(UD_x)} \quad (46)$$

$$GW_x^{rel} = \frac{BE_x^{rel} + UD_x^{rel}}{2} \quad (47)$$

$$G_x^{rel} = \left[ (|X| - 1) \cdot \frac{GW_x^{rel} - GW_{x,min}^{rel}}{GW_{x,max}^{rel} - GW_{x,min}^{rel}} + 1 \right] \quad (48)$$

### Priorisierung der Defizite

Ziel der entscheidungsabhängigen Reifegradmodellierung ist es, eine systematische und zielorientierte Reduzierung der Defizite zu ermöglichen, um die Reifegrade möglichst schnell zu steigern. Somit ist es notwendig, die Defizite hinsichtlich ihrer Relevanz zur Informationsbeschaffung bzw. zur Performancesteigerung zu priorisieren.

Hierzu werden die **Reifegradübergabewerte**  $RG_{x,pl}^{ÜG|v}$  bzw. der **Reifegradübergabe-**

**vektor**  $RG_x^{ÜG}$  durch Vergleich der erforderlichen Soll-Reifegradwerte (Eingangswerte  $e_x^y$ ) zum Treffen einer Entscheidung  $x$  mit den am Eingang  $y$  verknüpften Ist-Reifegradwerten der Reifegradvariablen  $RGV_{pl}^y$  ermittelt (Abbildung 7.19), siehe Formel (49). Es werden nur entwicklungsbedürftige Reifegradvariablen in den Übergabevektor übernommen, siehe Formel (50). Liegt der Ist-Wert der Reifegradvariablen über dem Soll-Wert, so wird der Übergabewert mit dem Eintrag 0 bewertet.

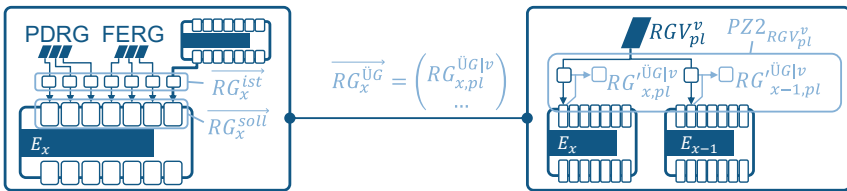
$$\overrightarrow{RG_x^{\text{ÜG}}} = \overrightarrow{RG_x^{\text{solI}}} - \overrightarrow{RG_x^{\text{Ist}}} \quad (49)$$

$$RG_{x,pl}^{\text{ÜG}|v} = \max(e_x^y - RGV_{pl}^v; 0) \quad (50)$$

Zur Einbindung der unterschiedlichen Entscheidungsrelevanz werden die Übergabewerte einer Entscheidung mit der relativen Gewichtung der Entscheidung kombiniert, siehe Formel (51).

$$\overrightarrow{RG_x^{\text{rÜG}}} = G_x^{\text{rel}} \cdot \overrightarrow{RG_x^{\text{ÜG}}} \quad (51)$$

Der **korrigierte Übergabevektor**  $\overrightarrow{RG_x^{\text{rÜG}}}$  beinhaltet nun alle **korrigierten entwicklungsbedürftigen Reifegrade**  $RG_{x,pl}^{\text{ÜG}|v}$  einer Entscheidung  $x$  unter Berücksichtigung der Entscheidungsrelevanz.



$E_x$ : Entscheidung  $x \in X$  | FERG: Fertigungsreifegrad | ■: RG-Variablen  $RGV_{pl}^v$  aus Reifegradmodellierung |  $RG_x^{\text{Ist}}$ : Vektor der Ist-Reifegrade |  $RG_x^{\text{solI}}$ : Vektor der Soll-Reifegrade |  $RG_{x,pl}^{\text{ÜG}|v}$ : Übergabewert einer Reifegradvariablen |  $RG_{x,pl}^{\text{rÜG}|v}$ : korrigierter Übergabewert einer Reifegradvariablen |  $\overrightarrow{RG_x^{\text{ÜG}}}$ : Übergabevektor der Reifegradvariablen | PDRG: Produktreifegrad |  $PZ2_{RGV_{pl}^v}$ : Prioritätszahl 2

### Abbildung 7.19 Ableitung der korrigierten Übergabevektoren zur Priorisierung der Defizite

*Derivation of the Corrected Transfer Vectors for Prioritization of Deficits*

Da eine Reifegradvariable oftmals Eingangsbedingung für mehrere Entscheidungen ist, werden die Übergabewerte aller Entscheidungen einer Reifegradvariable zusammengefasst und die **Prioritätszahl 2** ( $PZ2_{Di}$ ) ermittelt, siehe Formel (52).

$$PZ2_{Di} = PZ2_{RGV_{pl}^v} = \sum_{x=1}^{x_{pl}^v} RG_{x,pl}^{\text{rÜG}|v} \quad (52)$$

Prioritätszahl 2 gibt somit Auskunft darüber, welche Defizite in Abhängigkeit der Entscheidungen für eine bestmögliche Reifegradsteigerung priorisiert zu reduzieren sind. Die **Menge  $X_{pl}^v$  beinhaltet alle freigegebenen Entscheidungen**, die von einer Reifegradvariable  $RGV_{pl}^v$  beeinflusst werden. Mit Hilfe der verknüpften Defizite ( $D_i$ ) in den Reifegradmodellen (siehe oben) wird die Priorisierung auf die Defizite übertragen.

#### 7.1.4 Validierung und Zwischenfazit

*Validation and Interim Conclusion*

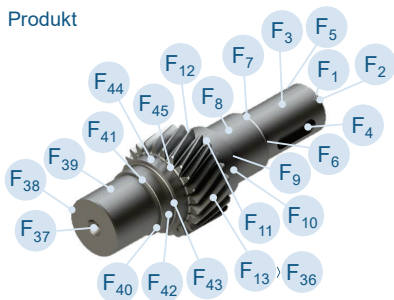
Wie in Abschnitt 2.1 hergeleitet, wird die vorliegende Arbeit den angewandten Handlungswissenschaften (Realwissenschaften) zugeordnet. Dem Verständnis des

Kritischen Rationalismus folgend gilt es, neben der logischen Wahrheit (Widerspruchsfreiheit) die faktische Wahrheit (empirische Erkenntnisse) der Modelle und Hypothesen zu prüfen [ALBE00]. Um während der Entwicklung der Methodik sicher zu stellen, dass die in den Abschnitten 7.1.1, 7.1.2 und 7.1.3 entwickelten Modelle und Methoden widerspruchsfrei und als vorläufig richtig oder wahr angenommen werden können (nicht falsifiziert, siehe Abschnitt 2.1), erfolgt in Abschnitt 7.1.4 die Durchführung von empirisch-induktiven Realisierungsuntersuchungen (Validierung) anhand eines Fallbeispiels [ULRI76a, S. 347 f.]. Im Folgenden wird in das Fallbeispiel eingeführt und die entwickelten Modelle und Methoden auf das Fallbeispiel angewendet.

### Einführung in das Fallbeispiel Ritzelwelle eines E-Antriebs

Im folgenden Fallbeispiel wird die Fertigung einer Ritzelwelle betrachtet, welche die Antriebskraft vom Elektromotor auf die Abtriebswelle überträgt (Abbildung 7.20). Das Fallbeispiel sowie die im Fallbeispiel genutzten Daten, basieren auf einem am WERKZEUGMASCHINENLABOR WZL DER RWTH AACHEN UNIVERSITY (heute MANUFACTURING TECHNOLOGY INSTITUTE MTI) vorliegenden Datensatz<sup>3</sup>.

#### Produkt



F <sub>1</sub>	Zentrierbohrung A	F <sub>12</sub>	Radius 1
F <sub>2</sub>	Fase 1	F <sub>13-36</sub>	Zahn 1-24
F <sub>3</sub>	Wellenabsatz 1	F <sub>37</sub>	Zentrierbohrung B
F <sub>4</sub>	Passfedernut 1	F <sub>38</sub>	Fase 3
F <sub>5</sub>	Passfedernut 2	F <sub>39</sub>	Lagersitz B
F <sub>6</sub>	Freistich 1	F <sub>40</sub>	Freistich 3
F <sub>7</sub>	Fase 2	F <sub>41</sub>	Fase 4
F <sub>8</sub>	Lagersitz A	F <sub>42</sub>	Wellenabsatz 3
F <sub>9</sub>	Freistich 2	F <sub>43</sub>	Radius 2
F <sub>10</sub>	Wellenabsatz 2	F <sub>44</sub>	Wellenabsatz 4
F <sub>11</sub>	Pilotbohrung	F <sub>45</sub>	Radius 3

#### Fertigungsfolge



P <sub>1</sub>	Handhaben 1	P <sub>6</sub>	Handhaben 2	P <sub>11</sub>	Schleifen 1	P <sub>16</sub>	Handhaben 7
P <sub>2</sub>	Bohren 1	P <sub>7</sub>	Verzahnungsfräsen	P <sub>12</sub>	Handhaben 5	P <sub>17</sub>	Verzahnungsschleifen
P <sub>3</sub>	Drehen	P <sub>8</sub>	Handhabung 3	P <sub>13</sub>	Fräsen 2	P <sub>18</sub>	Handhaben 8
P <sub>4</sub>	Fräsen	P <sub>9</sub>	Härten	P <sub>14</sub>	Handhaben 6		
P <sub>5</sub>	Bohren 2	P <sub>10</sub>	Handhaben 4	P <sub>15</sub>	Schleifen 2		

**Abbildung 7.20 Fallbeispiel Ritzelwelle – Produktmodellierung und Fertigungsfolge**

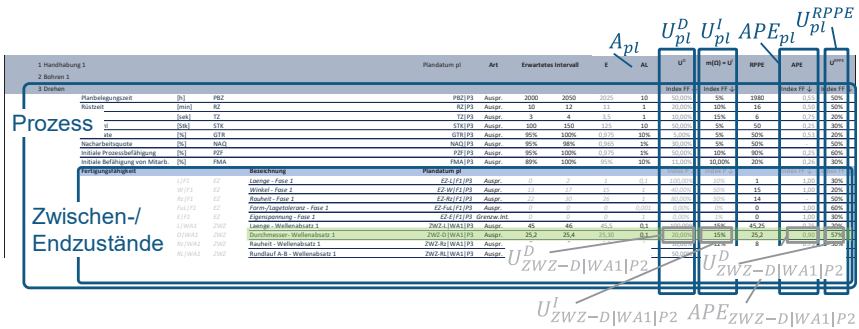
*Case study pinion shaft - product modeling and manufacturing sequence*

<sup>3</sup>Die zur Validierung eingesetzten Daten wurden 2020 im Rahmen des INKUBATORS TECHNOLOGIEKETTE von den beteiligten Fachabteilungen am WERKZEUGMASCHINENLABOR WZL DER RWTH AACHEN UNIVERSITY (heute MANUFACTURING TECHNOLOGY INSTITUT MTI) erhoben. Weitere Inhalte und Aktivitäten im Rahmen des Inkubators sind CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology veröffentlicht [BECK22].

Der Datensatz enthält geplante, unsicherheitsbehaftete Produkt-, Prozess- und Wirtschaftlichkeitsdaten der Ritzelwelle in unterschiedlichen Entwicklungsstadien im Serienanlauf sowie im Anlauf prognostizierte Restentwicklungsumfänge. Abbildung 7.20 zeigt die Modellierung der Ritzelwelle, deren Featurezuordnung sowie die eingesetzte Fertigungsfolge. Insgesamt wurde die Ritzelwelle über 45 Features beschrieben. Die Fertigung erfolgte zunächst mittels Weichzerspanung (Bohren, Drehen, Fräsen sowie Verzahnungsfräsen) und anschließender Wärmebehandlung. In der Hartbearbeitung erfolgte abschließend die Fertigung der Wellenabsätze (Lagerabsätze) und der finalen Zahngeometrie durch Schleifen. Die Daten des Fallbeispiels Ritzelwelle werden im Folgenden zur Validierung der entwickelten Methodik genutzt. Die verwendeten Daten entstammen einem exemplarischen Sprintdurchlauf, um die Anwendbarkeit und Funktion der einzelnen Methodikschritte zu visualisieren.

### Modellierung von Plandaten und Anlaufperformance zur Ableitung von Defiziten (Simulationsgrundlage)

Im ersten Schritt wurden für das Fallbeispiel, entsprechend des in Abschnitt 7.1.1 entwickelten Vorgehens, die Plandaten modelliert. Die Erfassung der Plandaten erfolgt mit Hilfe der Software MICROSOFT EXCEL. Der Wellenabsatz 1 wird durch die Merkmale Länge, Durchmesser, Rauheit, Rundlauf A-B, Eigenspannung und Härte beschrieben. Mit Hilfe der Modellierung nach REY [REY20] wurden die erwarteten Intervalle sowie die Informationsunsicherheiten der Merkmale ermittelt. Die Fertigung der Passung von Wellenabsatz 1 erfolgt in den zwei Fertigungsschritten Drehen ( $P_3$ ) und Schleifen ( $P_{15}$ ). Somit wird die geforderte Merkmalsausprägung der Produktplandaten mit dem Endzustand beim Schleifprozess verknüpft. In Abbildung 7.21 ist die Modellierung des Zwischenzustands nach dem Drehen sowie die Modellierung der Anlaufperformance des Drehprozesses in Bezug auf die Fertigung des Zwischenzustands der Passfläche in grün markiert gezeigt. Aus der Informationsaggregation (Evidenzmodellierung) wurde im Zwischenzustand beim Drehen ( $P_3$ ) zur Vorbereitung der Passung 25h6 das erwartete Ausprägungsintervall für das Plandatum (Merkmal) Durchmesser von Wellenabsatz 1 ( $pl = m = ZWZ - D|WA1$ ) mit den Intervallgrenzen 25,2 mm und 25,4 mm mit einer Informationsunsicherheit von  $U_{ZWZ-D|WA1}^I = 15\%$  ermittelt. Aus der Informationsunsicherheit ergibt sich im Folgenden das Informationsdefizit  $ID_{93}^{FF} = D_{93} = 0,15$ . Basierend auf der notwendigen Auflösung von  $A_{ZWZ-D|WA1} = 0,1\text{ mm}$  ergibt sich eine Definitionsunsicherheit von  $U_{ZWZ-D|WA1}^D = 20\%$ , siehe Abbildung 7.21. Aus der Definitionsunsicherheit ergibt sich im Folgenden das Informationsdefizit  $ID_{92}^{FF} = D_{92} = 0,2$ . Da die Anlauffreigabe für den Drehprozess aufgrund der vorliegenden Simulationsgrundlage vorliegt, wurden in Realsprints erste Realdaten generiert. In ersten Drehversuchen wurde ein gemittelter Durchmesser von 25,2 mm erreicht (siehe Abschnitt 7.3.3), wodurch sich aus der ermittelten Distanz  $\Delta_{ZWZ-D|WA1|P3}^{ape} = |25,3 - 25,2| = 0,1$  eine Anlaufperformance von  $AP_{E_{ZWZ-D|WA1|P3}} = 0,90$  ergibt.



$A_{pl}$ : Auflösung eines Plandatums pl |  $APE_{pl}$ : Anlaufperformance | E: Erwartungswert | pl: Plandatum |  $U_{pl}^D$ : Definitionsunsicherheit eines Plandatums pl |  $U_{pl}^I$ : Informationsunsicherheit eines Plandatums pl |  $URPPE_{pl}$ : Unsicherheit der realen Prozessperformance eines Prozesses bezogen auf das Plandatum pl

**Abbildung 7.21 Modellierung des Zwischenzustands Durchmesser Wellenabsatz 1 nach dem Drehen und der Anlaufperformance vom Drehprozess**

*Modeling of the Intermediate State Diameter Shaft 1 after Turning and the Ramp-Up Performance from Turning Process*

Aus der Anlaufperformance ergibt sich im Folgenden das Performancedefizit  $PD_{94} = D_{94} = 0,1$ . Basierend auf der Auswertung der vorliegenden Versuchsdaten (siehe Abschnitt 7.3.3) ergibt sich eine Unsicherheit bezüglich der realen Prozessperformance von  $U_{ZWZ-D|WA1|P3}^{RPPE} = 57\%$ . Aus der Performanceunsicherheit ergibt sich im Folgenden das Performancedefizit  $PD_{95} = D_{95} = 0,57$ . Aus den Unsicherheiten und den Anlaufperformances wurden zum gezeigten Sprint vier Defizite abgeleitet (insgesamt mehr als 1.280 Defizite) und priorisiert, welche im Folgenden die Grundlage und Ausgangspunkt der Validierung bilden.

**Identifikation, Bewertung und Priorisierung von Restentwicklungsumfängen**

Ausgehend von der in Abschnitt 7.1.2 formulierten Hypothese, dass jedes Defizit potenziell ursächlich für mindestens einem Restentwicklungsumfang ist, dem durch das Einholen von Informationen und Durchführen von Prototypen und Validierungsversuchen im Entwicklungsprozess entgegengewirkt wird, wurden basierend auf den abgeleiteten Defiziten potenzielle Restentwicklungsumfänge identifiziert. Insgesamt wurden mehr als 160 potenzielle REU wie bspw. notwendige Anpassungen von Prozessparameter aufgrund ungenauer Abschätzungen, Austausch von Werkzeugen und Anpassungen von verschiedenen Kostenparametern identifiziert. Die identifizierten REU wurden anschließend durch Anwendung der drei Bewertungskennzahlen Auftretenskoeffizient, Bedingungskoeffizient und Validierungskoeffizient bewertet. Beispielsweise sind für das Auftreten von Restentwicklungsumfang  $REU^{127}$  (Einsatz eines neuen Werkzeugs beim Drehen) die Defizite  $D_{1124}$  (aus der Definitionsunsicherheit der Rauheit von Wellenabsatz 1) und  $D_{1125}$  (aus der Informationsunsicherheit der Rauheit von Wellenabsatz 1) ursächlich. Veränderungen der Informationen führen unter Umständen zu neuen Rauheitsvorgaben, welche mit der bestehenden Schleifscheibe

nicht erreicht werden. Somit ist es notwendig, die Schleifscheibe auszutauschen. Unter Angabe der Ursacheevidenzen und Aggregation aller für  $REU^{127}$  ursächlichen Defizite wurde ein Auftretenskoeffizient von  $AK^{127} = 5$  ermittelt. Zu Ermittlung des Bedeutungskoeffizienten von  $REU^{127}$  wurden die ursächlichen Defizite hinsichtlich ihrer Relevanz sowie das potenzielle Schadensausmaß bewertet. Da die Verfehlung der Rauheit die Funktionalität der Ritzelwelle beeinträchtigt ( $RFR^{127} = 8$ ) und das potenzielle Schadensausmaß zur Beseitigung des REU durch Kauf einer neuen Schleifscheibe mit 500 € ( $PS^{127} = 2$ ) bewertet wurde, ergibt sich ein Bedeutungskoeffizient von  $BK^{127} = 8$ . Für die Validierung von  $REU^{127}$  ist der Serienwerkstoff sowie der Serienprozess notwendig. Bezüglich der Geometrie ist eine seriennahe Geometrie ausreichend. Somit ergibt sich zum gezeigten Sprint unter Berücksichtigung aller vorliegenden Informationen ein Validierungskoeffizient von  $VK^{127} = 7$ . Die Bewertungen der REU wurden in die Dringlichkeitsmatrix übertragen und die Priorisierung der Defizite basierend auf der Bewertung der REU abgeleitet.

### **Bewertung des Entwicklungsfortschritts**

Ausgehend von den im vorangegangenen Abschnitt modellierten Plandaten erfolgt im Folgenden die Ermittlung des Produkt- und Fertigungsreifegrads als zentrale Kenngrößen des agilen Serienanlaufs. Bezogen auf das Fallbeispiel (Ritzelwelle) werden insgesamt 45 Features (406 Merkmale), 18 Prozesse sowie 47 Entscheidungen (Anlauf freigabe der Prozesse, Werkzeugumstellung, Durchführung von Schulungs- und Verbesserungsmaßnahmen sowie SOP-Freigaben der Prozesse) im Reifegradmodell verknüpft. Es ergibt sich zum gezeigten Sprint ein Produktreifegrad von  $PDRG = 92,20\%$  sowie ein Fertigungsreifegrad von  $FERG = 65,83\%$ . Unter der Annahme, dass alle reifegradvariablen den Wert eins erhalten, wurde gezeigt, dass sich ein PDRG und ein Fertigungsreifegrad von eins ergeben. Ziel ist es im Folgenden, die Veränderung der Defizite und somit der Reifegradvariablen über der Zeit zu prognostizieren. Für die Priorisierung der Defizite basierend auf der Reifegradentwicklung wurden Entscheidungen wie bspw. Erteilung der Anlauf freigabe, Umstellung von Versuchs- auf Serienwerkzeug bei den jeweiligen Prozessen oder die Durchführung von Verbesserungs- und Schulungsmaßnahmen mit den Reifegradvariablen verknüpft und die Defizite durch Auswertung der notwendigen Eingangswerte priorisiert.

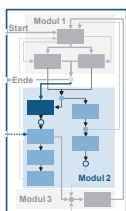
### **Zwischenfazit**

Forschungsfrage 1 bezieht sich auf die Modellierung der unsicheren Simulationsgrundlage im agilen Serienanlauf durch die Ableitung von Defiziten und der Bewertung deren Auswirkungen auf den Entwicklungsfortschritt bzw. Prognose potenzieller Restentwicklungsumfänge. Wie die Validierung zeigt, wurden alle formalen und die inhaltlichen Anforderungen 1-8 berücksichtigt. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde in Abschnitt 7.1.1 ein Vorgehen entwickelt, mit Hilfe dessen die systematische Ableitung von Defiziten (Anforderung 7) zur Bewertung der Simulationsgrundlage anhand von Unsicherheiten ermöglicht wird (Anforderung 7). Zur Identifikation von Restentwicklungsumfängen wurde in Abschnitt 7.1.2 ein Vorgehen entwickelt, welches die

Identifikation und Bewertung von Restentwicklungsumfängen basierend auf den abgeleiteten Defiziten und somit Unsicherheiten ermöglicht (Anforderung 3 und 4). Mit dem in Abschnitt 7.1.3 entwickelten Modell zur entscheidungsabhängigen Reifegradbewertung wurde die Voraussetzung geschaffen, fertigungstechnologische Wechselwirkungen und (entscheidungsbedingte) Abhängigkeiten in die Methodik zu integrieren (Anforderung 2, 5, 6 und 8). Die Anwendung der entwickelten Modelle und Methoden hat gezeigt, dass die systematische Ableitung von Defiziten die Identifikation, Bewertung und Priorisierung von REU sowie die kombinierte Bewertung des Entwicklungsfortschritts vom Produkt und von der Fertigungsfolge ermöglicht. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass die zielgerichtete und systematische Priorisierung der Defizite ermöglicht wird. Somit wurde gezeigt, dass die formalen und inhaltlichen Anforderungen (1-8) erfüllt sind (siehe Abschnitt 6.1.1 und Abschnitt 6.1.2) und Forschungsfrage 1 durch die Erläuterungen in Abschnitt 7.1 beantwortet wird.

## 7.2 Stochastisches Prognosemodell (Modul 2)

### *Stochastic Prediction Model (Module 2)*



Im klassischen Serienanlauf werden Anlaufkurven als Planungsgrundlage eingesetzt, um den geplanten zeitlichen Verlauf bzw. geplanten Anstieg der Produktionsmenge über der Zeit zu visualisieren. Neben der Planung der Produktionsmenge besteht die Aufgabe des Anlaufmanagements darin, den organisatorischen und zeitlichen Ablauf von Serienanläufen zu planen und operationalisierbare Zielgrößen im Serienanlauf zu definieren (Abschnitt 3.2.2). Neben Qualitäts-, Produktionsmengen- und Anlaufkostenzielen bilden die Erreichung der Produkt- und Fertigungsreife relevante Zielgrößen der Anlaufplanung. [NAGE11, S. 23 ff.] Die methodische Kombination von Serienanlauf und agiler Produktentwicklung im agilen Serienanlauf erfordert durch die agile Gestaltung des Design Freezes und der unsicheren und unvollständigen Informations- und somit Planungsgrundlage neuer Ansätze, welche Anwendende bei der Definition und beim Monitoring operative Zielgrößen unterstützen. Daher liegt der Fokus von Abschnitt 7.2 auf der Entwicklung eines Simulationsmodells (-algorithmus) zur unsicherheitsbehafteten Prognose des Entwicklungsfortschritts agiler Serienanläufe. Die abgeleiteten Informations- und Anlaufperformancedefizite aus Modul 1 bilden die zentralen Simulationsvariablen (Input) im stochastischen Prognosemodell (Abbildung 7.22). Basierend auf der Priorisierung der Informations- und Anlaufperformancedefiziten aus Modul 1 sowie der zur Verfügung stehenden Sprintkapazität ist das Ziel, in **Modul 2 (Stochastisches Prognosemodell)** die Auswirkungen der systematischen Reduktion der Defizite zu prognostizieren. Durch den iterativen Austausch und Wiederholprozess von Modul 1 und 2 werden die Reifegrade systematisch gesteigert bzw. die Restentwicklungsumfänge reduziert. Als Ergebnis von Modul 2 lassen sich die unsicherheitsbehafteten Anlaufkurve und -kosten prognostizieren.

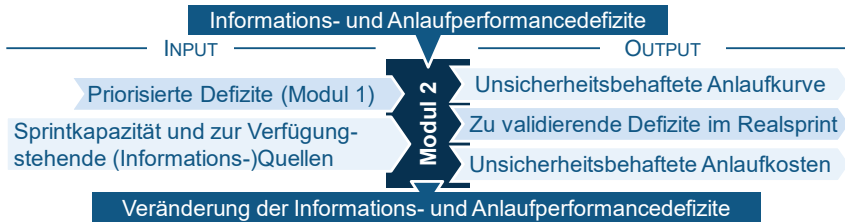


Abbildung 7.22 Input und Output von Modul 2 der Methodik

*Input and Output of Modul 2 of the Methodology*

Zur Erreichung des Ziels erfolgt in Abschnitt 7.2 die Beantwortung der Forschungsfrage 2.

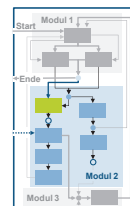
**Forschungsfrage 2:** *Wie ist ein stochastisches Prognosemodell zu gestalten, welches Anwendenden die Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven durch Integration unvollständiger, sprintweise generierter Informationen unter Berücksichtigung einer iterativen Bedarfspriorisierung ermöglicht, um die unsicherheitsbehafteten Anlaufkosten im agilen Serienanlauf zu bewerten?*

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 2 erfolgt zunächst in Abschnitt 7.2.1 die Entwicklung eines algorithmusbasierten Vorgehens zur Priorisierung von Defiziten, um in Abschnitt 7.2.2 die systematische, sprintweise Reduktion von Defiziten zu simulieren. In Abschnitt 7.2.3 wird ein stochastisches Prognosemodell entwickelt, um die Auswirkungen der sprintweisen Reduktion (theoretische Informations- & Anlaufperformancedefizitsreduktion) zu prognostizieren. Zur Bewertung der Anlaufkosten erfolgt in Abschnitt 7.2.4 die Entwicklung eines Bewertungsmodells für Anlaufsprinkosten. In Abschnitt 7.2.5 wird ein Modell entwickelt, welches die Prognoseergebnisse in Form von Anlaufkurven und kumulierten Anlaufkosten visualisiert. Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Abschnitte erfolgt abschließend in Abschnitt 7.2.6 Entwicklung eines Modells zur Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten. Zur wissenschaftlich fundierten Überprüfung der gewonnenen Erkenntnisse sowie zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der Methodik erfolgt in Abschnitt 7.2.7 die Bewertung und Validierung der entwickelten Modelle und Methoden anhand des Fallbeispiels aus Abschnitt 7.1.4.

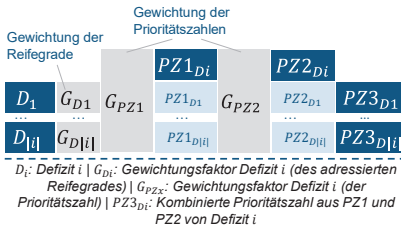
### 7.2.1 Bedarfspriorisierung zur systematischen Reduktion von Defiziten

*Need Prioritization for the Systematic Reduction of Deficits*

In den vorangegangenen Schritten der Methodik wurden sowohl in Abschnitt 7.1.2 als auch in Abschnitt 7.1.3 Modelle entwickelt, um Defizite hinsichtlich ihrer Dinglichkeit zu deren effizienten und systematischen Reduktion zu priorisieren. Mit den aus den Modellen zu ermittelnden Prioritätszahlen  $PZ1_{Di}$  und  $PZ2_{Di}$  werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Durch  $PZ1_{Di}$  wird die systematische Reduktion von



Restentwicklungsumfängen fokussiert (Abschnitt 7.1.2), wohingegen mit  $PZ2_{Di}$  die effektive Steigerung der Reifegrade, um möglichst schnell das Reifegradziel zu erreichen, adressiert wird (Abschnitt 7.1.3). Ziel von Abschnitt 7.2.1 ist es, Anwendenden bzw. im Simulationsmodell (Algorithmus) ein Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, mit Hilfe dessen die ermittelten Priorisierungen situationspezifisch synchronisiert werden und eine kombinierte Priorisierung der Defizite ermöglicht wird. Die Nutzwertanalyse ist eine etablierte Analysemethode der Entscheidungstheorie mit dem Ziel, die Entscheidungsfindung komplexer multikriterieller Entscheidungsprobleme basierend auf Erfüllungsgraden gewichteter Zielgrößen zu unterstützen [ZANG14]. Die ganzheitliche Priorisierung der Defizite (Synchronisation) lässt sich als multikriterielles Entscheidungsproblem auffassen und die Nutzwertanalyse zur Entscheidungsunterstützung in das Prognosemodell adaptieren (Abbildung 7.23). Die Prioritätszahlen werden

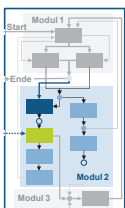


**Abbildung 7.23** Priorisierung der Defizite  
*Prisonization of Deficits*

entsprechend der Entscheidungssituation als Zielgrößen herangezogen. Zur systematischen Synchronisation gilt es, eine dynamische Gewichtung der Prioritätszahlen zu definieren. Es empfiehlt sich zu Beginn des Serienanlaufs die Reduzierung von Restentwicklungsumfängen und im späteren Verlauf die Reifegradsteigerung höher zu priorisieren (Gewichtung nach Prioritätszahlen). SCHUH empfiehlt eine Gewichtung der Defizite im Hinblick auf Produkt- und Fertigungsreifegrade zu differenzieren (Gewichtung nach Reifegraden) [SCHU05]. An dieser Stelle wird auf die Differenzierung der Informationsdefizite nach deren Basis (Produkt oder Fertigungsfolge) und Performancedefizite zurückgegriffen. Die Dynamik der Priorisierung ist anlaufspezifisch vom Anwendenden der Methodik festzulegen. Basierend auf der dynamischen **Gewichtung der Defizite nach Reifegraden** ( $G_{Di}$ ) bzw. nach **Prioritätszahlen** ( $G_{PZx}$ ) erfolgt die Ermittlung der **kombinierten Prioritätszahl 3 der Defizite**  $PZ3_{Di}$ . Hierzu werden die Prioritätszahlen der Defizite ( $PZ1_{Di}$  und  $PZ2_{Di}$ ) mit den Gewichtungen kombiniert, siehe Formel (53).

$$PZ3_{Di} = G_{Di} \cdot (PZ1_{Di} \cdot G_{PZ1} + PZ2_{Di} \cdot G_{PZ2}) \tag{53}$$

**7.2.2 Theoretische Informations- & Anlaufperformancedefizitreduktion**  
*Theoretical Information & Ramp-Up Performance Deficit Reduction*

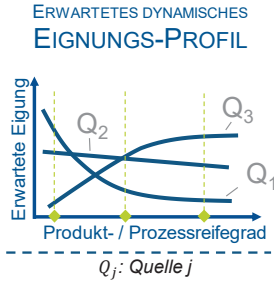


Die Reduktion von Defiziten ist ein zentrales Element der agilen Entwicklung und somit des agilen Serienanlaufs. Durch das Beschaffen von Informationen lassen sich Informationsdefizite reduzieren. Zur Informationsbeschaffung stehen verschiedene (Informations-) **Quellen** ( $Q_j, j \in J$ ) wie bspw. erfahrene Mitarbeitende, Experten, Fachliteratur, Normen oder im Sprint generierte Realdaten durch Prototypen oder

Validierungsversuche zur Verfügung (Abschnitt 7.1.1). [REY20] In Abgrenzung zu den Informationsdefiziten wird die Reduktion von Anlaufperformancedefiziten durch die physische Durchführung von Prototypen und Validierungsversuchen aufgrund von Lerneffekten erzielt. Somit stehen zur Anlaufperformancesteigerung lediglich die Quellen Prototypen- und Validierungsversuch zur Verfügung. Da es aufgrund beschränkter Kapazitäten produzierender Unternehmen nicht möglich ist, alle Defizite gleichzeitig in einem Sprint zu reduzieren, werden die Defizite iterativ in mehreren Sprints reduziert. Das Ziel von Abschnitt 7.2.2 ist es, ein Modell bereit zu stellen, welches die Simulation ermöglicht, welche Defizite unter Berücksichtigung deren Priorisierung (Abschnitt 7.2.1) mit welcher Quellen unter Einhaltung der **maximal zur Verfügung stehenden Kapazität**  $KAP_s^{max}$  im Sprint optimalerweise adressiert werden. Hierzu wird die Entscheidungssituation im Folgenden als Optimierungsproblem formuliert. Die Simulation welche Defizite durch welche Quelle adressiert werden, wird in Abgrenzung zur Realdatengenerierung im Folgenden als **Theoretische Informationsbeschaffung & Anlaufperformancesteigerung** bezeichnet.

Der Wert einer eingeholten Information bzw. durchgeführten Performancesteigerung ergibt sich aus dem Vergleich des erwarteten Nutzens (Verbesserung des Ergebnisses einer anstehenden Entscheidung) einer Information bzw. einer Performancesteigerung und dem Aufwand (Kosten) für die Informationsbeschaffung (Performancesteigerung) [SPRI13, S. 194 f.]. In Anlehnung an die statistische Entscheidungstheorie hat sich die Kosten-Nutzen-Analyse als Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung unvollständiger Informationen etabliert [HANU11, S. 132]. Hierzu gilt es im Folgenden, den Nutzen und Aufwand zur Reduktion eines Defizits durch die Nutzung einer Quelle zu quantifizieren.

Wie eingangs beschrieben, stehen im agilen Serienanlauf unterschiedliche Quellen zur Reduzierung der Defizite zur Verfügung. Der Nutzen einer Quelle ergibt sich zum einen aus der erwarteten Wirkung zur Reduzierung von REU und Steigerung der Reifegrade durch die Adressierung eines Defizits zum anderen aus der Eignung einer Quelle zur Adressierung eines Defizits. Die **Wirkung** entspricht der aus der Kombination von Prioritätszahl 1 und 2 (siehe Abschnitt 7.1.2 und Abschnitt 7.1.3) eingeführten Prioritätszahl 3 (siehe Abschnitt 7.2.1). Bezogen auf die Eignung einer Quelle ist es bspw. möglich, dass sich die Einschätzung von Expertinnen und Experten in bestimmten Situationen zur Bewertung einer Situation besser eignet als Aussagen von erfahrenen Mitarbeitenden. Darüber hinaus ist es möglich, dass die Eignung einer Quelle aufgrund veränderter Rahmenbedingungen im Laufe des Entwicklungsprojekts variiert. So eignet sich die Erfahrung von Mitarbeitenden zu Beginn des Serienanlaufs zur schnellen Abschätzung bestimmter Sachverhalte, welche mit fortschreitender Entwicklung aufgrund einer notwendigen höheren Präzision von Informationen und hierdurch notwendigen höheren Fachkenntnis u. U. abnimmt. Somit gilt es, den dynamischen Charakter der erwarteten Eignung einer Quelle in der Simulation zu Berücksichtigen. Hierzu wird die **Eignung einer Quelle**  $E_j^i$  in Bezug zu dem durch die Quelle zu reduzierendem Defizit veränderlich bzw. dynamisch in Abhängigkeit vom Reifegrad



**Abbildung 7.24 Ermittlung der erwarteten dynamischen Eignungs-Profile**

*Determination  
of the Expected  
Dynamic Suitability-Profiles*

bewertet und in Form einer Funktion (**erwartete dynamische Eignungs-Profil**) modelliert. Zur Ableitung des erwarteten dynamischen Eignungs-Profils einer Quelle erfolgt zunächst die Bewertung der Eignung durch Adaption der Vorgehensweise einer Nutzwertanalyse nach ZANGEMEISTER [ZANG14] an definierten Stützpunkten (Reifegradständen). Die Eignungsbewertung an den Stützpunkten orientiert sich an dem Ansatz von KREBS zur Bewertung der Datenqualität. Es wird davon ausgegangen, dass eine hohe Datenqualität eine hohe Eignung der Quelle impliziert. KREBS teilt die Bewertung der Datenqualität in vier Kategorien ein. Die Kategorie **Typ** beschreibt, ob und inwieweit die Daten für die vorliegende Entscheidungssituation geeignet sind. Die Kategorie **Inhalt** bewertet die technische Qualität der Daten, die unabhängig vom eigentlichen Inhalt der Daten ist. Dazu gehören die Attribute *Richtigkeit*, *Vollständigkeit* und *Objektivität*.

In der dritten Kategorie wird die **Aussagekraft** der Daten bewertet, unter anderem wie *präsent* oder *verständlich* die erhobenen Daten sind. Die vierte Kategorie bewertet die **Herkunft** der Daten und dient dazu, die **Vertrauenswürdigkeit** der Quelle zu beurteilen. Als Bewertungskriterien werden die Attribute *Verfügbarkeit*, *Zugänglichkeit* und *Nachvollziehbarkeit* herangezogen. [KREB11, S. 110 f.] Die beschriebenen Bewertungsgrößen dienen als erste Auswahl und sind von Anwendenden der Methodik vorab situationspezifisch festzulegen. Durch Interpolation mit bspw. der Interpolationsformel von LAGRANGE [SCHR45] werden die erwarteten dynamischen Eignungs-Profile der Quellen approximiert (Abbildung 7.24). Im Falle, dass die Quelle einen Prototyp / Validierungsversuch darstellt, wird der Prozessvektor  $\vec{P} = (P_1; \dots; P_p)$  angegeben, welcher die Fertigungs- und Handhabungsprozesse  $P_p \in [0; 1]$  definiert, die zur Informationsbeschaffung bzw. zur Fertigung der Prototypen notwendig sind. Prototypen- und Validierungsversuche stehen als Quellen erst dann zur Verfügung (bis dahin temporär nicht verfügbar), wenn allen im Prozessvektor definierten Prozesse ( $\vec{P}$ ) die Anlauf freigabe erteilt wurde. Die **Verfügbarkeit** einer Quelle wird durch die boolesche Variable  $Q_j^i$  abgebildet.

Neben dem Nutzen ist die Informationsbeschaffung bzw. Performancesteigerung mit Aufwand verbunden, welcher dem Nutzen entgegensteht. Für die Bewertung des erwarteten Aufwands wird zwischen dem erwarteten Zeitaufwand bzw. dem Kapazitätsverbrauch und den erwarteten anfallenden Kosten für die Nutzung der Quelle zur Beschaffung der Information bzw. zur Steigerung der Performance differenziert. Der Aufwand hängt von der jeweiligen Quelle ab und ist ebenfalls im Verlauf des Serienanlaufs dynamisch. So sind z. B. die Herstellungskosten für physische Prototypen in den frühen Phasen des agilen Serienanlaufs aufgrund der ggf. geringerer Anforderungen an

den Prototyp und der geringeren Anzahl niedriger als in späteren Phasen mit steigenden Anforderungen und Stückzahlen. Darüber hinaus ist die Beschaffung von Informationen und Performancesteigerung immer mit Zeitaufwand verbunden. Exemplarische Kostenbestandteile sind Lohnkosten, Beschaffungskosten, Materialkosten, Werkzeugkosten, Lizenzkosten oder Maschinenkosten [STAU17] und [REY20]. Die detaillierte Berechnung der Kosten einer Quellennutzung ist Bestandteil des in Abschnitt 7.2.4 entwickelten Kostenmodells zur Ermittlung der Anlaufsprinkosten. Für die Berechnung der erwarteten Kosten einer Quellenutzung in einem Sprint  $s$  wird an dieser Stelle auf die Berechnung der erwartete **dynamische Sprintkosten**  $K_{i,j,s}^{u|dyn}$  aus Abschnitt 7.2.4 verwiesen. Die **benötigte Kapazität**  $KAP_{j,s}^i$  zur Nutzung einer Quelle im Sprint  $s$  ergibt sich bspw. aus **Gesprächs-/Recherchezeiten für die Einholung von Informationen** ( $t_{i,s}^{IB}$ ), der benötigten **Kapazität zur Auswertung** ( $t_{i,s}^A$ ) und/oder der Erschließung der Quellen bspw. durch Lizenzbeschaffungszeiten oder Reisetätigkeiten. Im Fall der Informationsbeschaffung über Gespräche oder Recherchetätigkeiten wird die **Anzahl der Durchführungen sprintunabhängig mit**  $n_i^{IB} = 1$  definiert. Die Kapazität ergibt sich somit gemäß Formel (54).

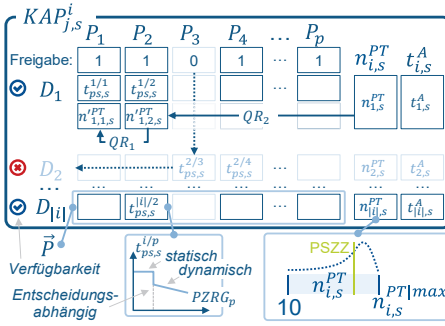
$$KAP_{j,s}^i = n_i^{IB} \cdot (t_{i,s}^{IB} + t_{i,s}^A) = (t_{i,s}^{IB} + t_{i,s}^A) \quad (54)$$

Die anfallenden Kapazitäten für die Einholung und Auswertung von Informationen wird vorab vom Anwendenden der Methodik festgelegt. Dabei besteht die Möglichkeit, die Zeit statisch oder ebenfalls dynamisch über die Approximation mittels Funktion (siehe erwartetes dynamischen Eignungs-Profil) zu ermitteln. Im Folgenden wird diese als statisch angenommen. Im Fall, dass die Quelle einen Prototypenversuch darstellt, wird die Kapazität ( $KAP_{j,s}^i$ ) über die **Pseudo(fertigungs)zeit der eingesetzten Fertigungs- und Handhabungsprozesse** ( $t_{ps,s}^{i/p}$ ) und die **Versuchsauswertungszeit** ( $t_{i,s}^A$ ) in Abhängigkeit von einer simulierten **Anzahl zu fertigender Prototypen**  $n_{i,s}^{PT}$  (bzw. **korrigierten simulierten Anzahl zu fertigender Prototypen**  $n_{i,p,s}^{PT}$ , siehe Formel (58)) ermittelt, siehe Formel (55).

$$KAP_{j,s}^i = \sum_{p \in P} (n_{i,p,s}^{PT} \cdot t_{ps,s}^{i/p}) + n_{i,s}^{PT} \cdot t_{i,s}^A \quad (55)$$

Die **Pseudo(fertigungs)zeit eines Fertigungs-/Handhabungsprozesses** ( $t_{ps,s}^{i/p}$ ) beschreibt eine zur Simulation angesetzte Zeit zur Herstellung (Handhabung) des Elements (Plandatums) zur Reduktion eines Defizits. Die Pseudo(fertigungs)zeit lässt sich aus Simulationen bzw. Kalkulationen der Technologiegroßplanung ableiten und wird vom Anwendenden der Methodik vorab festgelegt. Die Pseudo(fertigungs)zeit kann dabei konstant (statisch) oder dynamisch über der Entwicklungszeit ( $PZRG_p$ ) sowie durch das Treffen von Entscheidungen veränderlich modelliert werden (Abbildung 7.25). Die Anzahl der zu fertigenden Prototypen  $n_{i,s}^{PT}$  wird im Algorithmus per Pseudozufallszahl ( $PSZZ$ ) mit Hilfe der Monte Carlo Simulation ermittelt und bezieht sich ebenfalls auf das Element (Plandatum) zur Reduktion eines Defizits.

Die Monte Carlo Simulation umfasst eine numerische Methode basierend auf Zufallsexperimenten bzw. Zufallsgrößen zur Lösung mathematischer Probleme in dem durch die Generierung von Zufallszahlen künstliche und zufällige Stichproben erzeugt werden. Hierdurch lassen sich Zusammenhänge basierend auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen simulieren. [SCHN11, S. 1 ff.] und [LAW13, S. 714 ff.] Zur Ermittlung der Prototypenanzahl wird vom Anwendenden der Methodik ein mögliches Intervall zu fertigender Prototypen  $n_{i,s}^{PT} = [10, n_{i,s}^{PT|max}]$  vorab definiert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der PSZZ wird über eine Beta-Verteilung abgebildet, da die Annahme zugrunde liegt, dass die maximal mögliche Anzahl der zu fertigenden Prototypen mit höherer Wahrscheinlichkeit angestrebt wird. Die Form der Beta-Verteilung wird über die **Formparameter**  $\alpha_i^{PT}$  und  $\beta_i^{PT}$  modelliert. Um der Realität gerecht zu werden, dass in frühen Phasen des agilen Serienanlaufs eine geringere Anzahl Prototypen zur Reduzierung von Defiziten ausreichend ist und in späteren Phasen bzw. bei niedrigen Defiziten eine weitere Reduktion nur durch eine größere Anzahl Prototypen möglich ist, werden die Formparameter  $\alpha_i^{PT}$  und  $\beta_i^{PT}$  der Betaverteilung dynamisch über die **Funktionen**  $f_{(Di)}^\alpha$  und  $f_{(Di)}^\beta$  modelliert



$D_i$ : Defizit  $i$  |  $Q_j$ : Quelle  $j$  |  $n_{i,s}^{PT}$ : Anzahl Prototypen für Defizit  $i$  |  $n_{i,p,s}^{PT}$ : Korrigierte Anzahl Prototypen für Defizit  $i$  bei Prozess  $p$  |  $P_p$ : Prozess  $p$  |  $\vec{p}$ : Prozessvektor |  $PZR_{G_p}$ : Reifegrad von Prozess  $p$  |  $QR_p$ : Qualitätsrate von Prozess  $p$  |  $t_{p,s}$ : Pseudo Bearbeitungszeit |  $t_{i,s}^A$ : Versuchsauswertungszeit

**Abbildung 7.25 Ermittlung der Kapazität bei Prototypen-/Validierungsversuchen**

*Determination of Capacity During Prototype/Validation Tests*

(Formel (56) und (57)). Hierzu werden die **Start- ( $\alpha_i^{PT/S}$  bzw.  $\beta_i^{PT/S}$ ) und Endwerte ( $\alpha_i^{PT/E}$  und  $\beta_i^{PT/E}$ ) der Formparameter** vorab definiert. Die Start- und Endwerte können situationsbedingt individuell gewählt werden, solange gilt, dass  $\alpha_i^{PT/S} < \alpha_i^{PT/E}$  und  $\beta_i^{PT/E} < \beta_i^{PT/S}$ . Ein für die Methodik sinnvoller Wertebereich liegt zwischen eins und zehn. Ein sinkendes Defizit resultiert in einer Rechtsverschiebung der Wahrscheinlichkeitsverteilung.

$$f_{(Di)}^\alpha = \alpha_i^{PT/S} + (|\alpha_i^{PT/E} - \alpha_i^{PT/S}|) \cdot (1 - D_i) \tag{56}$$

$$f_{(Di)}^\beta = \beta_i^{PT/S} - (|\beta_i^{PT/E} - \beta_i^{PT/S}|) \cdot (1 - D_i) \tag{57}$$

Die simulierte Prototypenanzahl (PSZZ) beschreibt die Anzahl an Gutteilen der Prototypen, welche zur Versuchsauswertung eingesetzt werden. Zur Berücksichtigung der Gutteilrate  $GTR_{p,s}$  (siehe Abschnitt 7.1.3) wird die durch die PSZZ ermittelte Anzahl

Prototypen über die eingesetzte Prozessfolge ( $\vec{p}$ ) korrigiert und den relevanten Prozessen zugeordnet (Abbildung 7.25), siehe Formel (58). Wird nur ein Prozess zur Validierung eingesetzt, so gilt  $n_{i,p+1,s}^{PT} = n_{i,s}^{PT}$ .

$$n_{i,p,s}^{PT} = \left\lceil \frac{n_{i,p+1,s}^{PT}}{GTR_{p,s}} \right\rceil \quad (58)$$

Analog zu den Prototypenversuchen erfolgt die Ermittlung der Kapazität von Validierungsversuchen. Dabei wird die Anzahl Prototypen mit der Anzahl an Versuchswiederholungen und die Pseudo(fertigungs)zeit mit der Versuchsdurchführungszeit gleichgesetzt.

In der industriellen Praxis ergibt sich oftmals ein Trade-Off zwischen den Kosten und der aufzuwendenden Kapazität als aufwandsdominierende Größe. Bei der Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Kapazität besteht zum einen die Möglichkeit, möglichst viele Quellen mit geringen Kapazitätsverbräuchen zu nutzen, die u. U. mit hohen Kosten verbunden sind zum anderen möglichst kostengünstige Quellen zu nutzen, bei denen höhere Kapazitätsverbräuche anfallen und somit in Summe weniger Quellen genutzt werden. Die **Gewichtung von Kosten und Kapazität** bei der Ermittlung des Aufwands wird über die Parameter  $\vartheta_{KAP}$  und  $\vartheta_K$  (wobei  $\vartheta_K = 1 - \vartheta_{KAP}$  gilt) von Anwendenden der Methodik situationsspezifisch vorab festgelegt. Die Zielfunktion des Optimierungsproblems wird wie folgt formuliert, siehe Formel (59).

$$\max: ZF_s = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{Q_j^i \cdot (E_j^i + PZ3_{Di})}{\vartheta_{KAP} \cdot \frac{KAP_{j,s}^i}{\max [KAP_{j,s}^i]} + \vartheta_K \cdot \frac{K_{i,j,s}^{|\mu|Dym}}{\max [K_{i,j,s}^{|\mu|Dym}]}} \quad (59)$$

Zur Lösung des Optimierungsproblems gilt es die folgenden Nebenbedingungen zu berücksichtigen (Formel (60), (61) und (62)):

- I. Die Verfügbarkeit einer Quelle erfolgt über eine boolesche Variable und nimmt die Werte 0 oder 1 an:

$$Q_j^i \in \{0; 1\} \quad (60)$$

- II. Es darf maximal eine Quelle pro Defizit eingesetzt werden:

$$\sum_{j=1}^J Q_j^i \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (61)$$

- III. Die für die Reduktion der Defizite in einem Sprint aufgebrauchte Kapazität darf maximal der Sprintkapazität entsprechen:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Q_j^i \cdot KAP_{j,s}^i \leq KAP_s^{max} \quad (62)$$

Zur Lösung des Optimierungsproblems existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Optimierungsalgorithmen. Um die praktische Anwendbarkeit der Methodik sicherzustellen, wird ein Optimierungsalgorithmus benötigt, der nicht zwangsläufig die beste, sondern eine für die Anwendung brauchbare Lösung findet. Die Wahl des Lösungsalgorithmus ist den Anwendenden der Methodik situationsspezifisch festzulegen. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Beschreibung der Algorithmen verzichtet und auf bestehende Fachliteratur wie bspw. von KOOP und MOOCK [KOOP18] verwiesen.

Ergebnis des Abschnitts 7.2.2 ist ein algorithmusbasiertes Modell, welches im stochastischen Prognosemodell die systematische Auswahl der zu reduzierenden Defizite in Kombination optimaler Quellen im Folgesprint unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Sprintkapazität ermöglicht, um das bestmögliche erwartete Nutzen-Aufwand-Verhältnis der Informationsbeschaffung/Performancesteigerung zu erzielen.

$$\begin{matrix} (D_{21}|Q_3) & (D_{22}|Q_3) & (D_{11}|Q_2) & (D_6|Q_5) & (D_{81}|Q_5) \\ (D_{13}|Q_1) & (D_{50}|Q_1) & (D_4|Q_1) & (D_{36}|Q_4) & \end{matrix}$$

**Abbildung 7.26 Anwendungsbeispiel**

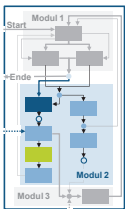
*Application Example*

*Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Schritte wird beispielhaft davon ausgegangen, dass in einer Anlaufsituation insgesamt  $i = 100$  Defizite vorliegen. Nach Ausführung des Algorithmus zur Auswahl von*

*Quellen unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Sprintkapazität wurden die Defizite 2, 22, 11, 6, 81, 13, 50, 4 und 36 zur Reduktion definiert sowie die jeweils zu nutzende Quelle ( $j \in \{1,2,3,4,5\}$ ) den Defiziten zugeordnet (Abbildung 7.26).*

### 7.2.3 Prognose der theoretischen Informations- & Anlaufperformancedefizitentwicklung

*Prediction of the Theoretical Information & Ramp-Up Performance Deficit Development*



Basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 7.2.2 gilt es, für die Simulation des Entwicklungsfortschritts im stochastischen Prognosemodell, die Auswirkungen der theoretischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung im simulierten Sprint bzw. sprintweise zu prognostizieren. Im Allgemeinen ergibt sich der Wert einer Information/Performancesteigerung aus dem Grad der Verbesserung einer Entscheidung/Handlung oder der vorliegenden Informations-/Datengrundlage [SPRI13, S. 194 f.]. In Bezug auf die Modellierung der Simulationsgrundlage durch Anwendung der Evidenztheorie (Abschnitt 7.1) ist es möglich, komplementär zueinanderstehende Informationen einzuholen, welche potenziell in einer Verschlechterung der Unsicherheitslage resultieren sowie von der bisherigen Simulationsgrundlage abweichende Ergebnisse der realen Prozessperformance durch Versuchsdurchführungen zu identifizieren. Um den Prozess der Defizitreduktion und somit die Reifegradsteigerung möglichst realitätsnah zu prognostizieren bzw. zu approximieren, ist es erforderlich, die Möglichkeit einer Verschlechterung der Simulationsgrundlage (Plandaten bzw. Anlaufperformance) in das Prognosemodell zu integrieren. Somit gilt es in einem ersten Schritt, die Richtung der Auswirkung (**Wirkrichtung**) einer theoretischen

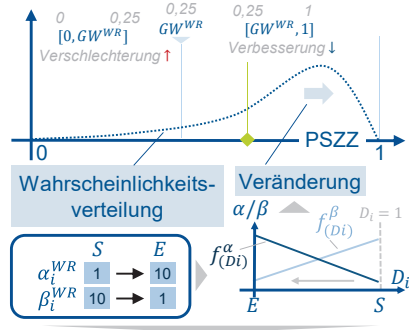
Informations- und Anlaufperformancedefizitreduktion (Verbesserung/Verschlechterung) zu prognostizieren. Im zweiten Schritt wird basierend auf der prognostizierten Wirkrichtung der **Wert der Auswirkung** der theoretischen Informations- und Anlaufperformancedefizitreduktion prognostiziert.

**Prognose der Wirkrichtung**

Die Prognose der Wirkrichtung einer theoretischen Informations- und Anlaufperformancedefizitreduktion wird durch Generierung von PSZZ mit Hilfe der Monte Carlo Simulation ermittelt, siehe Abschnitt 7.2.2 (Abbildung 7.27). Zur Ermittlung der Wirkrichtung wird vom Anwendenden der Methodik der **Intervallgrenzwert für die Wirkrichtung**  $GW^{WR}$  (Verbesserung  $[GW^{WR}, 1]$ ) (Verschlechterung  $[0, GW^{WR}]$ ) im Wertebereich von 0 bis 1 definiert. Wird bspw. ein Intervallgrenzwert von  $WR = 0,25$  gewählt und liegt die PSZZ unter 0,25 resultiert eine eingeholte Information in einer Verschlechterung des Informationsdefizits.

Liegt die PSZZ über 0,25 wird das Informationsdefizit reduziert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der PSZZ wird mit Hilfe einer Betaverteilung approximiert, da davon ausgegangen wird, dass grundsätzlich eine höhere Wahrscheinlichkeit besteht, dass Defizite durch Informationsbeschaffung/Performancesteigerungen reduziert werden. Um der Realität gerecht zu werden, dass in späteren Phasen des agilen Serienanlaufs bzw.

bei geringen Defiziten durch gezieltere Informationsbeschaffung/Performancesteigerungen die Wahrscheinlichkeit steigt, mit zusätzlichen Informationen/Maßnahmen die Defizite weiter zu reduzieren, werden die Formparameter  $\alpha$  und  $\beta$  der Betaverteilung dynamisch über die Funktionen  $f_{(Di)}^\alpha$  und  $f_{(Di)}^\beta$  modelliert (Formel (56) und (57)). Hierzu werden die Start- ( $\alpha_i^{WR/S}$  bzw.  $\beta_i^{WR/S}$ ) und Endwerte ( $\alpha_i^{WR/E}$  und  $\beta_i^{WR/E}$ ) der Formparameter vorab definiert. Die Start- und Endwerte können situationsbedingt individuell gewählt werden, solange gilt, dass  $\alpha_i^{WR/S} < \alpha_i^{WR/E}$  und  $\beta_i^{WR/E} < \beta_i^{WR/S}$ . Ein für die Methodik sinnvoller Wertebereich liegt zwischen eins und zehn. Ein sinkendes Defizit resultiert somit in einer Rechtsverschiebung der Wahrscheinlichkeitsverteilung.



$\alpha_i^{WR}$	S	E
$\beta_i^{WR}$	1	10
	10	1

- $\alpha/\beta$ : Formparameter der Betaverteilung
- E: Endwert des Formparameters  $\alpha$  oder  $\beta$
- $f_{(Di)}^\alpha$ : Formparameterfunktion des Formparameters  $\alpha$
- $f_{(Di)}^\beta$ : Formparameterfunktion des Formparameters  $\beta$
- $D_i$ : Defizit  $i$
- $Q_j$ : Quelle  $j$
- PSZZ: Pseudozufallszahl
- S: Startwert des Formparameters  $\alpha$  oder  $\beta$
- $GW^{WR}$ : Wirkrichtungsgrenzwert
- ↓/↑: Prognostizierte Wirkrichtungen nach Simulation

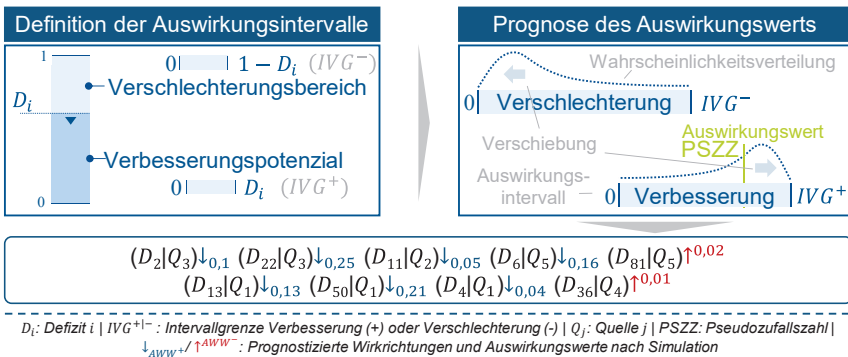
**Abbildung 7.27 Prognose der Wirkrichtung**

*Prediction of the Operating Direction*

$(D_2 Q_3)$	↓	$(D_{22} Q_3)$	↓	$(D_{11} Q_2)$	↓
$(D_6 Q_5)$	↓	$(D_{81} Q_5)$	↑	$(D_{13} Q_1)$	↓
$(D_{50} Q_1)$	↓	$(D_{41} Q_1)$	↓	$(D_{36} Q_4)$	↑

**Prognose der Auswirkung (Auswirkungswert)**

Nachdem die Wirkrichtung einer Informationsbeschaffung/Performancesteigerung prognostiziert wurde, gilt es den Grad der Verbesserung bzw. Verschlechterung (**Auswirkungswert – AWW**) der Defizite im Simulationssprint ( $S_{sim}$ ) zu prognostizieren. Hierzu werden zunächst die Auswirkungsintervalle abgeleitet. Die **Auswirkungsintervalle** bezeichnen den zulässigen Wertebereich der Auswirkungswerte zur Prognose der Verbesserung bzw. Verschlechterung des Defizits. In Anlehnung an LEVY wird ein mögliches Verbesserungspotenzial als proportional zur maximal möglichen Verbesserung angenommen [LEVY65, B-138]. Basierend auf der Annahme ergibt sich das Auswirkungsintervall einer Verbesserung (Reduzierung eines Defizits) aus der Differenz zwischen der maximal möglichen Informationssicherheit/Anlaufperformance von 1 (Defizit von 0) und dem aktuell vorliegenden Defizit  $D_i$  als **Intervallgrenze  $IVG^+ = D_i$**  (Abbildung 7.28).



**Abbildung 7.28** Prognose der Auswirkungen einer Informationsbeschaffung/Performancesteigerung

*Prediction of the Effects of an Information Acquisition/Performance Improvement*

Das Auswirkungsintervall zur Verschlechterung (Steigerung des Defizits) ergibt sich entsprechend als Komplement aus dem Intervall des maximalen Defizits von eins und dem vorliegenden Defizit  $D_i$  ( $IVG^- = 1 - D_i$ ). Basierend auf den ermittelten Auswirkungsintervallen wird der Auswirkungswert einer Informationsbeschaffung/Performancesteigerung prognostiziert. Dabei wird die Annahme getroffen, dass mit der Informationsbeschaffung/Performancesteigerung die maximal mögliche Verbesserung bzw. die minimal mögliche Verschlechterung angestrebt wird. Die Prognose bzw. Simulation des Auswirkungswerts erfolgt somit analog zur Wirkrichtungssimulation durch eine betaverteilte Pseudozufallszahl. Darüber hinaus wird die Annahme getroffen, dass mit sinkendem Defizit die Wahrscheinlichkeit steigt, die maximal mögliche Verbesserung bzw. eine minimal mögliche Verschlechterung zu erreichen. Daher werden die Formparameter der Beta-Verteilung ebenfalls durch die Formparameterfunktionen dynamisch in Abhängigkeit vom Defizit bzw. zur Intervallgrenze beschrieben, siehe Formel (63) und (64) (siehe Modellierung der Wirkrichtung).

$$f_{(Di)}^\alpha = \alpha_i^{WR/S} + (|\alpha_i^{WR/E} - \alpha_i^{WR/S}|) \cdot (1 - IVG^{+|-}) \tag{63}$$

$$f_{(Di)}^\beta = \beta_i^{WR/S} - (|\beta_i^{WR/E} - \beta_i^{WR/S}|) \cdot (1 - IVG^{+|-}) \tag{64}$$

Da die Beta-Verteilung auf dem abgeschlossenen Intervall von [0,1] definiert ist [LAW13, S. 295], ist es erforderlich, durch Anwendung und Umstellung der allgemeinen Skalierungsformel beliebiger Intervalle auf den Wertebereich [0,1] [BECK10, S. 75], den Wertebereich der Beta-Verteilung (betaverteilte PSZZ) auf die Auswirkungsintervalle zu skalieren. Die Skalierung erfolgt zum einen für die Skalierung der PSZZ zur Bewertung des **Auswirkungswerts einer Verbesserung**  $AWW_i^+$ , siehe Formel (65). Zum anderen entsprechend für den **Auswirkungswert einer Verschlechterung**  $AWW_i^-$ , bezogen auf die Auswirkungsintervalle, siehe Formel (66).

$$AWW_i^+ = PSZZ \cdot (D_i - 0) + 0 = PSZZ \cdot D_i \tag{65}$$

$$AWW_i^- = PSZZ \cdot ((1 - D_i) - 0) + 0 = PSZZ \cdot (1 - D_i) \tag{66}$$

Die Ermittlung der Auswirkungswerte wird für jede im aktuellen Sprint ( $S_{sim}$ ) simulierte Informationsbeschaffung/Performancesteigerung separat durchgeführt. Die ermittelten und simulierten Auswirkungswerte beschreiben in der Simulationstheorie die theoretischen Veränderungen der Defizite (der Plandaten bzw. der Anlaufperformance) aufgrund der theoretischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung durch die in Abschnitt 7.2.2 ausgewählten Quellen. Liegen bspw. stufenweise bewertete Defizite vor, wie bspw. der Werkstoffreifegrad  $\nabla^{WRG}$  bzw.  $S_{WRG}^D$  oder die Initialfähigkeit  $IPB_p$  bzw.  $IBMA_p$  wird das Intervall der PSZZ auf die möglichen Ausprägungen der Stufenbewertung angepasst. Basierend auf den simulierten Auswirkungen der Informationsbeschaffung/Performancesteigerung erfolgt ein Update der Simulationsgrundlage in Modul 1 (Abschnitt 7.1.1) sowie eine Neubewertung der Reifegrade und Prognose von Restentwicklungsumfängen. Die Ergebnisse der Reifegradentwicklung sowie die im Simulationssprint adressierten Defizite und Quellen werden in Bezug zum Simulationssprint im Simulationstableau (SIM-Tableau) gespeichert (Abbildung 7.29).

SIM-Tableau		Informationsbeschaffung/ Performancesteigerung
$S_{sim}$	Reifegradentwicklung	
1	$\overline{RG}_1 = (PDRG_{sim}^1 \mid FERG_{sim}^1)$	$\overline{D}^1 = (D_i \mid Q_j \mid n_i^{PT} \mid \vec{P} \mid n_{i,p}^{I/P} \mid \overline{t}_{ps}^{I/P} \mid KAP_j^i \mid \dots)$
...		...
s	$\overline{RG}_s = (PDRG_{sim}^s \mid FERG_{sim}^s)$	$\overline{D}^s = (D_i \mid Q_j \mid n_i^{PT} \mid \vec{P} \mid n_{i,p}^{I/P} \mid \overline{t}_{ps}^{I/P} \mid KAP_j^i \mid \dots)$

$D_i$ : Defizit i |  $FERG_{sim}^s$ : Simulierter Fertigungsreifegrad |  $\overline{D}^s$ : Defizitvektor in Sprint s |  
 $Q_j$ : Quelle j |  $KAP_j^i$ : Kapazität zur Informationsbeschaffung |  $n_i^{PT}$ : Anzahl Prototypen/ Versuchsdurchläufe |  
 $n_{i,p}^{I/P}$ : Vektor korrigierter Anzahl Prototypen |  $\vec{P}$ : Prozessvektor |  $PDRG_{sim}^s$ : Simulierter Produktreifegrad |  
 $S_{sim}$ : Simulationssprint |  $\overline{t}_{ps}^{I/P}$ : Vektor Pseudo(fertigungs)zeit

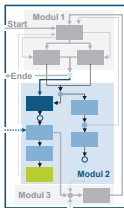
Abbildung 7.29 Simulationstableau (SIM-Tableau)

Simulation Tableau (SIM-Tableau)

Die im SIM-Tableau enthaltenen Größen bilden die Grundlage für die Prognose von Anlaufkurven und -kosten in den nachfolgenden Abschnitten.

### 7.2.4 Berechnung der Anlaufsprinkosten im agilen Serienanlauf

#### *Calculation of Ramp-Up Sprint Costs in Agile Ramp-Up Production*



Anlaufkosten stellen neben der Zeit zur Erreichung der erforderlichen Reifegrade eine zentrale Zielgröße im agilen Serienanlauf dar [WINK07, S. 6 ff.]. **Anlaufkosten** im agilen Serienanlauf werden im Folgenden definiert als die Summe der anfallenden Kosten die zur Informationsbeschaffung und Performancesteigerung sowie zur Befähigung von Mitarbeitenden und Fertigungs- bzw. Handhabungsprozessen bis zum Erreichen der Zielkriterien (ZK 1-ZK 3) anfallen und sich dem Produkt bzw. der Fertigung direkt zuordnen lassen. **Anlaufsprinkosten** werden im Folgenden definiert als die Summe der anfallenden Anlaufkosten bezogen auf einen Sprint und bilden somit eine Teilmenge der Anlaufkosten im agilen Serienanlauf. Ziel des folgenden Abschnitts ist die Quantifizierung der Anlaufsprinkosten. Die Struktur des Anlaufsprinkostenmodells agiler Serienanläufe basiert auf dem generischen System der Anlaufkosten nach MAUE [MAUE16], welche auf den agilen Serienanlauf übertragen wird. MAUE unterscheidet die fünf generische Kostenkategorien Produktions-, Beschaffungs-, Logistik-, Qualitäts- und Entwicklungskosten. Logistikkosten werden entsprechend des Bezugsrahmens der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Entwicklungskosten beschreiben im Folgenden Kosten durch die systematische und präventive Steigerung der Anlaufperformance. Somit sind die Produktionskosten im Sinne der Fertigungskosten von Prototypen bzw. Durchführungskosten von Validierungsversuchen eine Teilmenge der Entwicklungskosten und lassen sich in *zeitabhängige* (Fertigungs-/Durchführungskosten) und *zeitunabhängige Kosten* (Materialkosten) unterteilen (Abbildung 7.30). Es wird die Annahme zugrunde gelegt, dass durch die systematische und präventive Reduzierung der Defizite keine Restentwicklungsumfänge zu prognostizieren sind und somit keine Entwicklungskosten durch das Auftreten von REU im Prognosemodell anfallen. Für den Fall, dass im Realsprint Restentwicklungsumfänge auftreten und es zu Nachentwicklungen am Produkt oder der Fertigungsfolge kommt, werden die entstehenden Kosten für den anfallenden Entwicklungsaufwand den Fehlerkosten zugerechnet. Unter Beschaffungskosten werden im Folgenden Kosten zur Beschaffung von Informationen durch die Fertigung von Prototypen, Recherchen oder Validierungsversuche verstanden. Somit sind die Produktionskosten im Sinne der Fertigungskosten von Prototypen ebenfalls eine Teilmenge der Beschaffungskosten und lassen sich in *zeitabhängige* (Recherche-/Fertigungs-/ Durchführungskosten) und *zeitunabhängige Kosten* (Lizenz-/Materialkosten) unterteilen. Zu den Beschaffungskosten gilt es, die Kosten für die Erschließung einer Quelle wie bspw. Lizenzkosten von Normen oder Fachliteratur sowie Materialkosten von Prototypen zu berücksichtigen. Im Folgenden werden die Kosten zur Informationsbeschaffung bzw. zur Anlaufperformancesteigerung durch Prototypen und Validierungsversuche als

**Informations- bzw. Performancekosten** bezeichnet. Darüber hinaus gilt es, Qualitätskosten aus Investitions- und Fehlerkosten im Serienanlauf zu berücksichtigen. Bei den Fehlerkosten wird zwischen stückzahlabhängigen Anlaufkosten und unabhängigen Aufwänden differenziert.

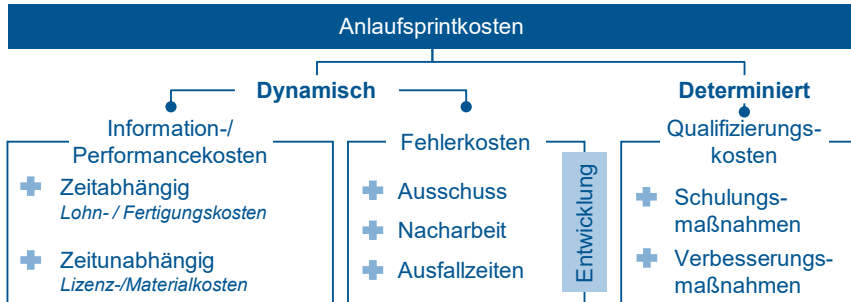


Abbildung 7.30 Struktur des Kostenmodells der Anlaufsprinkosten

*Structure of the Cost Model of the Ramp-Up Sprint Costs*

Stückzahlabhängige Fehlerkosten lassen sich in Ausschuss- und Nacharbeitskosten aufgrund unzureichender Prozessbeherrschung untergliedern [STAU17]. Kosten durch den Ausfall von Fertigungs-/Handhabungsprozessen werden als stückzahlunabhängige Anlaufaufwände der Kategorie Fehlerkosten zugerechnet. Da die Informations- bzw. Performancekosten und Fehlerkosten von den Simulationsergebnissen abhängen, werden diese im Folgenden als **dynamische Kosten** bezeichnet.

Entgegen der bisherigen Modellierung werden im Anlaufsprinkostenmodell agiler Serienanläufe Kosten aufgrund von Schulungs- und Verbesserungsmaßnahmen nicht als Fehlerkosten, sondern als Maßnahmen zur Befähigung bzw. Qualifizierung von Prozessen und Mitarbeitenden zur Fertigung von Gutteilen interpretiert und somit als **Qualifizierungskosten** bezeichnet. Die Qualifizierungskosten stellen aufgrund der festgelegten Maßnahmen im Gegensatz zu den dynamischen Kosten **determinierte Kosten** dar. Im Folgenden wird die Quantifizierung der einzelnen Kostenbestandteile und deren formelmäßigen Zusammenhänge beschrieben.

Die im Folgenden **hellblau markierten** Kostenparameter sind im Folgenden der durchgeführten Simulation (SIM-Tableau) zu entnehmen. Die **dunkelblau markierten** Kostenparameter werden vom Anwendenden der Methodik vorab definiert. Dabei besteht die Möglichkeit, Kostenparameter in Abhängigkeit von Entscheidungen (siehe Abschnitt 7.1.3) dynamisch zu modellieren. Neben den produkt- und prozessbezogenen Informationen sind, wie in Abschnitt 7.1.1 eingeführt, auch die Kostenvariablen unsicherheitsbehaftet und werden somit ebenfalls als Plandaten mittels Evidenztheorie modelliert. Für die Anwendbarkeit der Kostenparameter im Anlaufsprinkostenmodell wird der Erwartungswert der Kostenplandatenintervalle gebildet und die Kostenparameter werden um die Bezeichnung  $\mu$  ergänzt. Die Ermittlung der zu erwartenden Fertigungs- und Herstellkosten im Serienbetrieb werden mit Hilfe des von REY

entwickelten Kostenmodells ermittelt. Für eine detaillierte Beschreibung des Kostenmodells sei an dieser Stelle auf die Arbeit von REY verweisen [REY20, S. 103 ff.]. Im Folgenden wird die Ermittlung der für den Serienanlauf erwarteten, relevanten Anlaufsprinkosten in den Vordergrund gestellt und der Zusammenhang zwischen den Kostenparametern hergestellt. Die **erwarteten Anlaufsprinkosten**  $K_s^{\mu|S}$  agiler Serienanläufe setzen sich aus den **erwarteten dynamischen Sprintkosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|Dyn}$  und **erwarteten determinierten Qualifizierungskosten** innerhalb eines Sprints  $K_s^{\mu|Q}$  zusammen, siehe Formel (67).

$$K_s^{\mu|S} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J K_{i,j,s}^{\mu|Dyn} + K_s^{\mu|Q} \quad (67)$$

Die erwarteten **determinierten Qualifizierungskosten**  $K_s^{\mu|Q}$  bezeichnen die Kosten, welche im Sprint für die Qualifikation von Prozessen und Mitarbeitenden erwartungsgemäß eingesetzt werden. Zu den Qualifizierungskosten zählen im Folgenden Kosten für die Durchführung von **Schulungs- und Verbesserungsmaßnahmen** ( $K_s^{\mu|SCM}$  und  $K_s^{\mu|VBM}$ ), siehe Formel (68). Die Schulungs- und Verbesserungsmaßnahmen sind Einmalkosten und vom Anwendenden zeitlich terminiert oder werden in vorabdefinierter Abhängigkeit von der Reifegradentwicklung bzw. Entscheidungen durchgeführt.

$$K_s^{\mu|Q} = K_s^{\mu|SCM} + K_s^{\mu|VBM} \quad (68)$$

Erwartete **dynamische Sprintkosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|Dyn}$  bezeichnen die Kosten, welche durch die Beschaffung von Informationen und Steigerung der Anlaufperformance erwartungsgemäß anfallen und einen Sprint direkt zugeordnet werden. Bei den dynamischen Sprintkosten wird zwischen den erwarteten (simulierten) **Informations-/Performancekosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|IP}$  und den aufgrund des instabilen Verhaltens der Prozesse anfallenden **erwarteten Fehlerkosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|FEK}$  differenziert, siehe Formel (69).

$$K_{i,j,s}^{\mu|Dyn} = K_{i,j,s}^{\mu|IP} + K_{i,j,s}^{\mu|FEK} \quad (69)$$

Die erwarteten **Informations-/Performancekosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|IP}$  setzen sich, wie oben beschrieben, aus den Kosten der erwarteten entstehenden, zeitabhängigen Kosten zur **Beschaffung von Informationen und Durchführung der Versuche** ( $K_{i,j,s}^{\mu|BD}$ ) und den **erwarteten Kosten für die Erschließung der Quelle** ( $K_{i,j,s}^{\mu|ER}$ ) zusammen (Formel (70)).

$$K_{i,j,s}^{\mu|IP} = K_{i,j,s}^{\mu|BD} + K_{i,j,s}^{\mu|ER} \quad (70)$$

Zur Herleitung der weiteren Kostenvariablen wird im Folgenden exemplarisch davon ausgegangen, dass die sechs (Informations-)Quellen Fachliteratur ( $j = 1$ ), Normen ( $j = 2$ ), Erfahrungen der Mitarbeitenden ( $j = 3$ ) und Experten ( $j = 4$ ) sowie Prototypen- ( $j = 5$ ) und Validierungsversuche ( $j = 6$ ) zur Verfügung stehen.

Die erwarteten **Beschaffungs- bzw. Durchführungskosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|BD}$  werden, wie oben beschrieben, aus den erwarteten entstehenden, zeitabhängigen Kosten der Informationsbeschaffung und Performancesteigerung ermittelt, siehe Formel (73). Hierzu zählen unter anderem anfallende Fertigungskosten der Prototypenfertigung sowie die Durchführungszeit von Recherchen, Interviews, Validierungsversuchen und Versuchsauswertungen. In dem Fall, dass die Informationen über Recherchen, Interviews oder Validierungsversuche beschafft werden ( $j \in \{1,2,3,4,6\}$ ), ergibt sich die Beschaffungszeit aus dem Produkt der benötigten Kapazität ( $KAP_{j,s}^i$ ), der **Anzahl benötigter Mitarbeitenden** ( $MAD_s^\mu$ ) sowie den **erwarteten anteiligen Lohn-**  $K_{p,s}^{\mu|Lant}$  und **Maschinenkosten**  $K_{p,s}^{\mu|MH}$ . Die Beschaffungs- bzw. Durchführungskosten für Prototypenversuche ( $j = 5$ ) setzen sich aus den Fertigungskosten für die Herstellung der Prototypenversuche und den Kosten für die Auswertung der Versuchsergebnisse zusammen. Die **erwarteten Fertigungskosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|F}$  der Prototypen ergeben sich auf Basis der Maschinenstundensatzrechnung aus der simulierten zu fertigenden Anzahl Prototypen (Elementen, siehe Abschnitt 7.2.2)  $n_{i,s}^{\prime PT}$  und der Summe der Fertigungsstückkosten der eingesetzten Prozesse  $p$ , Formel (71). Die Fertigungsstückkosten eines Prozesses ergeben sich aus den erwarteten Maschinen-  $K_{p,s}^{\mu|MH}$  und anteiligen Lohnkosten  $K_{p,s}^{\mu|Lant}$  sowie der simulierten Pseudofertigungszeit  $t_{p,s}^{i/p}$  und den **erwarteten Werkzeugkosten**  $K_{p,s}^{\mu|WKZ}$ . [KLOC18, S. 447 ff.] Restfertigungsgemeinkosten werden im Folgenden vernachlässigt, da sie unabhängig von der Informationsbeschaffung/Performancesteigerung anfallen [BUCH14, S. 85]. Die **Kosten für die Auswertung**  $K_{i,s}^{\mu|Au}$  ergeben sich aus der Pseudoauswertzeit  $t_{p,s}^A$  der simulierten zu fertigenden Anzahl Prototypen (Durchführungen)  $n_{i,s}^{\prime PT}$  und den anfallenden prozessunabhängigen Lohnkosten  $K_s^{\mu|L}$ , siehe Formel (72).

$$K_{i,j,s}^{\mu|F} = n_{i,s}^{\prime PT} \cdot \sum_{p \in \bar{P}} (t_{p,s}^{i/p} \cdot (K_{p,s}^{\mu|MH} + K_{p,s}^{\mu|Lant}) + K_{p,s}^{\mu|WKZ}) \quad (71)$$

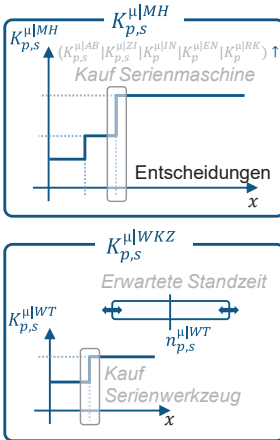
$$K_{i,s}^{\mu|Au} = n_{i,s}^{\prime PT} \cdot t_{p,s}^A \cdot K_s^{\mu|L} \quad (72)$$

$$K_{i,j,s}^{\mu|BD} = \begin{cases} KAP_{j,s}^i \cdot MAD_s^\mu \cdot K_s^{\mu|L} & j \in \{1,2,3,4\} \\ \sum_{p \in \bar{P}} KAP_{j,s}^i \cdot (MAD_s^\mu \cdot K_{p,s}^{\mu|L} + K_{p,s}^{\mu|MH}) + K_{i,s}^{\mu|Au} & j = 6 \\ K_{i,j,s}^{\mu|F} + K_{i,s}^{\mu|Au} & j = 5 \end{cases} \quad (73)$$

Die erwarteten **Werkzeugkosten**  $K_{p,s}^{\mu|WKZ}$  eines Prozesses berechnen sich aus dem Quotienten der erwarteten **Kosten für ein neues Werkzeug**  $K_p^{\mu|WT}$  und der **erwarteten Standmenge des Werkzeugs**  $n_{p,s}^{\mu|WT}$  siehe Formel (74) [KLOC18, S. 447].

$$K_{p,s}^{\mu|WKZ} = \frac{K_p^{\mu|WT}}{n_{p,s}^{\mu|WT}} \tag{74}$$

In Abbildung 7.31 sind exemplarisch zwei Beispiele dynamisch modellierter Kostenvariablen gezeigt. Die erwarteten Maschinenstundenkosten  $K_{p,s}^{\mu|MH}$  eines Prozesses sind in Abhängigkeit von Entscheidungen modelliert. So führt eine Entscheidung  $x$  in einem Sprint über den Kauf der Serienmaschine zu einer Steigerung der Anschaffungskosten und somit der kalkulatorischen Abschreibungen und Zinsen, aber auch der erwartete Instandhaltungskosten, erwartete Energiekosten sowie unter Umständen der Raumkosten [VDI90]. Die Dynamik der erwarteten Werkzeugkosten  $K_{p,s}^{\mu|WT}$  ergibt sich ebenfalls aus der Entscheidungsabhängigkeit sowie aus der Modellierung der unsicheren Kostenvariablen. So führt bspw. die Umstellung vom Versuchswerkzeug auf das Serienwerkzeug zu einer gesteigerten Standzeit aber auch zu teureren Werkzeugkosten. Zudem besteht die Möglichkeit, dass sich die modellierten Intervallgrenzen aufgrund beschaffter Informationen verschieben und sich die erwartete Standzeit verändert.



**Abbildung 7.31** Dynamisch modellierte Kostenparameter

*Dynamically Modeled Cost Parameters*

Die Dynamik der erwarteten Werkzeugkosten  $K_{p,s}^{\mu|WT}$  ergibt sich ebenfalls aus der Entscheidungsabhängigkeit sowie aus der Modellierung der unsicheren Kostenvariablen. So führt bspw. die Umstellung vom Versuchswerkzeug auf das Serienwerkzeug zu einer gesteigerten Standzeit aber auch zu teureren Werkzeugkosten. Zudem besteht die Möglichkeit, dass sich die modellierten Intervallgrenzen aufgrund beschaffter Informationen verschieben und sich die erwartete Standzeit verändert. Die **Kosten für die Erschließung** einer (Informations-)Quelle  $K_{i,j}^{\mu|ER}$  sind abhängig von der Art der eingesetzten Quelle. Zu den Erschließungskosten von Literaturquellen ( $j \in \{1; 2\}$ ) zählen bspw. **erwartete Lizenzkosten oder Kosten für den Erwerb der Literatur**  $K^{\mu|LZ}$ . Im Falle eines Prototypenversuchs ( $j = 5$ ) fallen **erwartete Materialkosten**  $K_s^{\mu|MAT}$  für die Erschließung der Prototypen an, siehe Formel (75). Bei Validierungsversuchen und Interviews ( $j \in \{3; 4; 6\}$ ) werden im Folgenden keine Erschließungskosten angesetzt. Es besteht die Möglichkeit, die Kosten situationsbedingt zu erweitern. Erwartete **Fehlerkosten**  $K_{i,j,s}^{\mu|FEK}$  werden definiert als die Kosten, die durch Produkte und Prozesse aus der Nichterfüllung von definierten Qualitätsanforderungen entstehen [DEUT78, S. 14]. Die Fehlerkosten beinhalten somit die Kosten, welche durch **erwarteten Ausschuss** ( $K_{i,j,p,s}^{\mu|A}$ ), **Nacharbeit** ( $K_{i,j,p,s}^{\mu|N}$ ) oder **Prozess-/Anlagenausfälle** ( $K_{i,j,p,s}^{\mu|AF}$ ) verursacht werden, siehe Formel (76).

$$K_{i,j}^{\mu|ER} = \begin{cases} K^{\mu|LZ} & j \in \{1,2\} \\ \max [n_{i,s}^{\mu|PT}] \cdot K_s^{\mu|MAT} & j = 5 \\ 0 & j \in \{3,4,6\} \end{cases} \tag{75}$$

$$K_{i,j,s}^{\mu|FEK} = \begin{cases} 0 & j \in \{1,2,3,4\} \\ \sum_{p \in \bar{P}} K_{i,j,p,s}^{\mu|A} + K_{i,j,p,s}^{\mu|N} + K_{i,j,p,s}^{\mu|AF} & j = 5 \\ K_{i,j,p,s}^{\mu|AF} & j = 6 \end{cases} \quad (76)$$

Die erwarteten **Ausschusskosten**  $K_{i,j,p,s}^{\mu|A}$  ergeben sich aus dem Produkt der simulierten zu fertigenden Prototypen (Elemente)  $n_{i,p,s}^{\prime PT}$ , der Ausschussrate  $(1 - GTR_{p,s})$  und den **erwarteten Entsorgungskosten**  $K^{\mu|ENT}$ , siehe Formel (77) [STAU17, S. 117].

$$K_{i,j,p,s}^{\mu|A} = n_{i,p,s}^{\prime PT} \cdot (1 - GTR_{p,s}) \cdot K^{\mu|ENT} \quad (77)$$

Analog zu den Ausschusskosten setzten sich die erwarteten **Nacharbeitskosten**  $K_{i,j,p,s}^{\mu|N}$  aus dem Produkt der simulierten zu fertigenden Prototypen (Elemente)  $n_{i,p,s}^{\prime PT}$ , der um die **Nacharbeitsrate**  $NR_{p,s}$  korrigierten Ausschussrate  $(1 - GTR_{p,s})$  und den **Kosten für die Nacharbeit** zusammen  $K_{p,s}^{\mu|NAB}$ , siehe Formel (78).

$$K_{i,j,p,s}^{\mu|N} = n_{i,p,s}^{\prime PT} \cdot (1 - GTR_{p,s}) \cdot NR_{p,s} \cdot K_{p,s}^{\mu|NAB} \quad (78)$$

Aufgrund der Instabilitäten der Fertigungs-/ und Handhabungsprozesse resultieren Prozessausfälle. Die Kosten für die **Ausfälle der Prozesse**  $K_{i,j,p,s}^{\mu|AF}$  ergeben sich somit aus dem Produkt der **geplanten Einsatzzeit**  $T_{N,p}$ , der Verfügbarkeitsrate  $VRG_{p,s}$  und den Kosten für die Ausfallzeiten der Prozesse  $K_{p,s}^{\mu|MH}$ , siehe Formel (79)

$$K_{i,j,p,s}^{\mu|AF} = T_{N,p} \cdot (1 - VRG_{p,s}) \cdot K_{p,s}^{\mu|MH} \quad (79)$$

Die ermittelten Anlaufsprinkosten bilden die Grundlage zur Prognose der Anlaufkostenkurve und somit zur Berechnung der durch die Informationsbeschaffung und Befähigung von Mitarbeitenden und Prozessen anfallenden kumulierten Anlaufkosten im nachfolgenden Abschnitt 7.2.5. Das SIM-Tableau wird um die erwarteten Anlaufsprinkosten erweitert.

## 7.2.5 Prognose der Anlaufkurve und -kosten agiler Serienanläufe

### *Prediction of the Ramp-Up Curve and Costs of Agile Ramp-Up Productions*

In den vorangegangenen Abschnitten wurde zunächst in Modul 1 durch Ableitung der Defizite die Simulationsgrundlage modelliert (Abschnitt 7.1.1) und basierend auf der Prognose von Restentwicklungsumfängen (Abschnitt 7.1.2) bzw. der Bewertung von Reifegraden (Abschnitt 7.1.3) in Modul 2 die Defizite hinsichtlich ihrer Dringlichkeit zur deren Reduzierung priorisiert (Abschnitt 7.2.1). Basierend auf den priorisierten Defiziten erfolgte mit Hilfe der Monte Carlo Simulation die systematische, sprintkapazitätsabhängige Auswahl der in einem Simulationssprint zu reduzierenden Defizite und der zu nutzenden Quellen (Abschnitt 7.2.2) sowie die Prognose der potenziellen Auswirkung der Informationsbeschaffung/Performancesteigerung auf die Simulationsgrundlage (Abschnitt 7.2.3). Ziel von Abschnitt 7.2.5 ist es, die simulierte Entwicklung der

Reifegrade (Produkt- und Fertigungsreifegrad) in Relation zur Zeit (Sprints) zu visualisieren und potenziell anfallende Kosten im agilen Serienanlauf zu prognostizieren.

### Anlaufkurve im agilen Serienanlauf

Die Anlaufkurve ist ein zentrales Element und Grundlage für die Planung und Gestaltung von Serienanläufen (siehe Abschnitt 3.2.2). Die grafische Visualisierung der simulierten Reifegradentwicklung (Simulationsergebnisse) vom Produkt- oder Fertigungsreifegrad in Relation zur Zeit (Sprints) wird im Folgenden als **Anlaufkurve im agilen Serienanlauf** bezeichnet (Abbildung 7.32). In der Anlaufkurve werden die Ergebnisse der Simulation der vorangegangenen Methodikschritte zusammengeführt. Die Anlaufkurve gibt eine Übersicht darüber, wie sich der Produkt- oder Fertigungsreifegrad durch das systematische Reduzieren von Defiziten potenziell entwickelt. Wird ein Reifegrad von 1 erreicht wird die SOP-Freigabe erteilt. Weisen sowohl der Produkt- als auch der Fertigungsreifegrad einen Reifegrad von 1 auf, so wird mit dem Hochlauf und somit mit der Steigerung der Produktionsmenge auf Serienniveau begonnen. Über die Anlaufkurve wird die Dauer der Synchronisierung von Produktentwicklung und Fertigungsplanung sowie der Stabilisierung der Fertigungsfolge bis zum Erreichen des Start of Production verdeutlicht.

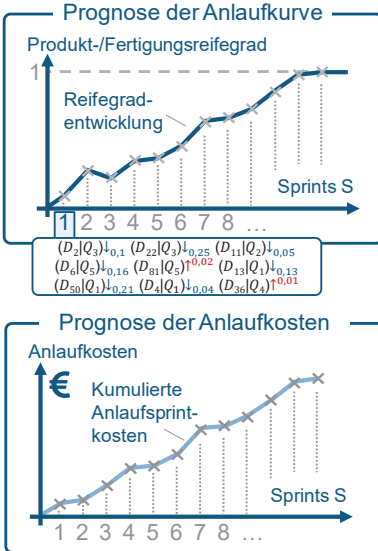


Abbildung 7.32 Anlaufkurve und -kosten im agilen Serienanlauf

*Ramp-Up Curve and Costs in Agile Ramp-Up Production*

### Anlaufkosten im agilen Serienanlauf (Anlaufkostenkurve)

Wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert, stellen die Anlaufkosten eine wesentliche Zielgröße des Managements dar. Anlaufkosten agiler Serienanläufe sind, wie oben beschrieben, definiert als die Summe der anfallenden Kosten, die zur Reduktion von Defiziten sowie zur Befähigung von Mitarbeitenden und Fertigungs- bzw. Handhabungsprozessen bis zum Erreichen der Zielkriterien (ZK 1-ZK 3) anfallen und sich dem Produkt bzw. der Fertigung direkt zuordnen lassen. Die **Anlaufkostenkurve** agiler Serienanläufe beschreibt die grafische Visualisierung der Anlaufkosten basierend auf den in Abschnitt 7.2.4 simulierten Anlaufsprintkosten  $ASK_{sim}^s$  (Abbildung 7.32). Zur Ermittlung der Anlaufkostenkurve agiler Serienanläufe werden die Anlaufsprintkosten über die Sprints kumuliert, wodurch sich der ansteigende Verlauf der Kurve ergibt. Das Maximum der Anlaufkostenkurve beschreibt die im agilen Serienanlauf zu erwartenden Anlaufkosten.

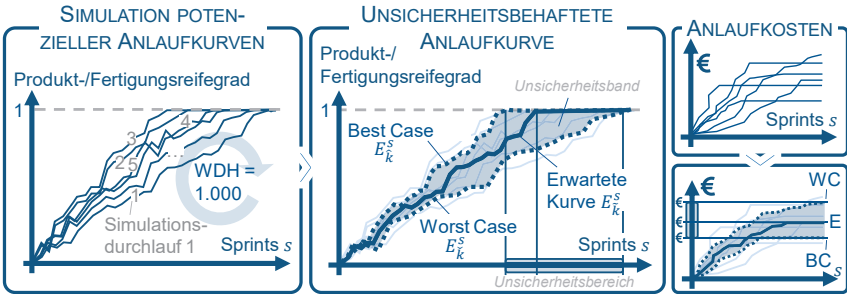
## 7.2.6 Prognose der unsicherheitsbehafteten Anlaufkurve und -kosten

### Prediction of Uncertainty Related Ramp-Up Curves and Costs

Die mit Hilfe des Modells aus Abschnitt 7.2.5 ermittelte Anlaufkurve und -kosten basieren auf einer unsicheren Simulationsgrundlage (Abschnitt 7.1) und deren Entwicklungsprognose mittels stochastischer Simulationsmethoden, wie der Monte Carlo Simulation (Abschnitt 7.2.2). Die vorliegenden Unsicherheiten und durch die Simulation erzeugten Zufallseffekte sind zwingend bei der Prognose von Anlaufkurven und -kosten für die Erzeugung einer fundierten Planungsgrundlage zu berücksichtigen. Durch die Wiederholung von Zufallsexperimenten lassen sich Gesetzmäßigkeiten erkennen, welche mathematisch erfasst werden können [DUFN04, S. 105 ff.]. Somit gilt es, zunächst eine **Mindestzahl an Wiederholungen**  $WDH_{min}^{sim}$  der Simulation festzulegen. Nach der Durchführung der **Wiederholungen**  $WDH$  liegen somit  $WDH_{min}^{sim}$  verschiedene Anlaufkurven und Kostenverläufe vor. Die Anzahl der Wiederholungen hängt von der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität und -zeit ab und wird individuell vom Anwendenden der Methodik vorab definiert. Nach LENWANDOWSKI sind die Prognoseabweichungen stochastischer Prognoseansätze im Allgemeinen normalverteilt [LEWA74, S. 192 f.]. Es ist wichtig zu beachten, dass die Normalverteilung ein ideales Modell ist, das nicht immer auf reale Daten zutrifft. In der Praxis können Daten oft asymmetrisch sein und andere Verteilungsformen aufweisen. Basierend auf der Annahme symmetrisch verteilter Simulationsergebnisse und einer ausreichend hoher Anzahl an Wiederholungen, wird der **Erwartungswert**  $E_k^s$  **der Sprintsimulationsergebnisse** berechnen. Die Berechnung des Erwartungswerts einer Wiederholung wird für den Produkt- ( $PDRG_{sim}^{s|WDH}$ ) und Fertigungsreifegrad ( $FERG_{sim}^{s|WDH}$ ) sowie für die Anlaufsprinkosten ( $K_{s,WDH}^{\mu|S}$ ) separat und für jeden simulierten Sprint  $s$  bis zum Erreichen des maximalen Sprints  $S_{max}$  durchgeführt. Formel (80) zeigt eine verallgemeinerte Form der Berechnung [BORT10, S. 25 ff.]. Die Variable  $\tilde{k}$  bezeichnet die jeweilige Kurvenvariable einer Wiederholung  $\tilde{k} \in \{PDRG_{sim}^{s|WDH}, FERG_{sim}^{s|WDH}, K_{s,WDH}^{\mu|S}\}$ .

$$E_k^s = \left[ \frac{1}{WDH_{min}^{sim}} \cdot \sum_{WDH=1}^{WDH_{min}^{sim}} \tilde{k} \right]_1 \quad (80)$$

Durch die grafische Visualisierung der Sprinterwartungswerte von Produkt- und Fertigungsreifegrad sowie der Anlaufsprinkosten werden die **erwarteten Anlaufkurven** der Reifegrade und die **erwartete Anlaufkostenkurve** ermittelt (im Folgenden subsumierend als Kurve bezeichnet), siehe Abbildung 7.33. Zur Berücksichtigung der stochastischen Auswirkungen aufgrund der Zufallszahlengenerierung in der Simulation sowie zur Steigerung der Prognosegüte wird ein Unsicherheitsband um die erwartete Kurve modelliert. Hierzu werden die Datenpunkte eines Simulationssprints analysiert und in eine obere und untere Teilmenge aufgeteilt.



**Abbildung 7.33** Ableitung unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten im agilen Serienanlauf

*Derivation of Uncertainty-Related Ramp-Up Curves and Costs in Agile Ramp-Up Production*

Die untere Teilmenge  $\tilde{k}$  ergibt sich verallgemeinert aus der Menge der Datenpunkte zwischen dem minimalen Wert und dem Erwartungswert (siehe Formel (81)). Die obere Teilmenge  $\hat{k}$  ergibt sich verallgemeinert aus der Menge der Datenpunkte über dem Erwartungswert und dem maximalen Wert eines Sprints (siehe Formel (82)).

$$\tilde{k} = [\min(\tilde{k}), E_k^s] \quad (81)$$

$$\hat{k} = [E_k^s, \max(\tilde{k})] \quad (82)$$

Basierend auf der oberen und unteren Teilmenge wird durch analoge Anwendung der Formel (80) die Erwartungswerte der oberen und unteren Teilmenge ermittelt. Durch die Visualisierung der Erwartungswerte der Teilmengen ergeben sich zwei weitere Kurven. Die obere Anlaufkurve bzw. untere Anlaufkostenkurve wird als **bestmögliches Szenario** (Best Case) interpretiert und beschreibt den erwarteten frühestmöglichen Zeitpunkt zum Erreichen der erforderlichen Reifegrade sowie die erwarteten geringsten möglichen Anlaufkosten. Die untere Anlaufkurve bzw. obere Anlaufkostenkurve wird als **schlechtmögliches Szenario** (Worst Case) interpretiert und beschreibt den erwarteten spätestmöglichen Zeitpunkt zum Erreichen der erforderlichen Reifegrade sowie die erwarteten höchstmöglichen Anlaufkosten. Der Bereich zwischen der oberen und unteren Kurve wird als **Unsicherheitsband** um die erwartete Kurve bezeichnet. Die Differenz zwischen dem frühest- und spätestmöglichen Erreichen der erforderlichen Reifegrade bzw. der geringst- und höchstmöglichen Anlaufkosten wird als **Unsicherheitsbereich der Simulationsprognose** bezeichnet. Die Kombination der erwarteten Kurve mit dem jeweiligen Unsicherheitsband wird als **unsicherheitsbehaftete Anlaufkurve** bzw. **unsicherheitsbehaftete Anlaufkostenkurve agiler Serienanläufe** bezeichnet und bildet das Ergebnis der Simulation sowie die Grundlage für weitere Planungsentscheidungen im agilen Serienanlauf.

## 7.2.7 Validierung und Zwischenfazit

### *Validation and Interim Conclusion*

Aufbauend auf dem in Abschnitt 7.1.4 eingeführten Fallbeispiel und der durchgeführten Validierungen erfolgt in diesem Abschnitt die Validierung der in Abschnitt 7.2 entwickelten Modelle und Methoden zur Simulation der theoretischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung und Prognose Anlaufkurven und Kosten agiler Serienanläufe.

### **Validierung**

Grundlage der theoretischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung bilden die in Abschnitt 7.1.1 abgeleiteten Defizite sowie die aus den prognostizierten Restentwicklungsumfängen (Abschnitt 7.1.2) und bewerteten Reifegraden (Abschnitt 7.1.3) ermittelten Prioritätszahlen ( $PZ1_{Di}$  und  $PZ2_{Di}$ ). Die entwickelten Modelle und Methoden wurden im Rahmen der kooperativen Zusammenarbeit im Exzellenzcluster INTERNET OF PRODUCTION (Projektnummer 390621612) durch NICO JANSEN (Lehrstuhl für SOFTWARE ENGINEERING SE der RWTH AACHEN UNIVERSITY) in einen Softwareprototypen überführt.

Im ersten Schritt werden die Priorisierungen der Defizite hinsichtlich ihrer Relevanz für das Auftreten von Restentwicklungsumfängen (PZ1) und für die systematische Steigerung der Reifegrade (PZ2) synchronisiert und in eine Gesamtpriorisierung (PZ3) überführt. Die dynamische Gewichtung basiert auf der Kombination der in Abschnitt 7.2.1 eingeführten Priorisierung nach Prioritätszahlen und Reifegraden nach SCHUH [SCHU05]. Hierzu werden die Ergebnisse aus Modul 1 in den Softwareprototyp geladen. Über eine Eingabemaske besteht die Möglichkeit, die Mindestanzahl an Wiederholungen ( $WDH_{min}^{sim}$ ), die Prioritätsverteilung der Aufwandsbewertung hinsichtlich Kapazität und Kostenfokussierung ( $\vartheta_{KAP}$  bzw.  $\vartheta_K$ ) sowie die maximale Sprintkapazität ( $KAP_s^{max}$ ) zu definieren. Für die Validierung wurde die Mindestanzahl an Wiederholungen mit  $WDH_{min}^{sim} = 60$  und die Prioritätsverteilung mit ( $\vartheta_{KAP} = 0,5$  und somit  $\vartheta_K = 0,5$ ) bei einer maximalen Sprintkapazität von  $KAP_s^{max} = 480 h$  festgelegt.

Abbildung 7.34 zeigt einen Ausschnitt der Priorisierung. Es zeigt sich, dass  $PD_{399}$  (Defizit aus der Performanceunsicherheit der Gutteilrate vom Bohren) auf Basis der eingelesenen Daten die höchste Priorisierung erhält und sowohl zur Reduzierung von Restentwicklungsumfängen als auch zur Steigerung der Reifegrade beiträgt.

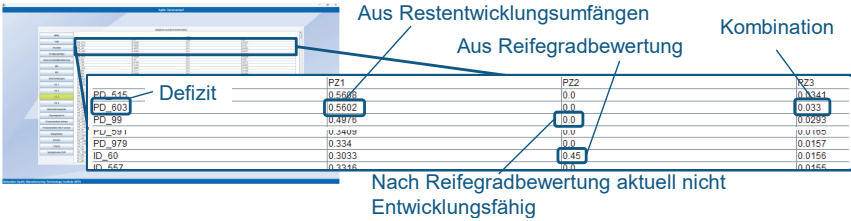


Abbildung 7.34 Ermittlung der Gesamtpriorisierung PZ3 der Defizite

Determination of the Total Prioritization PZ3 of the Deficits

PD<sub>603</sub> (Defizit aus der Performanceunsicherheit im Zwischenzustand der Rauheit der Zahnflanke nach dem Verzahnungsfräsen) wird bspw. aufgrund der hohen Relevanz zur Reduzierung von Restentwicklungsumfängen ebenfalls hoch priorisiert, obwohl dies aktuell nicht zur Steigerung der Reifegrade beiträgt. Zur Simulation der theoretischen Informationsbeschaffung und Anlaufperformancesteigerung werden den Defiziten mögliche Quellen zugewiesen (Abbildung 7.35).

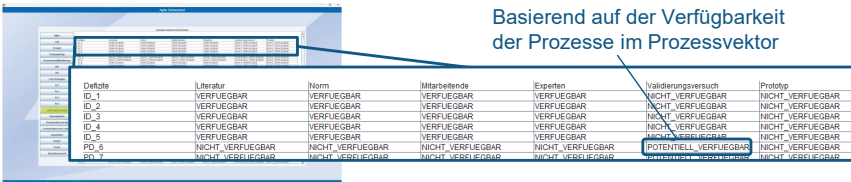


Abbildung 7.35 Zuordnung von potenziellen Quellen zu den Defiziten

Assignment of Potential Sources to the Deficits

Zur Verfügung stehen die sechs (Informations-)Quellen Fachliteratur ( $j = 1$ ), Normen ( $j = 2$ ), Erfahrungen der Mitarbeitenden ( $j = 3$ ) und Expertinnen bzw. Experten ( $j = 4$ ) sowie Validierungs- ( $j = 5$ ) und Prototypenversuche ( $j = 6$ ). Grundlage der Simulation ist die Zuordnung von Kapazitäten und Kosten der einzelnen Quellen zur Adressierung der Defizite. Für jede (potenzielle) verfügbare Quelle wurde somit zunächst die notwendige Kapazität ermittelt (Abbildung 7.36). Ausgangspunkt für die Bewertung der notwendigen Kapazität von Validierungs- und Prototypenversuchen ist die prognostizierte Anzahl Prototypen bzw. Durchführungen  $n_{i,s}^{PT}$ . Hierzu wurden für die dynamischen Formparameterfunktionen  $f_{(Di)}^\alpha$  und  $f_{(Di)}^\beta$  der Zufallszahlenerteilungen die Start-  $\alpha_i^{PT/S} = 1$  bzw.  $\beta_i^{PT/S} = 10$  und Endwerte  $\alpha_i^{PT/E} = 10$  und  $\beta_i^{PT/E} = 1$  für alle Funktionen definiert. Für die Validierung wurde ein Prototypenintervall von  $[10,30]$  festgelegt. Die Simulation ergibt bspw. für die Informationsbeschaffung zur Genauigkeitssteigerung im Zwischenzustand des Durchmessers von Wellenabsatz 1 ( $ID_{93}$ ) eine potenzielle Prototypenanzahl von  $n_{93,1}^{PT} = 23$ . Aufgrund der zum gezeigten Sprint vorliegenden Gutteilrate von  $P_2$  mit  $GTR_{2,1} = 0,975$  ist insgesamt eine

korrigierte Prototypenanzahl  $n'_{i,2}^{PT} = 24$  zu fertigen. Hieraus resultiert bei einer Pseudofertigungszeit von  $t_{ps}^{i|2} = 3,5 \text{ Sek} = 0,000972 \text{ h}$  und einer benötigten Auswertzeit  $t_i^A = 0,079 \text{ h} \approx 4 \text{ Min } 44 \text{ Sek}$  der Prototypenversuchsergebnisse eine notwendige Kapazität von  $KAP_i^6 = 23 \cdot 0,079 \text{ h} + 24 \cdot 0,000972 \text{ h} = 1,84 \text{ h}$ . Hieraus resultieren Prototypenkosten in Höhen von  $K_{93,1}^{i|D_{93}^{dyn}} = 262,15 \text{ €}$ .

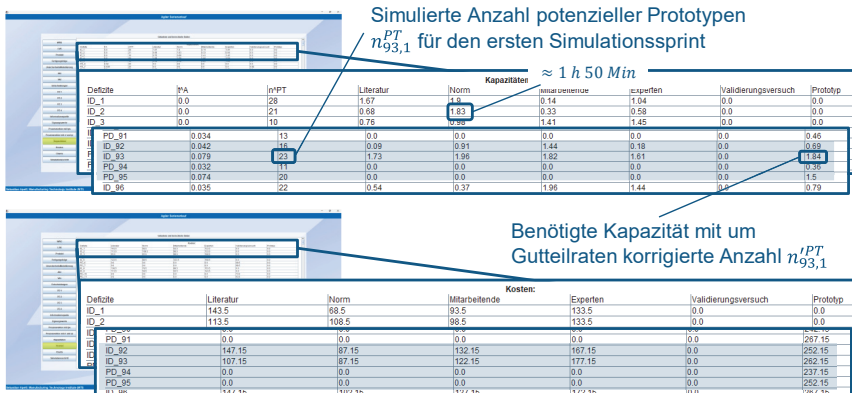


Abbildung 7.36 Ermittlung der notwendigen Kapazitäten und Kosten der Defizitadressierung durch die einzelnen potenziellen Quellen

*Determination of the Necessary Capacities and Costs of Addressing Deficits by the Individual Potential Sources*

Abbildung 7.37 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse einer Sprintsimulation. Rückgreifend auf die zu Beginn adressierten Defizite vom Zwischenzustand von Wellenabsatz 1 wurden in einer Sprintsimulation die Defizite  $D_{92}$ ,  $D_{93}$  und  $D_{94}$  adressiert.

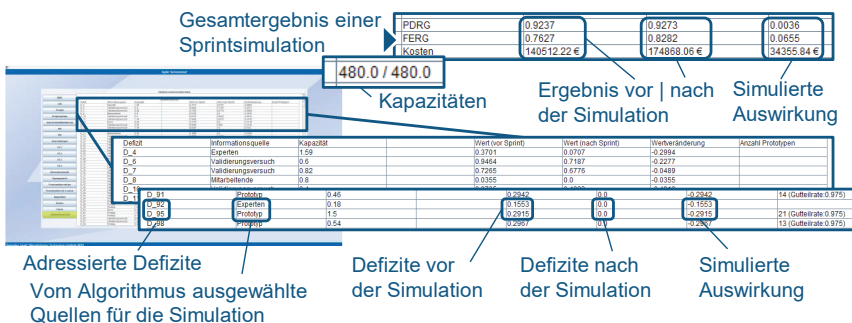


Abbildung 7.37 Exemplarisches Ergebnis eines Simulationsdurchgangs zur theoretischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung

*Exemplary Result of a Simulation Run for Theoretical Information Acquisition/Performance Improvement*

$D_{95}$  wird in diesem Sprint nicht adressiert. Bei der Adressierung wurde vom Algorithmus für  $D_{92}$  und  $D_{93}$  eine Befragung von Expertinnen und Experten simuliert. Die Adressierung von  $D_{94}$  erfolgt durch den Einsatz von Prototypen. Dabei ergibt sich bei Defizit  $D_{92}$  eine Verschlechterung (Steigerung) des Defizits durch u. U. vom aktuellen Planungsstand abweichende Aussagen der Expertinnen und Experten. Defizit  $D_{93}$  und  $D_{94}$  werden reduziert. Die Ergebnisse der simulierten Defizitadressierung werden anschließend in einer Neubewertung des Produkt- und Fertigungsreifegrads in Modul 1 zusammengefasst. Insgesamt wurden im Simulationssprint 480 h der 480 h zur Adressierung von Defiziten genutzt. Insgesamt ergab sich eine Verbesserung des Fertigungsreifegrades von 6,55 % ( $FERG_s^{sim} = FERG_s^{sim} + 0,0655 = 0,8282 = 82,82\%$ ). Beim Produktreifegrad wurde durch die Adressierung der Defizite insgesamt eine Verbesserung von 0,36 % erzielt. Dabei entstanden Anlaufsprinkosten in Höhe von  $K_s^{uDyn} = 34.355,84$  €.

Die Simulation der Defizitveränderung durch die Ergebnisse der theoretischen Informationsbeschaffung und Performancesteigerung wurde entsprechend der Simulationethodik so oft wiederholt, bis ein Produkt- und Fertigungsreifegrad von 1 erreicht wurden und keine Restentwicklungsumfänge mehr prognostiziert wurden (ZK 1-ZK 3 erfüllt). Für einen exemplarischen Simulationsdurchlauf (bspw.  $WDH = 56$  graue Kurven in Abbildung 7.38) wurde eine Dauer von 20 Sprints sowie Anlaufkosten für die Informationsbeschaffung und Performancesteigerung im agilen Serienanlauf durch das Kumulieren der Anlaufsprinkosten in Höhe von 364.362,06 € prognostiziert. Zum Ausgleich der Zufallseffekte aufgrund der Generierung von Pseudozufallszahlen wurden entsprechend der Simulationethodik mehrere Simulationsdurchläufe durchgeführt. Wie eingangs beschrieben wurde für die Validierung eine Mindestanzahl an Wiederholungen von  $WDH_{min}^{sim} = 60$  festgelegt. Wie in Abbildung 7.38 zu sehen, ergeben sich unterschiedliche Zeitverläufe sowie unterschiedliche Anlaufkosten, welche einer gewissen Struktur folgen. Durch die Ermittlung der Erwartungswerte aus den einzelnen Simulationsergebnissen eines Sprints und der grafischen Visualisierung der Ergebnisse über der Zeit ergibt sich die erwartete Anlaufkurve von Produkt- und Fertigungsreifegrad sowie die erwartete Verlaufskurve der Anlaufkosten (blaue Kurve in Abbildung 7.38). Durch die Ermittlung der oberen und unteren Standardabweichung wird das Unsicherheitsband (grüne und rote Kurve in Abbildung 7.38) ermittelt. Erwartungsgemäß ist, basierend auf den Simulationsergebnissen, mit einer Erreichung des SOPs nach 23 Sprints zu rechnen, da nach dieser Zeit sowohl der Produkt- als auch der Fertigungsreifegrad einen Wert von 1 erreicht haben. Aus den prognostizierten Szenarien ergeben sich im besten Fall Anlaufkosten von 358.333,56 € im schlechtesten Fall von 372.979,35 €. Erwartungsgemäß ist mit Anlaufkosten in Höhen von 364.139,85 € zu rechnen. Eine detaillierte Abbildung der Simulationsergebnisse ist in Abbildung A 2 bis Abbildung A 7 in Anhang A.2 gezeigt.

Zu Validierung des Einflusses der maximalen Sprintkapazität als zentrale Steuergröße des Optimierungsalgorithmus der theoretischen Informationsbeschaffung und

Anlaufperformancesteigerung wurden weitere Validierungen anhand verschiedener Kapazitätsszenarien durchgeführt. Hierdurch wurde nachgewiesen, dass durch die Veränderung der Maximalkapazität die erwartete Reaktion der Simulationsergebnisse resultiert und somit ein realistischer und sinnvoller Zusammenhang der einzelnen Parameter und Kenngrößen im Simulationsmodell vorliegt (siehe Abbildung A 8 und Abbildung A 9 in Anhang A.3).

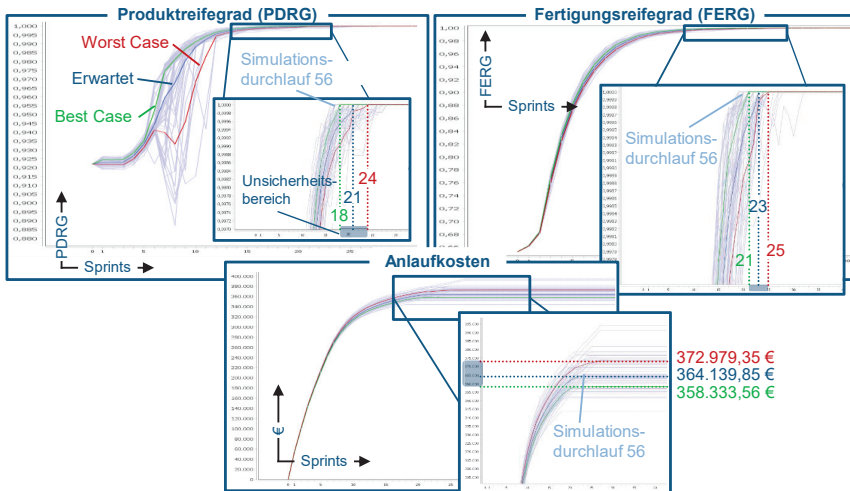


Abbildung 7.38 Simulationsergebnis der unsicherheitsbehafteten Anlaufkurve und -kosten

*Simulation Result of the Uncertain Ramp-Up Curve and Costs*

### Zwischenfazit

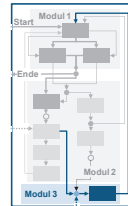
Forschungsfrage 2 bezieht sich auf die Gestaltung eines stochastischen Prognosemodells zur Prognose unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten. Ziel ist es, Anwendende bei der systematischen Informationsbeschaffung zu unterstützen und die Auswirkungen der Informationsbeschaffung zu simulieren. Wie die Validierung zeigt, wurden alle formalen und die inhaltlichen Anforderungen 8, 9, 10 und 11 berücksichtigt. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde in Abschnitt 7.2.1 ein Modell zur systematischen und dynamischen Priorisierung von Defiziten in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand entwickelt (Anforderung 8). Es wurde gezeigt, dass eine realistische und sinnvolle Priorisierung erfolgt. Basierend auf den priorisierten Defiziten wurde in Abschnitt 7.2.2 ein algorithmusbasiertes Vorgehen entwickelt mit Hilfe dessen die Auswahl der zu reduzierenden Defizite und zu nutzenden Quellen unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Sprintkapazität ermöglicht wird. Durch das in Abschnitt 7.2.3 entwickelte algorithmusbasierte Vorgehen wird die stochastische Prognose der Auswirkungen einer theoretischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung auf die Defizite und somit eine Reifegradsteigerung ermöglicht (Anforderung 8 und 11). Mit Hilfe des in Abschnitt 7.2.4 entwickelten Bewertungsmodells erfolgt

die Ermittlung der Anlaufsprinkosten. Das in Abschnitt 7.2.5 entwickelte Modell ermöglicht die Modellierung der Anlaufkurve und des Anlaufkostenverlaufs durch grafische Visualisierung der Simulationsergebnisse über der Zeit. Die Validierung zeigt, dass unterschiedliche Simulationsdurchläufe aufgrund der stochastischen Simulation zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Durch die mehrfache Wiederholung der Simulation werden Zufallseffekte aufgrund der stochastischen Simulation berücksichtigt und die unsicherheitsbehaftete erwartete Anlaufkurve sowie die unsicherheitsbehafteten erwarteten Anlaufkosten mit Hilfe des in Abschnitt 7.2.6 entwickelten Modells prognostiziert (Anforderung 9 und 10). Somit wurde gezeigt, dass die formalen und inhaltlichen Anforderungen (8-11) erfüllt sind (siehe Abschnitt 6.1.1 und Abschnitt 6.1.2) und Forschungsfrage 2 durch die Erläuterungen in Abschnitt 7.2 beantwortet wird.

### 7.3 Iterative Realdatenintegration (Modul 3)

#### *Iterative Real Data Integration (Module 3)*

Die sprintweise Generierung von Realdaten durch Prototypen und Validierungsversuche ist ein zentrales Element zur Reduktion von Defiziten im agilen Serienanlauf. Um die Integration der Realdaten in die Modellierung der Simulationsgrundlage mit Hilfe der in Abschnitt 7.1.1 eingeführten Evidenztheorie zu ermöglichen, sind bestimmte Grundvoraussetzungen erforderlich. Dazu gehören die Definition eines Werts oder Wertebereichs der Information sowie die Angaben zur Informationssicherheit einer einzelnen Information und die Bewertung der Vertrauenswürdigkeit bzw. Zuverlässigkeit der Informationsquelle [REY20]. Da ein Validierungsversuch oder ein Prototyp keine unmittelbare Information und keine klaren Angaben zur Sicherheit der erzielten Ergebnisse liefert und sich somit Prototypen- und Validierungsversuchsergebnisse nicht direkt in die Evidenzmodellierung (Modul 1) integrieren lassen, ist eine Transformation der Versuchsergebnisse notwendig. Im dritten Modul (**Modul 3 – Realdaten**) erfolgt daher die Transformation der generierten Realdaten (Versuchsergebnisse) aus den Prototypen- und Validierungsversuchsergebnissen (Input) in mittels Evidenz Theorie verarbeitbare Informationen (Output) (Abbildung 7.39).



**Abbildung 7.39** Input und Output von Modul 3 der Methodik

*Input and Output of Modul 3 of the Methodology*

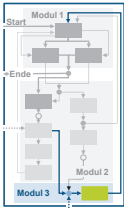
Diese Transformation ermöglicht es, die generierten Realdaten als zusätzliche Information bzw. Prototypen- und Validierungsversuche als zusätzliche Quelle mit in die Modellierung der Informationsgrundlage in Modul 1 zu integrieren. Basierend auf den ermittelten Evidenzen und Informationen erfolgt die Aktualisierung der Informations- und Anlaufperformancemodellierung (Modul 1). Zur Erreichung des Ziels wird in Abschnitt 7.3 die Beantwortung der Forschungsfrage 3 fokussiert:

**Forschungsfrage 3:** *Wie ist eine Methode zu gestalten, um die sprintweise generierten Ergebnisse aus Prototypen- und Validierungsversuchen in die Modellierung der unsicheren Simulationsgrundlage im agilen Serienanlauf zu integrieren?*

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 3 erfolgt in Abschnitt 7.3.1 die Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Evidenzen der Versuchsergebnisse aus Prototypen und Validierungsversuchen. Abschließend wird in Abschnitt 7.3.2 die Integration der Realdaten beschrieben.

### 7.3.1 Bewertung der Evidenz von Prototypen- und Validierungsversuchsergebnissen

#### Evaluation of Evidence from Prototype and Validation Test Results



Ziel ist es, die Ergebnisse von Prototypen und Validierungsversuchen (im Folgenden subsumierend als Versuchsergebnisse bezeichnet) so zu beschreiben, dass zum einen eine Einzelinformation (Aussage) über einen Wertebereich bzw. einen spezifischen Wert, zum anderen die Angabe der Einhaltungswahrscheinlichkeit bzw. Sicherheit der Einzelinformation (Aussage) sowie die Vertrauenswürdigkeit der Prototypen bzw. Validierungsversuche im Hinblick auf die Serienfertigung möglich ist. Bei

der Bewertung der Versuchsergebnisse wird zwischen der Verteilungsanalyse und empirische Analyse differenziert (Abbildung 7.41). Zur Auswahl des geeigneten Bewertungspfad wird geprüft, ob sich die Versuchsergebnisse in Form einer statistischen Verteilung approximieren lassen. Liegen Versuchsergebnisse vor, welche sich

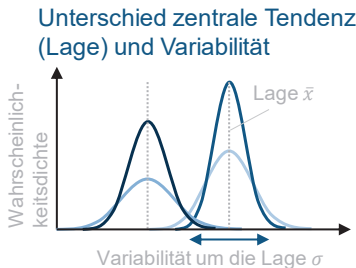


Abbildung 7.40 Zentrale Tendenz und Lage

Central Trend and Position

mittels statistischer Verteilungen (Normalverteilung bzw. Binomialverteilung) approximieren lassen, wird der Bewertungspfad der Verteilungsanalyse gewählt. Der **Bewertungspfad der Verteilungsanalyse** basiert auf der Ermittlung und Interpretation statistischer Kenngrößen wie dem Mittelwert, der Varianz und anderen Charakteristika zur Beschreibung einer Verteilung. Dies ermöglicht u. a. die Analyse der Versuchsergebnisse hinsichtlich deren zentraler Tendenz (Lage) sowie deren Variabilität (Abbildung 7.40). Kennwerte zur Beschreibung der *zentralen Tendenz* geben an, welcher Wert die Lage aller Messwerte am besten repräsentiert.

Die gebräuchlichste statistische Kenngröße zur Beschreibung der zentralen Tendenz ist das **arithmetische Mittel** ( $\bar{x}_{pl}^{PT}$ ), welches oftmals auch als Mittelwert bezeichnet wird. Das arithmetische Mittel berechnet sich aus der Summe aller **Messwerte**  $x_{n,pl}^{PT}$  dividiert durch die **Gesamtanzahl der Messwerte** ( $n_{pl}^{PT}$ ) eines Prototypen-/Validierungsversuchs, siehe Formel (83). [BORT10, S. 25 ff.]

$$E_i(n_{pl}^{PT}) = \bar{x}_{pl}^{PT} = \frac{1}{n_{pl}^{PT}} \cdot \sum_{n=1}^{n_{pl}^{PT}} x_{n,pl}^{PT} \quad (83)$$

Kennwerte zur Beschreibung der *Variabilität* beschreiben dagegen die Unterschiedlichkeit der Messwerte. Der gebräuchlichste Kennwert zur Beschreibung der Variabilität ist die Varianz  $\sigma^2$ . Die Varianz einer Stichprobe berechnet sich aus der quadratischen Abweichung aller Messwerte vom arithmetischen Mittel, geteilt durch den Stichprobenumfang abzüglich 1. [BORT10, S. 25 ff.] Aufgrund der quadratischen Potenz ist

die Varianz oftmals nicht intuitiv interpretierbar [KLEP20, S. 336]. Eine geeignetere Interpretation der Variabilität wird über die **Standardabweichung** ( $\sigma_{pl}^{PT}$ ) ermöglicht, welche aus der Wurzel der Varianz berechnet wird, siehe Formel (84) [BORT10, S. 31].

$$\sigma_{pl}^{PT} = \sqrt{\frac{1}{n_{pl}^{PT} - 1} \cdot \sum_{n=1}^{n_{pl}^{PT}} (x_{n,pl}^{PT} - \bar{x}_{pl}^{PT})^2} \quad (84)$$

Liegen keine statistisch verteilten Versuchsergebnisse vor, wird der Bewertungspfad der empirischen Analyse zur Bewertung der Versuchsergebnisse herangezogen. Da die Fertigungsfolge im agilen Serienanlauf schrittweise vom Planungszustand in den stabilen Serienbetrieb überführt wird, besteht die Möglichkeit, dass einzelne Fertigungs-/Handhabungsprozesse verschiedene Systemzustände, wie dem Einsatz von Versuchswerkzeugen und -maschinen bevor auf Serienwerkzeuge und -maschinen umgestellt wird, durchlaufen aber auch Analogiebauteile zur Validierung eingesetzt werden. Aus der Validierungsdistanz zwischen dem Prototypenzustand bzw. dem Validierungsversuchszustand und dem Serienzustand resultiert eine weitere Unsicherheit im agilen Serienanlauf bezüglich der Aussagekraft der Validierungsversuche bzw. Prototypen in Bezug auf den realen Serienzustand. Es ist somit erforderlich, die Validierungsdistanz (physische Vertrauenswürdigkeit) zum geplanten Serienzustand bei der Bewertung der Prototypen und Validierungsversuchsergebnisse mit einzubeziehen. In Abbildung 7.41 ist eine Übersicht der einzelnen Bewertungspfade gezeigt. Die Bewertungspfade werden im Folgenden detailliert beschrieben.

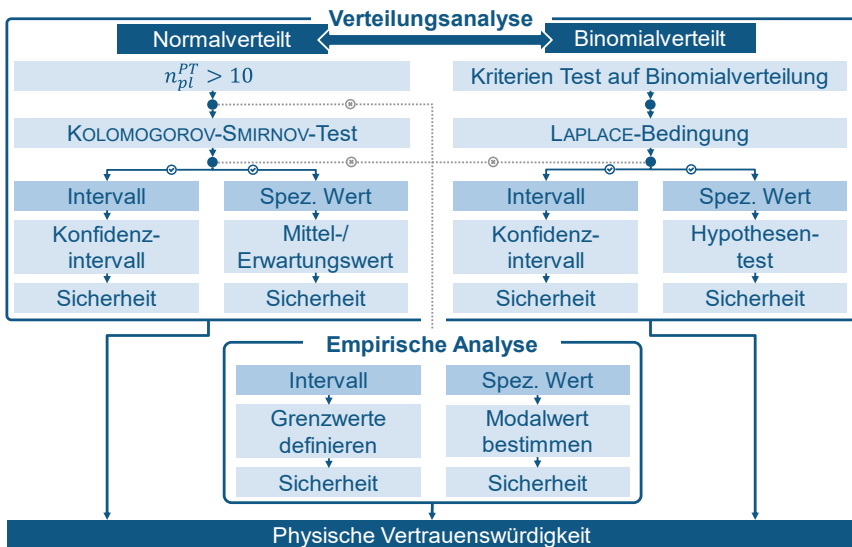


Abbildung 7.41 Evidenzbewertung von Prototypen und Validierungsversuchsergebnissen

*Evidence Evaluation of Prototypes and Validation Test Results.*

## Verteilungsanalyse

Voraussetzung der Anwendbarkeit der Verteilungsanalyse ist die Approximation der Versuchsergebnisse durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Annahme getroffen, dass die Versuchsergebnisse, die sich durch eine Verteilung approximieren lassen, entweder Normal- oder Binomialverteilt sind. Sind die Bedingungen für eine angenommene Verteilung nicht erfüllt, besteht die Möglichkeit, auf die jeweils andere Verteilung zu prüfen (Abbildung 7.41). Sind auch diese Voraussetzungen nicht erfüllt, wird auf die empirische Analyse zurückgegriffen. Grundsätzlich ist die Verteilungsanalyse der empirischen Analyse vorzuziehen.

**Normalverteilung:** In den Naturwissenschaften und der Technik liegen oftmals normalverteilte Grundgesamtheiten vor, welche in der Regel unbekannt sind. Bei zunehmendem Stichprobenumfang nähert sich oftmals die Verteilung der Stichprobe der Verteilung der Grundgesamtheit an. Daher besteht die Möglichkeit, von normalverteilten Daten auszugehen, insofern verzerrende Effekte wie bspw. Werkzeugverschleiß ausgeschlossen werden. [SCHI18, S. 21 f.] Normalverteilte Versuchsdaten sind unimodal und symmetrisch, das heißt, dass die Daten einen einzigen Modalwert besitzen und symmetrisch von diesem in ihren Häufigkeiten zu beiden Seiten abnehmen [BORT10, S. 70 f.]. Der *Modalwert* ist der Wert einer Verteilung bzw. eines Versuchsumfangs, der die höchste Häufigkeit aufweist [BORT10, S. 28]. Prototypen und Validierungsversuche weisen oftmals einen hohen monetären Aufwand auf, weshalb in frühen Phasen des agilen Serienanlaufs von einer kleinen Anzahl Prototypen bzw. Versuchsdurchläufen auszugehen ist. In der vorliegenden Arbeit wird der KOLMOGOROV-SMIRNOV-Anpassungstest zur Prüfung auf normalverteilte Versuchsergebnisse verwendet, da dieser entgegen bspw. dem  $(\chi^2)$ -Anpassungstest, welcher einen großen Stichprobenumfang voraussetzt, sich für kleine Stichprobenumfänge ( $n \geq 10$ ) eignet. Der KOLMOGOROV-SMIRNOV-Anpassungstest vergleicht eine kumulative Verteilungsfunktion einer Stichprobe mit der theoretischen kumulativen Verteilungsfunktion einer Normalverteilung. Dabei wird geprüft, ob die Abweichungen zwischen den beiden Verteilungen zufällig sind oder darauf hindeuten, dass die Stichprobe nicht aus einer Normalverteilung stammt. Zur Prüfung wird eine **Nullhypothese  $H_0$**  aufgestellt (Versuchsdaten sind normalverteilt) und gegen eine **Alternativhypothese  $H_1$** . (Versuchsdaten sind nicht normalverteilt) getestet. Das Ziel des Anpassungstests ist die Nullhypothese zu bestätigen oder die Alternativhypothese anzunehmen. [ECKS14, S. 328]. Wird die Nullhypothese bestätigt, wird von einer Normalverteilung der Versuchsergebnisse ausgegangen. Sind die Versuchsdaten normalverteilt, werden diese über die Dichtefunktion  $f_{(x)}$  beschrieben. Diese weist einen glockenförmigen Verlauf auf und nähert sich asymptotisch der Abszisse an. [BORT10, S. 70 f.] Die Dichtefunktion wird über das arithmetische Mittel und die Standardabweichung der Verteilung (siehe oben) beschrieben [ECKS14, S. 248]. Das Integral der Dichtefunktion ist die Verteilungsfunktion  $F_{(x)}$  [ECKS14, 229 f.]. Über die Verteilungsfunktion wird auf (kumulierte) Wahrscheinlichkeiten geschlossen, mit der eine Zufallsgröße eine bestimmte Lage innerhalb einer Verteilung annimmt [ECKS14, S. 216]. Graphisch wird die

Wahrscheinlichkeit  $P(X \leq a)$  als der Funktionswert der Verteilungsfunktion  $F(x)$  an der Stelle  $a$  bzw. als die Fläche unterhalb der Dichtefunktion  $f(x)$  bis zur Stelle  $a$  und oberhalb der Abszisse interpretiert [ECKS14, S. 249]. Bei der Auswertung normalverteilter Versuchsergebnisse wird zwischen Intervallangaben und der Information über einen spezifischen Wert differenziert. Intervallangaben weisen eine höhere Informationssicherheit im Vergleich zu spezifischen Werten auf, gleichzeitig aber aufgrund der Intervallangabe eine höhere Definitionsunsicherheit. Intervallangaben dienen bspw. der Informationsbeschaffung bezüglich relevanter Produkt- und Technologieinformationen (Grenzwert-/ Ausprägungsintervalle) wohingegen spezifische Werte die Reduzierung von Definitionsunsicherheiten und Bewertung der Anlaufperformance ermöglichen.

Zur Beschreibung der Versuchsergebnisse mittels **Grenzwert- bzw. Ausprägungsintervallen** (Abbildung 7.41) wird das Konfidenzintervall  $[I_{pl}^{PT/u}, I_{pl}^{PT/o}]$  für ein Konfidenzniveau  $\alpha_{pl}^{PT}$  ermittelt (Abbildung 7.42). Ein *Konfidenzintervall* beschreibt allgemein einen zufallsbedingten Wertebereich einer Verteilung, in dem ein unbekannter Erwartungswert einer Grundgesamtheit mit einer definierten Sicherheit (Konfidenzniveau) liegt [ECKS14, S. 300]. Das Konfidenzniveau  $(1 - \alpha_{pl}^{PT})$

Konfidenzintervall für  $\alpha_{pl}^{PT} = 10\%$

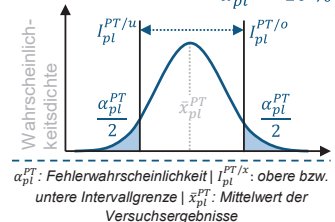


Abbildung 7.42 Konfidenzintervall

Confidence Interval

beschreibt die Sicherheit des Konfidenzintervalls und  $\alpha_{pl}^{PT}$  die **Fehlerwahrscheinlichkeit**, dass der wahre Wert der Grundgesamtheit nicht in diesem Intervall liegt. Mit einem höheren Konfidenzniveau wird das Konfidenzintervall somit breiter und die Fehlerwahrscheinlichkeit sinkt. [ECKS14, S. 300 f.] Das Konfidenzniveau wird durch Angabe der zulässigen Fehlerwahrscheinlichkeit (typischerweise  $\alpha_{pl}^{PT} = 10\%$ ,  $5\%$  oder  $1\%$ ) vom Anwendenden der Methodik vorab festgelegt [BORT10, S. 93]. Zu Ermittlung von Konfidenzintervallen wird der z oder t-Wert einer Verteilung herangezogen. Der z-Wert, ist ein standardisierter Wert, der angibt, wie viele Standardabweichungen ein bestimmter Wert über oder unter dem Mittelwert einer Normalverteilung liegt und wird verwendet, wenn die tatsächliche Standardabweichung der Grundgesamtheit bekannt ist oder wenn die Stichprobengröße groß ist (normalerweise größer als 30). Der t-Wert, wird verwendet, wenn die tatsächliche Standardabweichung der Grundgesamtheit unbekannt ist und daher aus der Stichprobe geschätzt werden muss. Der t-Wert berücksichtigt die Unsicherheit aufgrund der begrenzten Stichprobengröße, indem er den Bezug zur Stichprobengröße (Versuchsumfang  $n_{pl}^{PT}$ ) herstellt und wird typischerweise in Situationen verwendet, in denen die Stichprobengröße klein ist (normalerweise weniger als 30) oder wenn die Standardabweichung der Grundgesamtheit nicht bekannt ist. [ECKS14, S. 300 ff.] Da der Umfang der Versuchsergebnisse unter Umständen eine geringe Stichprobengröße aufweist (KOLMOGOROV-SMIRNOV-Anpassungstest mit  $n_{pl}^{PT} \geq 10$ ) und die Standardabweichung der Grundgesamtheit potenziell unbekannt ist, wird das Konfidenzintervall  $[I_{pl}^{PT/u}, I_{pl}^{PT/o}]$  im Folgenden über den t-Wert bestimmt, siehe

Formel (85) und (86) [ECKS14, S. 301]. Die ermittelten **Intervallgrenzwerte**  $I_{pl}^{PT/u}$  und  $I_{pl}^{PT/o}$  werden in Abhängigkeit von der für das Plandatum der Informationsbeschaffung vorgegebenen Auflösung  $A_{pl}$  zur sicheren Seite gerundet.

$$I_{pl}^{PT/u} = \left\lfloor \bar{x}_{pl}^{PT} - t \left( 1 - \frac{\alpha_{pl}^{PT}}{2}, n_{pl}^{PT} - 1 \right) \cdot \frac{\sigma_{pl}^{PT}}{\sqrt{n_{pl}^{PT}}} \right\rfloor_{A_{pl}} \quad (85)$$

$$I_{pl}^{PT/o} = \left\lceil \bar{x}_{pl}^{PT} + t \left( 1 - \frac{\alpha_{pl}^{PT}}{2}, n_{pl}^{PT} - 1 \right) \cdot \frac{\sigma_{pl}^{PT}}{\sqrt{n_{pl}^{PT}}} \right\rceil_{A_{pl}} \quad (86)$$

Die **Sicherheit der beschafften Einzelinformation**  $SE_{pl}^{PT/Int}$  (einer Intervallangabe) wird über das Konfidenzniveau  $(1 - \alpha_{pl}^{PT})$  als Komplement der Fehlerwahrscheinlichkeit  $\alpha_{pl}^{PT}$  beschrieben und gilt als Maß für die statistische Informationssicherheit der Versuchsergebnisse, siehe Formel (87).

$$SE_{pl}^{PT/Int} = 1 - \alpha_{pl}^{PT} \quad (87)$$

Zur Beschreibung der Versuchsergebnisse über einen **spezifischen Wert** (Abbildung 7.41), wird der Erwartungswert  $E_i(n_{pl}^{PT})$  bzw. der Mittelwert  $\bar{x}_{pl}^{PT}$  der Versuchsergebnisse ermittelt, siehe Formel (83). Die Bewertung der Sicherheit (Einhaltungswahrscheinlichkeit) der Einzelinformation erfolgt durch Interpretation der Streuung der Versuchsergebnisse in Relation zur vorgegebenen Auflösung  $A_{pl}$  des Plandatums eines Defizits. Da die Sicherheit der Einzelinformation im Intervall  $[0, 1]$  abgebildet wird, erfolgt die Skalierung der Standardabweichung  $\sigma_{pl}^{PT}$  auf das Intervall zwischen  $A_{pl}$  und der maximal zuverlässigen Distanz der  $\Delta_{apl}$ -fachen Auflösung (Formel (88)).

$$SE_{pl}^{PT/Sepz} = \min \left[ 1 - \frac{\sigma_{pl}^{PT} - A_{pl}}{(\Delta_{apl} \cdot A_{pl}) - A_{pl}}, 1 \right] \quad (88)$$

**Binomialverteilung:** In vielen statistischen Analysen und Modellen wird von einer Normalverteilung ausgegangen, da sie in der Praxis häufig vorkommt und einige wichtige statistische Eigenschaften besitzt [SCH18, S. 21 f.]. Allerdings ist es wichtig zu beachten, dass nicht alle Datensätze zwangsläufig normalverteilt sein müssen, und in einigen Fällen andere Verteilungen oder Transformationen notwendig sind, um die Daten besser zu beschreiben. Besteht bei einem Validierungsversuch lediglich die Möglichkeit zwischen den Ergebnissen Erfolg und Nichterfolg (binäre Variable), wird dies als Bernoulli-Experiment bezeichnet. Wird der Validierungsversuch mehrfach ( $n_{pl}^{PT}$ -fach) unabhängig voneinander durchgeführt, so ist die Anzahl der Erfolge binomialverteilt. [ECKS14, S. 238 ff.] Grundvoraussetzung für eine Binomialverteilung sind somit, dass (1) eine feste ganzzahlige Anzahl an Versuchsdurchläufen  $n_{pl}^{PT}$  definiert

ist, (2) die einzelnen Versuchsdurchführungen unabhängig voneinander sind, (3) **die Erfolgswahrscheinlichkeit**  $\varepsilon_{pl}^{PT}$  über die einzelnen Versuche konstant ist und (4) der Versuch durch binäre bzw. dichotome Variablen (maximal zwei Werte – Erfolg und Nichterfolg) beschrieben wird [BORT10, S. 63]. Liegen binomialverteilte Versuchsergebnisse vor und es gilt der zentrale Grenzwertsatz (LAPLACE-Bedingung), lassen sich die binomialverteilten Versuchsergebnisse durch eine Normalverteilung annähern, siehe Formel (89) bzw. (90) [ECKS14, S. 268].

$$(\sigma_{pl}^{PT})^2 = n_{pl}^{PT} \cdot \varepsilon_{pl}^{PT} \cdot (1 - \varepsilon_{pl}^{PT}) > 9 \quad (89)$$

$$\sigma_{pl}^{PT} = \sqrt{(\sigma_{pl}^{PT})^2} = \sqrt{n_{pl}^{PT} \cdot \varepsilon_{pl}^{PT} \cdot (1 - \varepsilon_{pl}^{PT})} > 3 \quad (90)$$

Aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes ist somit die Angabe eines Konfidenzintervalls auf Basis der Erfolgswahrscheinlichkeit der Versuchsergebnisse  $\varepsilon_{pl}^{PT}$  (bezogen auf die Grundgesamtheit) möglich. Die Erfolgswahrscheinlichkeit  $\varepsilon_{pl}^{PT}$  der Versuchsergebnisse wird als relative Wahrscheinlichkeit der **erfolgreichen Durchführungen**  $(n_{pl}^{PT})^+$  interpretiert und mit Hilfe der Formel (91) bestimmt. [OEST09, S. 243].

$$\varepsilon_{pl}^{PT} = \frac{(n_{pl}^{PT})^+}{n_{pl}^{PT}} \quad (91)$$

Mit Hilfe der Formeln wird analog zur Bestimmung des Konfidenzintervalls (**Ausprägungs-/Grenzwertintervall**) einer Normalverteilung das Konfidenzintervall der binomialverteilten Versuchsergebnisse ermittelt (Abbildung 7.41).

$$I_{pl}^{PT/u} = \left[ \varepsilon_{pl}^{PT} - z \left( 1 - \frac{\alpha_{pl}^{PT}}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{pl}^{PT} \cdot (1 - \varepsilon_{pl}^{PT})}{n_{pl}^{PT}}} \right]_{A_{pl}} \quad (92)$$

$$I_{pl}^{PT/o} = \left[ \varepsilon_{pl}^{PT} + z \left( 1 - \frac{\alpha_{pl}^{PT}}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{pl}^{PT} \cdot (1 - \varepsilon_{pl}^{PT})}{n_{pl}^{PT}}} \right]_{A_{pl}} \quad (93)$$

Die Sicherheit der beschafften Einzelinformation (Intervall)  $SE_{pl}^{PT/Int}$  wird über das Konfidenzniveau  $(1 - \alpha_{pl}^{PT})$  als Komplement der Fehlerwahrscheinlichkeit  $\alpha_{pl}^{PT}$  beschrieben, siehe Formel (87).

Zur Beschreibung der Versuchsergebnisse über einen **spezifischen Wert** (Abbildung 7.41), wird auf die Anwendung von Hypothesentest zurückgegriffen. Beim Hypothesentest wird die Nullhypothese  $H_0$  gegen eine Alternativhypothese  $H_1$  (Komplement der Nullhypothese) getestet. Eine Hypothese gilt als niemals endgültig wahr und kann lediglich durch eine Stichprobe untermauert oder verworfen werden. Sie wird so lange als wahr angenommen, bis deren Gegenteil nachgewiesen wurde. Der Hypothesentest gibt somit eine Richtung an, welcher Hypothese zu vertrauen ist. Wird

die Nullhypothese aufgrund statistischer Untersuchungen verworfen, wird dies als Nachweis der Plausibilität der Alternativhypothese angesehen. [OEST09, S. 255 f.] Daher wird die zu prüfende Aussage im Folgenden als Alternativhypothese  $H_1$  formuliert. Ziel ist es, die Alternativhypothese so zu formulieren, dass die Nullhypothese unter Angabe der Fehlerwahrscheinlichkeit  $\alpha_{pl}^{PT}$  verworfen wird. Um bspw. auf das Erreichen einer zu testenden Erfolgswahrscheinlichkeit, dass 60 % der Handhabungsvorgänge erfolgreich sind ( $\varepsilon_{pl}^{PT} > 0,6$ ) zu prüfen ( $H_0: \varepsilon \leq 0,6 \mid H_1: \varepsilon > 0,6$ ), wird der Ablehnungsbereich (rechtsseitiger Hypothesentest) ermittelt. Liegt  $(n_{pl}^{PT})^+$  im **Ablehnungsbereich**  $\bar{A}$ , wird die Nullhypothese verworfen.

$$\mu_{pl}^{PT} = \varepsilon_{pl}^{PT} \cdot n_{pl}^{PT} \quad (94)$$

$$\bar{A} = \left[ \left[ \mu_{pl}^{PT} + z_{(1-\alpha_{pl}^{PT})} \cdot \sigma_{pl}^{PT} \right], n_{pl}^{PT} \right] \quad (95)$$

Wird die Nullhypothese nicht verworfen, ist die Alternativhypothese neu zu formulieren und erneut zu testen. Da die Durchführung der Hypothesentest stark von der formulierten Hypothese abhängt, wird an dieser Stelle auf eine weitere Detailierung verzichtet und auf entsprechende Fachliteratur wie bspw. ECKSTEIN [ECKS14], BORTZ [BORT10] und OSTEREICH [OEST09] verwiesen. Die Sicherheit der beschafften Einzelinformation (spezifischer Wert)  $SE_{pl}^{PT/Spz}$  wird über das Konfidenzniveau  $(1 - \alpha_{pl}^{PT})$  als Komplement der Fehlerwahrscheinlichkeit  $\alpha_{pl}^{PT}$  beschrieben, siehe Formel (87).

### Empirische Analyse

Liegen Versuchsdaten vor, welche weder normal- noch binomialverteilt sind, oder ist der Versuchsumfang zu gering, wird auf die Auswertung mittels Bewertungsgrößen zurückgegriffen, die unabhängig von einer Verteilung der Ergebnisse sind (Abbildung 7.41). Hierfür werden die Versuchsergebnisse zunächst entsprechend der definierten Auflösung  $A_{pl}$  in **Ereigniscluster**  $e$  ( $e \in E$ ) zusammengefasst und in aufsteigender Reihenfolge sortiert (Abbildung 7.43). Bei binären Versuchsdaten liegen entsprechend nur die beiden Ereignisse Erfolg und Nichterfolg vor. Die Auswertungen beziehen sich anschließend auf das Ereignis Erfolg. Zur Ermittlung eines **spezifischen Wertes** nicht binärer Versuchsdaten wird der **Modalwert**  $mo_{pl}^{PT}$  **der Versuchsergebnisse** (siehe oben) ermittelt. Um eine Aussage über die Repräsentativität des Ergebnisses und somit über die Sicherheit der Information  $SE_{pl}^{PT/Spz}$

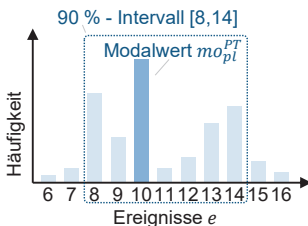


Abbildung 7.43 Empirische Analyse

Empirical Analysis

zu treffen, wird die relative Häufigkeit des Modalwertes (des Ereignisses/Erfolgs) bestimmt. Die **relative Häufigkeit**  $rel_{e,pl}^{PT}$  **eines Ereignisclusters** ergibt sich aus dem Verhältnis der **Häufigkeit des Ereignisses**  $n_{e,pl}^{PT}$  zum Versuchsumfang  $n_{pl}^{PT}$ , siehe Formel (96).

Die **relative Häufigkeit**  $rel_{e,pl}^{PT}$  **eines Ereignisclusters** ergibt sich aus dem Verhältnis der **Häufigkeit des Ereignisses**  $n_{e,pl}^{PT}$  zum Versuchsumfang  $n_{pl}^{PT}$ , siehe Formel (96).

$$SE_{pl}^{PT/Spesz} = re_{e,pl}^{PT} = \frac{n_{e,pl}^{PT}}{n_{pl}^{PT}} \quad (96)$$

Zur Ermittlung von **Ausprägungs- oder Grenzwertintervallen** wird ein Intervall um dem Modelwert aufgespannt (gestrichelte Linie in Abbildung 7.43). Die Symmetrie des Intervalls um den Modalwert ist dabei nicht von Bedeutung. Die Sicherheit des Intervalls ergibt sich aus der summierten relativen Häufigkeit der im **Intervall enthaltenen Ereignisse**  $E_I$  ( $E_I \subset E$ ), siehe Formel (97).

$$SE_{pl}^{PT/Int} = \sum_{e=1}^{E_I} re_{e,pl}^{PT} \quad (97)$$

### Physische Vertrauenswürdigkeit

Wie oben beschrieben, resultiert aus der schrittweisen Überführung der Planungsergebnisse in einen stabilen Serienzustand sowie aufgrund der einsatzspezifischen Konzeptionierung von Prototypen ( $PT$ ) und Validierungsversuchen ( $VV$ ) unter Umständen eine Distanz zwischen Versuchskonzeptionierung und realem Serienprozess/-bauteil. Es gilt somit, die Aussagekraft bzw. die Übertragbarkeit der erzielten Versuchsergebnisse auf den angestrebten Serienzustand in der Bewertung der Versuchsergebnisse mit einzubeziehen (Abbildung 7.41). Die **physische Vertrauenswürdigkeit**  $PV_{pl}^{PT}$  gilt als Maß für die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf den angestrebten Serienzustand und somit als Maß für die Zuverlässigkeit der Quelle (ZQ) der evidenztechnischen Modellierung. Die Ermittlung der physischen Vertrauenswürdigkeit basiert auf den  $k$  Kenngrößen Prozesszustand  $Pr$  (Fertigungs-/Handhabungsprozess), Werkzeugeinsatz  $W$ , Werkstoffeinsatz  $WE$  und verwendete Bauteilgeometrie  $BG$ . Die Kenngrößen **Prozesszustand**  $Pr$  und **Werkzeugeinsatz**  $W$  beschreiben die Distanz der eingesetzten Prozesse und Werkzeuge vom Real- zum angestrebten Serienzustand. Es wird bewertet, inwiefern Serienprozesse und Werkzeuge eingesetzt werden, oder auf Versuchs- bzw. Test-/Analogieverfahren und Werkzeuge zurückgegriffen wird. Die Kenngröße **Werkstoffeinsatz**  $WE$  bewertet inwieweit der angestrebte Serienwerkstoff oder ein Analogiewerkstoff für die Versuchsdurchführung eingesetzt wird. Mit der Kenngröße **Bauteilgeometrie**  $BG$  wird bewertet, inwieweit die angestrebte Serienbauteilgeometrie für die Versuchsdurchführung oder eine reduzierte Bauteilgeometrie (Analogiebauteil) eingesetzt wird. Die Kenngrößen ( $k \in \{Pr, W, WE, BG\}^{PT}$  für Prototypenversuche bzw.  $k \in \{Pr, W\}^{VV}$  für Validierungsversuche) werden hinsichtlich ihrer Relevanz für die Vertrauenswürdigkeit der Informationsbeschaffung des Plandatums (Defizit  $D_i$ ) gegeneinander mittels Paarweisen Vergleich gewichtet. Die Bewertung der Kenngrößen erfolgt binär über die **Kenngrößendistanz**  $\Delta_{pl,k}^{PV}$ . Wird der Serienzustand eingesetzt ergibt sich eine Kenngrößendistanz von  $\Delta_{pl,k}^{PV} = 0$ . Wird nicht der Serienzustand zur Versuchsdurchführung eingesetzt wird die Kenngrößendistanz mit  $\Delta_{pl,k}^{PV} = 1$  bewertet. Es ist dem Anwendenden der Methodik überlassen, eine feinere Abstufung der Distanzbewertung durchzuführen, solange dies

für alle Plandaten gilt. Die **Validierungsdistanz**  $VD_{pl}^{PV}$  ergibt sich aus der Summe der gewichteten Kenngrößendistanzen, siehe Formel (98).

$$VD_{pl}^{PV} = \sum_{k \in \{\dots\}^{PT} \text{ bzw. } k \in \{\dots\}^{VV}} g_k^i \cdot \Delta_{pl,k}^{PV} \quad (98)$$

Zur Ermittlung der physischen Vertrauenswürdigkeit wird das Verhältnis aus der vorliegenden Validierungsdistanz zur maximal möglichen Validierungsdistanz bewertet, siehe Formel (99).

$$PV_{pl}^{PT} = 1 - \frac{VD_{pl}^{PV}}{VD_{pl,max}^{PV}} \quad (99)$$

### Überführung in die Evidenzmodellierung

Nachdem die Versuchsergebnisse durch die Validierungs- bzw. empirische Analyse bewertet wurden, werden die ermittelten Ausprägungs- oder Grenzwertintervalle bzw. spezifischen Werte in Abhängigkeit von der Auflösung  $A_{pl}$  in fokale Elemente der Plandaten überführt. Die **Evidenz eines Versuchs**  $m_{pl}^{PT}$  wird analog zu REY [REY20] über die Kombination der Sicherheit und der Zuverlässigkeit bzw. Vertrauenswürdigkeit der Quelle bewertet, siehe Formel (100).

$$m_{pl}^{PT} = SE_{pl}^{PT/x} \cdot PV_{pl}^{PT} \text{ mit } x \in \{Int, Spez\} \quad (100)$$

## 7.3.2 Iterative Realdatenintegration

### *Iterative Real Data Integration*

Im Anschluss an die Simulation der theoretischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung erfolgt die Generierung von Realdaten im Realsprint durch Recherchen, Interviews und Versuchsdurchführungen. Die generierten Daten werden in die Evidenzmodellierung und Bewertung der Anlaufperformance integriert, wodurch eine Aktualisierung der Simulationsgrundlage erfolgt. Mit Hilfe des in Abschnitt 7.3.1 wird die Integration der Versuchsergebnisse ermöglicht. Durch das Update der Simulationsgrundlage ergibt sich eine neue Grundlage zur Bewertung der Reifegrade und Prognose von Restentwicklungsumfängen. Basierend auf den Ergebnissen der neuen Simulationsgrundlage (Realdaten) erfolgt der erneute Abgleich der Zielkriterien ZK 1 bis ZK 3. Ist ein Zielkriterium nicht erfüllt, so wird die Simulationsmethodik erneut durchlaufen und neue erwartete Anlaufkurven der Reifegradentwicklungen sowie potenzielle Anlaufkosten prognostiziert. Dem Anwendenden der Methodik steht in Anlehnung an die Regelkreismodellierung die Möglichkeit zur Verfügung, durch Variation der zur Verfügung stehenden Sprintkapazität sowie durch das Treffen von Entscheidungen (manuelles Setzen) steuernd in den agilen Serienanlauf einzugreifen und die Auswirkungen der Variation zu prognostizieren. Die Simulationsmethodik wird so oft durchlaufen, bis nach der Bewertung der Realdaten die Zielkriterien erreicht sind und die SOP-Freigabe erfolgt.

### 7.3.3 Validierung und Zwischenfazit

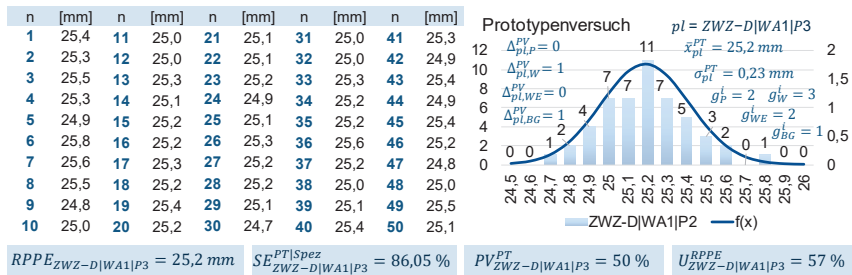
#### Validation and Interim Conclusion

Aufbauend auf dem in Abschnitt 7.1.4 eingeführten Fallbeispiel und der in den vorherigen Abschnitten 7.1.4 und 7.2.7 durchgeführten Validierungen erfolgt in diesem Abschnitt die Validierung der in Abschnitt 7.3.1 entwickelten Modelle und Methoden zur Auswertung und evidenztechnischen Modellierung von Versuchsdaten der Validierungs- und Prototypenversuche im agilen Serienanlauf sowie der Realdatenintegration in die Simulationsmethodik.

#### Validierung

Im Zuge der Generierung von Realdaten in den Realsprints des agilen Serienanlaufs wurde eine Vielzahl an Prototypen und Validierungsversuchen durchgeführt. Die Anwendbarkeit der in Abschnitt 7.3.1 entwickelten Modelle und Methoden wird anhand von vier beispielhaften Versuchsauswertungen und Modellierungen gezeigt.

Im ersten Validierungsversuch erfolgte die Ermittlung der realen Prozessperformance bei der Fertigung des Durchmessers von Wellenabsatz 1 beim Drehen (Zwischenzustand). Im Versuchsumfang wurden 50 Prototypen ( $n_{ZWZ-D|WA1|P3}^{PT} > 10$ ) gefertigt und der erzielte Durchmesser gemessen (siehe Abbildung 7.44).



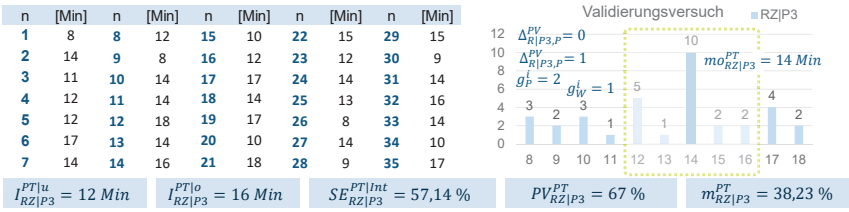
$g_k^i$ : Gewichtung der Kenngrößenabstände |  $pl$ : Plandatum |  $RPPE_{pl}$ : Reale Prozessperformance |  $SE_{pl}^{PT|Spez}$ : Sicherheit der Information |  $PV_{pl}^{PT}$ : physische Vertrauenswürdigkeit |  $URPPE_{pl}$ : Unsicherheit der realen Prozessperformance eines Prozesses bezogen auf das Plandatum  $pl$  |  $\bar{x}_{pl}^{PT}$ : Mittelwert der Versuchsergebnisse |  $\Delta_{pl,k}^{PV}$ : Kenngrößenabstände mit  $k \in \{P; W; E; BG\}$  |  $\sigma_{pl}^{PT}$ : Standardabweichung der Versuchsergebnisse

Abbildung 7.44 Prototypenversuchsergebnisse Zwischenzustand Durchmesser Wellenabsatz 1 beim Drehen

Prototype Test Results for Intermediate State Diameter Shaft 1 during Turning

Die Auswertung der Versuchsergebnisse hat gezeigt, dass sich die Versuchsdaten über eine Normalverteilung approximieren lassen (K-S-Test). Somit wird der Pfad der normalverteilten Validierungsanalyse gewählt. Zur Bestimmung der realen Prozessperformance wird ein spezifischer Wert benötigt, weshalb der Pfad zur Ermittlung spezifischer Werte genutzt wird. Bei der Versuchsdurchführung wurde der Serienwerkstoff, ein Versuchswerkzeug sowie eine Analogiegeometrie des Bauteils eingesetzt. Unter Anwendung der Formeln (5) und (83) ergibt sich die reale Prozessperformance

aus dem Mittel- bzw. Erwartungswert der Versuchsergebnisse mit  $RPE_{ZWZ-D|WA1|P3} = 25,2 \text{ mm}$  bei einer Performanceunsicherheit von  $U_{ZWZ-D|WA1|P3}^{RPE} = 57 \%$ . Neben den Prototypenversuchen zur Ermittlung der Prozessperformance beim Drehen wurden Validierungsversuche zur Planung der Rüstzeit (Informationsbeschaffung) durchgeführt. Abbildung 7.45 zeigt die Ergebnisse des Validierungsversuchs. Da sich die Ergebnisse nicht durch eine Verteilung approximieren lassen, wurde die empirische Analyse gewählt. Basierend auf der Häufigkeit der Ereignisse (Rüstzeiten) wurde der Modelwert  $mo_{RZ|P3}^{PT} = 14 \text{ Min}$  ermittelt. Die Intervallgrenzen  $I_{RZ|P3}^{PT|u} = 12 \text{ Min}$  und  $I_{RZ|P3}^{PT|o} = 16 \text{ Min}$  wurden als Information festgelegt, wodurch sich unter Anwendung der Formeln (97) eine Sicherheit der Einzelinformation von  $SE_{RZ|P3}^{PT|Int} = 57,14 \%$  ergibt.

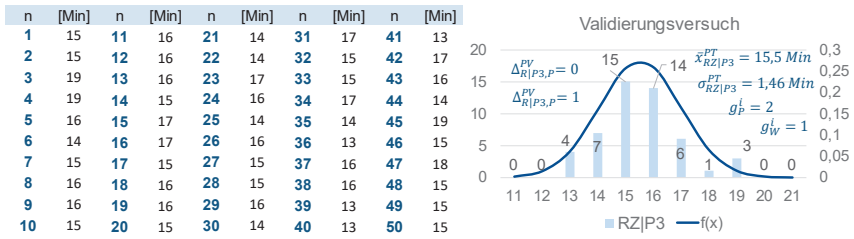


$g_k^i$ : Gewichtung der Kenngrößenabstände |  $I_{RZ|P3}^{PT|u/o}$ : Obere und untere Intervallgrenze |  $m_{RZ|P3}^{PT}$ : Basismaß (Evidenz) des Validierungsversuchs zur Evidenzmodellierung |  $mo_{pl}^{PT}$ : Modelawert der Versuchsergebnisse |  $pl$ : Plandatum |  $SE_{pl}^{PT|Int}$ : Sicherheit der Information |  $PV_{pl}^{PT}$ : physische Vertrauenswürdigkeit |  $\Delta_{pl,k}^{PV}$ : Kenngrößenabstand mit  $k \in [P; W]$

**Abbildung 7.45 Validierungsversuchsergebnisse zur Planung der Rüstzeit beim Drehen – Empirische Analyse**

*Validation Test Results for the Planning of the Tooling Time for Turning - Empirical Analysis*

In einem weiteren, späteren Validierungsversuch wurde die Rüstzeit erneut überprüft, um die Defizite hinsichtlich der Genauigkeit und Sicherheit zu reduzieren. Insgesamt wurde der Rüstvorgang 50-mal wiederholt und die benötigten Rüstzeiten gemessen. Abbildung 7.46 zeigt die Auswertung der Validierungsversuchsergebnisse. Die Ergebnisse lassen sich nun durch eine Normalverteilung approximieren. Die Auswertung wurde über den Verteilungsanalysepfad einer Normalverteilung durchgeführt und ein Signifikanzniveau von  $\alpha_{RZ|P3}^{PT} = 5 \%$  gewählt. Basierend auf der Auswertung der Ergebnisse ergibt sich unter Anwendung der Formeln (85) - (87) ein Intervall der potenziellen Rüstzeit zwischen  $I_{RZ|P3}^{PT|u} = 15 \text{ Min}$  und  $I_{RZ|P3}^{PT|o} = 16 \text{ Min}$  bei einer Informationssicherheit von  $SE_{RZ|P3}^{PT|Int} = 95 \%$ . Bei der Versuchsdurchführung wurde ein Versuchswerkzeug eingesetzt. Aus der Kombination der physischen Vertrauenswürdigkeit und der Informationssicherheit ergibt sich die Evidenz der Validierungsversuchs mit  $m_{RZ|P3}^{PT} = 63 \%$ , siehe Formel (100).



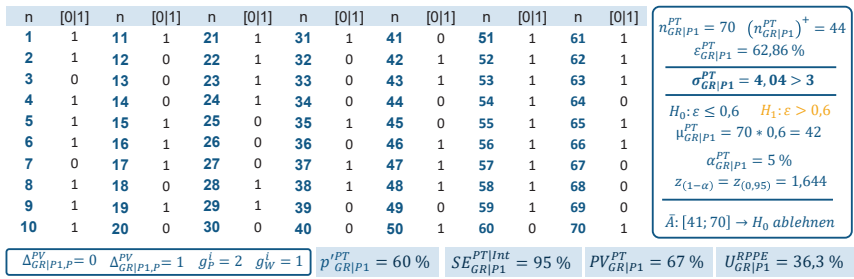
$I_{RZ P3}^{PT u} = 15 \text{ Min}$	$I_{RZ P3}^{PT o} = 16 \text{ Min}$	$S_{RZ P3}^{PT Int} = 95 \%$	$PV_{RZ P3}^{PT} = 67 \%$	$\alpha_{RZ P3}^{PT} = 5 \%$	$m_{RZ P3}^{PT} = 63 \%$
-------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------	---------------------------	------------------------------	--------------------------

$g_k^i$ : Gewichtung der Kenngrößenabstände |  $I_{RZ|P3}^{PT|u/o}$ : Obere und untere Intervallgrenze |  $m_{RZ|P3}^{PT}$ : Basismaß (Evidenz) des Validierungsversuchs zur Evidenzmodellierung |  $pl$ : Plandatum |  $S_{RZ|P3}^{PT|Int}$ : Sicherheit der Information |  $PV_{RZ|P3}^{PT}$ : physische Vertrauenswürdigkeit |  $\bar{x}_{pl}^{PT}$ : Mittelwert der Versuchsergebnisse |  $\alpha_{pl}^{PT}$ : Signifikanzniveau |  $\Delta_{pl,k}^{PV}$ : Kenngrößenabstand mit  $k \in \{P; W\}$  |  $\sigma_{pl}^{PT}$ : Standardabweichung der Versuchsergebnisse

Abbildung 7.46 Validierungsversuchsergebnisse zur Planung der Rüstzeit beim Drehen – Verteilungsanalyse

Validation Test Results for Planning of the Tooling Time for Turning - Distribution Analysis

Die Ermittlung der Gutteilrate des Handhabungsprozesses  $P_1$  erfolgte über einen weiteren Validierungsversuch, indem der Erfolg oder nicht Erfolg einer Handhabungsoperation bewertet wurde (Binomialverteilt). Es wurden 70 ( $n_{GR|P1}^{PT}$ ) Handhabungsoperationen durchgeführt, von denen 44 ( $(n_{GR|P1}^{PT})^+$ ) erfolgreich waren, siehe Abbildung 7.47.



$\hat{A}$ : Ablehnungsbereich der Nullhypothese |  $g_k^i$ : Gewichtung der Kenngrößenabstände |  $m_{GR|P1}^{PT}$ : Basismaß (Evidenz) des Validierungsversuchs zur Evidenzmodellierung |  $n_{pl}^{PT}$ : Anzahl Versuchsdurchführungen |  $(n_{pl}^{PT})^+$ : Anzahl erfolgreicher Ereignisse |  $\epsilon_{pl}^{PT}$ : Wahrscheinlichkeit erfolgreicher Versuchsdurchführungen |  $pl$ : Plandatum |  $S_{pl}^{PT|Int}$ : Sicherheit der Information |  $PV_{pl}^{PT}$ : physische Vertrauenswürdigkeit |  $\bar{x}_{pl}^{PT}$ : Mittelwert der Versuchsergebnisse |  $\alpha_{pl}^{PT}$ : Signifikanzniveau |  $\Delta_{pl,k}^{PV}$ : Kenngrößenabstand mit  $k \in \{P; W\}$  |  $\sigma_{pl}^{PT}$ : Standardabweichung der Versuchsergebnisse |  $\mu_{pl}^{PT}$ : Erwartungswert

Abbildung 7.47 Validierungsversuch Gutteilrate bei Handhabungsprozess 1

Validation Test Good Part Rate for Handling Process 1

Über einen Hypothesentest wurde die Aussage, dass 60 % der Handhabungsoperationen erfolgreich durchgeführt wurden ( $H_1: \epsilon > 0,6$ ) getestet. Da die Laplace-Bedingung erfüllt ist ( $\sigma_{GR|P1}^{PT} = 4,04 > 3$ ) können die Rechenregeln der Normalverteilung angenommen werden. Es zeigt sich, dass  $(n_{GR|P1}^{PT})^+$  im Ablehnungsbereich befindet und somit die Nullhypothese verworfen und die Alternativhypothese als plausibel

angenommen wird. Basierend auf der Auswertung wird die Einzelinformation abgeleitet, dass die reale Prozessperformance von Handhabungsprozess 1 bezogen auf die Gutteilrate von 60 % bei einer Performanceunsicherheit von  $U_{GR|P1}^{RPPPE} = 36,3\%$  angenommen wird.

### Zwischenfazit

Forschungsfrage 3 bezieht sich auf die iterative Integration von Realdaten in die Simulationsmethodik, welche in den physisch bzw. real durchgeführten Sprints durch Prototypenversuche, Validierungsversuche oder durch sonstige Informationsbeschaffungen generiert wurden. Insbesondere zielt die Forschungsfrage auf die Integration von Versuchsergebnisse in die Evidenzmodellierung der Simulationsgrundlage ab. Herausforderung war die Generierung von Aussagen bzw. Einzelinformationen unter Angabe der Sicherheit einer Einzelinformation sowie der Vertrauenswürdigkeit der Versuchsergebnisse. Zur Adressierung der Herausforderung wurde in Abschnitt 7.3.1 ein Bewertungsmodell entwickelt, welches durch die Interpretation statistischer Kenngrößen eine Transformation der Versuchsergebnisse in Einzelinformationen ermöglicht. Die Validierung zeigt, dass durch diese Modellierung der Versuchsergebnisse eine Aussage in Form eines Intervalls oder spezifischen Werts unter Angabe der Informationssicherheit und Vertrauenswürdigkeit der Informationsquelle und somit der Evidenz möglich ist (Anforderung 12). Hierdurch ist die notwendige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Information in der Evidenzmodellierung von Einzelinformationen gegeben und die generierte Einzelinformation wird als zusätzliche Information in die Modellierung der Plandaten (siehe Abschnitt 7.1.1) einbezogen (Anforderung 13). Somit wurde gezeigt, dass die formalen und inhaltlichen Anforderungen (12 und 13) erfüllt sind (siehe Abschnitt 6.1.1 und Abschnitt 6.1.2) und Forschungsfrage 3 durch die Erläuterungen in Abschnitt 7.3 beantwortet wird.

## 8 Kritische Diskussion und Verwertung

### *Critical Discussion and Utilization*

Basierend auf der in Abschnitt 2.2 eingeführten wissenschaftlichen Vorgehensweise erfolgt zur abschließenden Bewertung der formulierten Forschungshypothese im Folgenden zum einen in Abschnitt 8.1 die kritische Diskussion der in Kapitel 7 erzielten Forschungsergebnisse hinsichtlich der Zielerreichung. Zum anderen werden in Abschnitt 8.2 wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertungsmöglichkeiten aufgezeigt.

### 8.1 Kritische Diskussion der entwickelten Methodik

#### *Critical Discussion of the Developed Methodology*

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war die Entwicklung einer Methodik, welche produzierende Unternehmen bei der Gestaltung agiler Serienanläufe unterstützt. Hierzu wurde die folgende Forschungshypothese formuliert und hinsichtlich einer Falsifikation überprüft.

**Forschungshypothese:** Durch die iterative Vorgehensweise im **agilen Serienanlauf** wird es ermöglicht, **Restentwicklungsumfänge** und **Unsicherheiten** in frühen Entwicklungsphasen **systematisch zu reduzieren** und die **Anlaufziele zu erreichen**.

Zur Validierung der Forschungshypothese galt es, drei Forschungsfragen zu beantworten. Zur Beantwortung der **ersten Forschungsfrage** wurde eine Methode entwickelt, welche Anwendende bei der systematischen Ableitung von Informations- und Performancedefiziten als Folge unsicherer Produkt- und Fertigungsinformationen bzw. einer unzureichender Anlaufperformance der Fertigungsfolge unterstützt. Basierend auf den abgeleiteten Defiziten wurde zum einen eine Methode entwickelt, welche die systematische Identifikation, Bewertung und Priorisierung von Restentwicklungsumfängen ermöglicht. Zum anderen wurde ein entscheidungsabhängiges Reifegradmodell zur Bewertung des Entwicklungsfortschritts entwickelt. Die Validierung am Fallbeispiel hat gezeigt, dass die formalen und inhaltlichen Anforderungen 1 bis 8 erfüllt wurden und die entwickelten Modelle und Methoden widerspruchsfrei anwendbar sind. Somit wurde Forschungsfrage 1 beantwortet und es wird vorläufig als wahr angenommen, dass die systematische Ableitung von Defiziten, die Prognose und Bewertung von Restentwicklungsumfängen sowie die entscheidungsabhängige Bewertung von Reifegraden zur frühzeitigen Adressierung von Anlaufproblemen durch die entwickelten Modelle und Methoden ermöglicht werden. Für die Beantwortung der **zweiten Forschungsfrage** wurde ein stochastisches Prognosemodell zur Simulation der Reduzierung von Defiziten und somit zur Prognose agiler unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten durch zielgerichtete und sprintweise Informationsbeschaffung/Performancesteigerung entwickelt. Die Simulation wurde im Rahmen der Validierung auf ein Fallbeispiel angewandt. Das Ergebnis der Validierung zeigt die Einhaltung der formalen und Erfüllung der inhaltlichen Anforderungen 8 bis 11 sowie die

widerspruchslose Anwendbarkeit des Modells, sodass Forschungsfrage 2 beantwortet wurde. Es wird somit als vorläufig wahr angenommen, dass die Prognose agiler Anlaufkurven und -kosten unter Berücksichtigung unsicherer und unvollständiger Informationen durch das stochastische Prognosemodell ermöglicht wird. Um **Forschungsfrage 3** zu beantworten, wurde eine Methode entwickelt, welche die Transformation der Validierungs- und Prototypenversuchsergebnisse und somit die Integration generierter Realdaten in die Modellierung der Simulationsgrundlage mittels Evidenztheorie ermöglicht. Die Methode wurde an einem Fallbeispiel validiert und es wurde gezeigt, dass die formalen Anforderungen eingehalten sowie die inhaltlichen Anforderungen 12 und 13 erfüllt wurden. Somit wurde Forschungsfrage 3 beantwortet und es wird vorläufig als wahr angenommen, dass die Integration von Validierungs- und Prototypenversuchen mittels der entwickelten Methode in die Modellierung von Einzelinformationen mittels Evidenztheorie und somit die iterative Integration von Realdaten in die entwickelte Methodik ermöglicht wird.

Zusammenfassend wird als vorläufig wahr angenommen, dass mit Hilfe der in der Arbeit entwickelten Modelle und Methoden die systematische Ableitung von Defiziten und die frühzeitige und systematische Reduktion der Defizite ermöglicht und somit dem Auftreten von Restentwicklungsumfängen und Instabilitäten in der Fertigungsfolge stabilisierend entgegenwirkt wird. Zudem wird als vorläufig wahr angenommen, dass durch die Berücksichtigung von unsicheren und unvollständigen Planungsinformationen im Prognosemodell die Prognosesicherheit agiler Anlaufkurven und -kosten gesteigert wird. Somit wurde **die formulierte und dem Forschungsvorhaben zugrundeliegende Forschungshypothese nicht falsifiziert** und wird als vorläufig wahr angenommen.

## 8.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung

### *Scientific and Economic Utilization*

Im Folgenden werden die Möglichkeiten erläutert, die gewonnenen Forschungsergebnisse zukünftig sowohl wirtschaftlich als auch wissenschaftlich zu verwerten. Dabei zielt die wirtschaftliche Verwertung auf die Beschreibung notwendiger Folgeaktivitäten zur nutzenstiftenden Anwendbarkeit in produzierenden Unternehmen ab. Aus wissenschaftlicher Sicht werden Fragestellungen adressiert, welche in weiteren Forschungsarbeiten zu analysieren sind. Wie eingangs beschrieben (Kapitel 1), bildet der Serienanlauf eine entscheidende Phase zum wirtschaftlichen Erfolg eines Produktes am Markt und somit des Unternehmens [ELST17]. Aktuell sehen sich produzierende Unternehmen trotz zahlreicher Forschungsarbeiten mit der Herausforderung konfrontiert, Anlaufziele nicht zu erreichen [LANZ05]. Die entwickelte Methodik und das Konzept des agilen Serienanlaufs bilden die Grundlage, Informationen im Produktentstehungsprozess phasenübergreifend zu nutzen und somit zum einen Ressourcen einzusparen, zum anderen die Informationsbeschaffung/Performancesteigerung systematischer und effizienter zu gestalten. Aufgrund der hohen Komplexität von Wechselwirkungen und Zusammenhängen zwischen Produkt und Fertigung innerhalb agiler

Serienanläufe wurden die Erkenntnisse der Forschungsarbeit in einen Softwareprototypen implementiert. Zur Sicherstellung einer nutzungsfreundlichen und effizienten bzw. effektiven Anwendbarkeit der Methodik in der industriellen Praxis gilt es, die **Ergebnisse in eine professionelle Software zu überführen**. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei der Entwicklung des Softwareprototypen im Rahmen des Exzellenzclusters INTERNET OF PRODUKTION (Projektnummer 390621612) hat das Potenzial derartiger Kooperationen und zugleich die Notwendigkeit einer sauberen Kommunikation zwischen verschiedenen Fachdisziplinen gezeigt. Der Aufbau eines gleichen Verständnisses für Definitionen, Begrifflichkeiten und methodische Zusammenhänge ist für eine effiziente Zielerreichung essenziell. Ist diese Grundlage geschaffen, so ergeben sich bisher ungenutzte und innovative Möglichkeiten zur Adressierung zukünftiger Herausforderungen. Der Einsatz von Prototypen und Validierungsversuchen zur Reduktion von Defiziten und Stabilisierung von Serienanläufen ist neben dem zeitlichen Aufwand mit Kosten verbunden, wodurch sich eine direkte Beeinflussung anfallender Anlaufkosten ergibt. Aktuell ist mit der Methodik keine Differenzierung unterschiedlicher Prototypenarten und somit keine differenzierte, systematische Ableitung konkreter Anforderungen an die Prototypen möglich. Es ist somit notwendig, durch weitere Forschungsaktivitäten die **Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen Defiziten und Anforderungen an die Realdatengenerierung zu untersuchen und zu systematisieren**. Es ist zu erforschen, welchen **Einfluss unterschiedliche Arten von Prototypen** auf die Reduktion von Defiziten sowie auf das Anlaufverhalten, die Anlaufkosten und die Stabilisierung von Fertigungsfolgen haben und wie sich diese Zusammenhänge in das Prognosemodell integrieren lassen. Die Grundlage des Prognosemodells ist die stochastische Simulation der Informationsbeschaffung/Performancesteigerung. Die systematische Speicherung von historischen Daten und Modellen sowie erfolgreich eingesetzter Verteilfunktionen und deren Formparameterfunktionen bieten das Potenzial, die Prognosegüte künftiger Prognosen weiterer agiler Serienanläufe zu steigern. Zudem besteht aufgrund des iterativen Charakters der Methodik die Möglichkeit, die Prognosegüte sprintweise zu optimieren und an das reale Systemverhalten anzupassen. Um die Potenziale frühzeitig zu heben, gilt es, einen **Optimierungsalgorithmus zu implementieren**, welcher historische Daten ähnlicher Serienanläufe nutzt und produzierende Unternehmen bei der Ausgestaltung der Simulationsgrundlage unterstützt. Darüber hinaus unterstützt die Modularität der Methodik die Möglichkeit, die gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Modelle und Methoden auf **andere Anwendungsfälle zur systematischen Informationsbeschaffung/Performancesteigerung zu übertragen**. Um die Übertragbarkeit zu gewährleisten, gilt es zu erforschen, unter welchen Randbedingungen und geltenden Einschränkungen eine Übertragbarkeit möglich ist oder welche Nachweise für die Übertragbarkeit notwendig sind. Die Ausführungen zeigen, dass die entwickelte Methodik aufgrund ihrer generisch entwickelten Modelle und Methoden vielseitig einsetzbar und für weitere Anwendungsfälle erweiterbar ist. **Die vorliegende Forschungsarbeit bildet eine allgemeine Grundlage für weitere Forschungsarbeiten im Kontext agiler Serienanläufe.**



## 9 Zusammenfassung

Ein erfolgreicher Serienanlauf ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor produzierender Unternehmen. Die Verfehlung von Anlaufzielen stellt Unternehmen immer wieder vor Herausforderungen, welche oftmals in wirtschaftlichem Schaden und Imageverlusten resultieren. Um das Potenzial agiler Konzepte auch im Serienanlauf zu nutzen, gilt es die Voraussetzung für eine höhere Agilität der bisher plangetriebenen und starren Phase zu schaffen. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde der agile Serienanlauf als potenzieller Lösungsansatz hergeleitet und eine Methodik entwickelt, welche produzierende Unternehmen zur Gestaltung agiler Serienanläufe befähigt.

Der Aufbau der Forschungsarbeit folgt dem von H. ULRICH [ULRI01, S. 167 ff.] und P. ULRICH [ULRI76a, S. 345 ff.] entwickelten Forschungsprozess und basiert auf dem Verständnis des Kritischen Rationalismus [ALBE00]. Nach der Einleitung in Kapitel 1 erfolgte in Kapitel 2 die Beschreibung der wissenschaftlichen Vorgehensweise durch die Definition des wissenschaftstheoretischen Bezugsrahmens und der Beschreibung des formalen und inhaltlichen Aufbaus der Arbeit. Aufbauend darauf erfolgte in Kapitel 3 die Abgrenzung des Untersuchungsbereichs. Anschließend wurden modelltheoretische und methodische Grundlagen beschrieben und Handlungsbedarfe zur Formulierung der wirtschaftlichen Relevanz der vorliegenden Forschungsarbeit abgeleitet. Entsprechend des Untersuchungsbereichs und der abgeleiteten wirtschaftlichen Problemstellung wurden in Kapitel 4 aktuelle Forschungsarbeiten zum Serienanlauf und zu agilen Entwicklungsprozessen analysiert und das Lösungskonzept des agilen Serienanlaufs hergeleitet. Aufbauend auf der Analyse wurde die wissenschaftliche Problemstellung aus identifizierten Forschungsdefiziten abgeleitet. Die aus der Problemstellung formulierte Zielstellung der Forschungsarbeit sowie die zugrundeliegende Forschungshypothese und die Forschungsfragen wurden in Kapitel 5 beschrieben. Anschließend erfolgte in Kapitel 6 die Konzeptionierung der Methodik und die Definition formaler und inhaltlicher Anforderungen sowie der zugrundeliegenden Annahmen und Eingrenzungen. Die Methodik wurde anschließend in Kapitel 7 zur Beantwortung der Forschungsfragen detailliert. Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 wurden in Abschnitt 7.1 Modelle und Methoden zur systematischen Ableitung von Informations- und Anlaufperformancedefiziten sowie zur Identifikation und Bewertung resultierender Restentwicklungsumfänge und entscheidungsabhängiger Reifegradmodellierungen entwickelt. In Abschnitt 7.2 erfolgte die Beantwortung von Forschungsfrage 2 durch die Entwicklung eines stochastischen Prognosemodells unsicherheitsbehafteter Anlaufkurven und -kosten. Forschungsfrage 3 wurde in Abschnitt 7.3 durch Entwicklung eines Vorgehens zur Modellierung von Versuchsergebnissen aus Realdaten mittels Evidenztheorie beantwortet. Die entwickelten Modelle und Methoden wurden in den jeweiligen Abschnitten anhand eines Fallbeispiels validiert. Abschließend erfolgte in Kapitel 8 die kritische Diskussion und die Beschreibung der Verwertung der Forschungsergebnisse als Ausblick für weitere Forschungsarbeiten.

## Summary

A successful ramp-up production is a crucial factor of success for manufacturing companies. However, the failure to achieve ramp-up targets often poses significant challenges for companies, resulting in economic losses and damage to the company's reputation. To use the potential of agile concepts in the context of ramp-up production, it is essential to create the conditions for higher agility in the previously plan-driven and rigid phases. In this thesis, the agile ramp-up production was derived as a potential solution approach and a methodology was developed to enable manufacturing companies to design agile ramp-up productions.

The structure of the thesis follows the research process developed by H. URLICH [ULRI01, S. 167 ff.] and P. ULRICH [ULRI76a, S. 345 ff.] and is based on the understanding of Critical Rationalism [ALBE00]. Following the introduction in Chapter 1, in Chapter 2 the scientific approach was described by defining the scientific-theoretical frame of reference and describing the formal and content-related structure of the thesis. Based on this, the investigation area was specified in Chapter 3. Model-theoretical and methodological foundations were described and the need for action to formulate the economic problem of the thesis is derived. In accordance with the investigation area and the derived economic problem, the current research on ramp-up production and agile development processes was analyzed in Chapter 4 leading to the derivation of the concept of agile production ramp-up. The research problem arising from identified research gaps was formulated in Chapter 1. The research objective, underlying research hypothesis, and research questions were described based on the research problem. Subsequently, in Chapter 6, the methodology was conceptualized and the formal and content-related requirements as well as the underlying assumptions and limitations were defined. The methodology was detailed in Chapter 7 to answer the research questions. To address research question 1, Section 7.1 presented models and methods for systematically deriving information and ramp-up performance deficits, identifying, and evaluating resulting remaining development scopes, and decision-dependent maturity modeling. In Section 7.2, research question 2 was addressed by developing a stochastic prediction model for uncertain agile ramp-up curves and costs. Research question 3 was answered in Section 7.3 by developing an approach for evidential modeling of real data test results. The developed models and methods were validated in the respective sections using a case study. Finally, Chapter 8 provided a critical discussion and described the utilization of the research results as an outlook for further research.

# Literaturverzeichnis

## References

- [ALBE00] Albert, H.: Kritischer Rationalismus. Vier Kapitel zur Kritik illusionären Denkens. (Reihe: Uni-Taschenbücher, Bd. 2138) Tübingen: Mohr Siebeck, 2000
- [AUER10] Auer, E.; Luther, W.; Rebner, G.; Limbourg, P.: A verified MATLAB toolbox for the dempster-shafer theory. Duisburg: University of Duisburg-Essen, Computer and Cognitive Sciences (INKO), 2010
- [AYS22] Ays, J.: Kontextbasierte Integration agiler und plangetriebener Entwicklungsprozesse. Dissertation RWTH Aachen University, 2022
- [BASS15] Basse, I.: Systemtheoretische Modellierung von Qualitätsprüfungen in anlaufenden Montagesystemen. Dissertation RWTH Aachen University, 2015
- [BASS18] Basse, F.: Gestaltung eines adaptiven Änderungssystems für einen beherrschten Serienhochlauf (Design of an adaptive engineering change system for a stable series ramp-up). Dissertation RWTH Aachen University, 2018
- [BAUE21] Bauer, A.; Gardini, M. A.; Sommer Guido; Fink, A.: Szenarien für den Tourismus in Bayern im Jahr 2040. Studienbericht Hochschule für angewandte Wissenschaft Kempten Kempten, 2021
- [BAUM01] Baumgarten, H.; Risse, J.: Logistikbasiertes Management des Produktentstehungsprozesses. In: Hossner R. (Hrsg.): Jahrbuch der Logistik 2001. Düsseldorf: Handelsblatt Fachverlag, 2001, S. 150–156
- [BAUR67] Baur, W.: Neue Wege der betrieblichen Planung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1967
- [BECK01] Beck, K.; Beedle, M.; van Bennekum, A.; Cockburn, A.; Cunningham, W.; Fowler, M.; Grenning, J.; Highsmith, J.; Hunt, A.; Jeffries, R.; Kern, J.; Marick, B.; Martin, R. C.; Mellor, S.; Schwaber, K.; Sutherland, J.; Thomas, D.: Agile Manifesto. URL: <https://agilemanifesto.org/iso/de/manifesto.html> [Stand: 01.06.2021]
- [BECK03] Beck, K.: Extreme programming explained. Embrace change. 8th. print Boston: Addison-Wesley, 2003
- [BECK10] Becker, K.: Beitrag zur Kopplung von Meridian- und Gitterströmung in Entwurfsverfahren für mehrstufige Turbomaschinen. Dissertation Universität Kassel, 2010

- [BECK22] Beckers, A.; Hommen, T.; Becker, M.; Kornely, M. J.; Reuter, E.; Grünert, G.; Ortjohann, L.; Jacob, J.; Niemiets, P.; Barth, S.; Bergs, T.: Digitalized manufacturing process sequences – foundations and analysis of the economic and ecological potential. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 39. Jg., 2022, S. 387–400
- [BECK23] Beckers, A.: Auslegung wirtschaftlich-technologisch optimierter Fertigungsprozessfolgen mittels prozessübergreifender Modellierung. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2023
- [BEIE14] Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: Methoden wissensbasierter Systeme. Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen. (Reihe: Computational Intelligence). 5., überarbeitete und erweiterte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [BEND16] Bender, B.; Gericke, K.: Entwicklungsprozesse. In: Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, 2016, S. 399–424
- [BERG21] Bergs, T.; Apelt, S.; Beckers, A.; Barth, S.: Agile ramp-up production as an advantage of highly iterative product development. In: Manufacturing Letters. 27. Jg., 2021, S. 4–7
- [BERG22] Bergs, T.; Apelt, S.; Becker, M.; Beckers, A.; Barth, S.: Identification of Residual Development Efforts in Agile Ramp-Up Production. In: Leipzig, K. von; Sacks, N.; Mc Clelland, M. (Hrsg.): Smart, Sustainable Manufacturing in an Ever-Changing World World. Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA '22). Cham: Springer International Publishing, 2022, S. 3–15
- [BERN18] Bernstein, H.: 1. Grundlagen der SPS-Technik. In: Bernstein, H. (Hrsg.): Speicherprogrammierbare Steuerung - SPS: de Gruyter, 2018, S. 1–56
- [BIND96] Binder, V. A.; Kantowsky, J.: Technologiepotentiale. Neuausrichtung der Gestaltungsfelder des Strategischen Technologiemanagements. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1996
- [BINN16] Binner, H. F.: MITO-Methoden-Tool-Beschreibung. In: Binner, H. F. (Hrsg.): Methoden-Baukasten für ganzheitliches Prozessmanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 25–58
- [BISC07] Bischoff, R.: Anlaufmanagement. Schnittstelle zwischen Projekt und Serie. (Reihe: Konstanzer Managementschriften, Bd. 2) Konstanz: Hochschule Konstanz, 2007
- [BORO11] Borowski, E.: Agiles Vorgehensmodell zum Management komplexer Produktionsanläufe mechatronischer Produkte in Unternehmen mit mittelständischen Strukturen. Dissertation RWTH Aachen University, 2011

- [BORS07] Borsdorf, R.: Methodischer Ansatz zur Integration von Technologiewissen in den Produktentwicklungsprozess. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2007
- [BORT10] Bortz, J.; Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. (Reihe: Springer-Lehrbuch). 7. Auflage Berlin: Springer, 2010
- [BUCH14] Buchholz, S. H.: Bewertung des Substitutionsrisikos von Fertigungssystemen. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2014
- [BULL94] Bullinger, H.-J.: Einführung in das Technologiemanagement. Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. (Reihe: Technologiemanagement) Stuttgart: Teubner, 1994
- [BULL97] Bullinger, H.-J.: Rapid Prototyping in der Anwendung — der schnelle Weg zum Serienteil. In: Schuh, G.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Komplexität und Agilität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997, S. 169–181
- [BUSS93] Bussiek, J.; Fraling, R.; Hesse, K.: Unternehmensanalyse mit Kennzahlen. Informationsbeschaffung, Potential-Analyse, Jahresabschluß, Arten von Kennzahlen, Kennzahlensysteme, ergänzende Darstellungsformen, bilanzkritische und erfolgskritische Kennzahlen. (Reihe: Praxis der Unternehmensführung) Wiesbaden: Gabler, 1993
- [CHAK97] Chakravarthy, B.: A new strategy framework for coping with turbulence. In: MIT Sloan Management Review. 38. Jg., 1997, 2, S. 69–82
- [CLAR05] Clark, K. B.; Fujimoto, T.: Product development performance. Strategy, organization, and management in the world auto industry. [Nachdr.] Boston, Mass.: Harvard Business School Press, 2005
- [COOP08] Cooper, R. G.: Perspective: The Stage-Gate® Idea-to-Launch Process—Update, What's New, and NexGen Systems. In: Journal of Product Innovation Management. 25. Jg., 2008, 3, S. 213–232
- [COOP14] Cooper, R. G.: What's Next?: After Stage-Gate. In: Research-Technology Management. Vol. 157. Jg., 2014, Nr. 1, S. 20–31
- [COOP15] Cooper, R. G.: What's Next?: After Stage-Gate. In: Research-Technology Management. Vol. 157. Jg., 2015, Nr. 1, S. 20–31
- [COOP16] Cooper, R. G.; Sommer, A. F.: The Agile-Stage-Gate Hybrid Model: A Promising New Approach and a New Research Opportunity. In: Journal of Product Innovation Management. 33. Jg., 2016, 5, S. 513–526
- [DELA20] DeLange, J. D. M.: Prozessmodell für den Werkzeugbau im iterativen Produktentwicklungsprozess. Dissertation RWTH Aachen Aachen, 2020

- [DEMP67] Dempster, A. P.: Upper and lower probability inferences based on a sample from a finite univariate population. In: *Biometrika*. 54. Jg., 1967, S. 516
- [DEUT78] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V (Hrsg.). *Qualitätskosten. Rahmenempfehlungen zu ihrer Definition, Erfassung, Beurteilung*. 4. Aufl., 1978; Reihe: DGQ
- [DEZE12] Dezert, J.; Wang, P.; Tchamova, A. On the validity of Dempster-Shafer Theory. 2012 15th International Conference on Information Fusion (FUSION 2012). Singapore, 9 - 12 July 2012. Piscataway, NJ: IEEE, 2012, S. 655–660
- [DIEL18] Diels, F.: *Indikatoren für die Ermittlung agil zu entwickelnder Produktumfänge*. Dissertation RWTH Aachen University, 2018
- [DIN ISO/TS09] DIN ISO/TS 16949 (November 2009). *Qualitätsmanagementsysteme – Besondere Anforderungen bei Anwendung von ISO 9001:2008 für die Serien- und Ersatzteil-Produktion in der Automobilindustrie*.
- [DIN09] DIN 69901-5 (2009). *Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5: Begriffe*.
- [DIN14] DIN 60050-351 (September 2014). *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch*.
- [DIN22] DIN 8580 (Dezember 2022). *Fertigungsverfahren*.
- [DOMB17] Dombrowski, U.; Hanke, T.: *Lean Ramp-up: Ein Organisationsmodell für das Anlaufmanagement*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF*. 112. Jg., 2017, 6, S. 387–391
- [DUFN04] Dufner, J.; Jensen, U.; Schumacher, E.: *Statistik mit SAS*. (Reihe: Springer eBook Collection Life Science and Basic Disciplines). 3., überarbeitete Auflage Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2004
- [DYCK12] Dyckhoff, H.; Müser, M.; Renner, T.: *Ansätze einer Produktionstheorie des Serienanlaufs*. In: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*. 82. Jg., 2012, 12, S. 1427–1456
- [ECKS14] Eckstein, P. P.: *Repetitorium Statistik. Deskriptive Statistik - Stochastik - Induktive Statistik*. 8. Auflage Wiesbaden: Springer, 2014
- [EGER05] Eger, T.; Eckert, C.; Clarkson, P. J. The role of design freeze in product development. *Proceedings ICED 05*. Melbourne, Australia, 15.18.08, 2005, S. 1–11
- [EHR17] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. (Reihe: Hanser eLibrary). 6., überarbeitete und erweiterte Auflage München: Carl Hanser Verlag, 2017

- [ELST17] Elstner, S.: Eine Methode zur Bewertung von Anlauftrisiken in der Produktentwicklung für die Flugzeugindustrie. Dissertation Technische Universität Hamburg-Harburg, 2017
- [ENGE10] Engelhardt R.; Kloberdanz, H.; Mathias, J., Birkhofer, H. An approach of a model to describe uncertainty in technical systems. International Design Conference - Design 2010. Dubrovnik, Croatia, May 17-20, 2010, 2010.
- [EVER05] Eversheim, W. (Hrsg.). Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung Berlin, Heidelberg, 2005: Springer; Reihe: VDI
- [EVER94] Eversheim, W.; Lenhart, M.; Katzy, B.: Information modelling for technology-oriented tool selection. In: CIRP Annals. 43. Jg., 1994, Nr. 1, S. 429–432
- [EVER99] Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management 3. Gestaltung von Produktionssystemen. (Reihe: Hütte) Berlin, Heidelberg: Springer, 1999
- [FALL00] Fallböhrer, M.: Generierung alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2000
- [FELD13a] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Die Hauptarbeitsschritte des Gestaltungsprozesses. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 465–477
- [FELD13b] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Der Produktentstehungsprozess (PEP). In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 11–24
- [FELD13c] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Göpfert, J.; Tretow, G.: Technische Systeme. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 237–279
- [FISC93] Fischer, D. R.: Entwicklung eines objektorientierten Informationssystems zur optimierten Werkstoffauswahl. Diss. Universität Stuttgart, 1993
- [FLAG13] Flage, R.; Baraldi, P.; Zio, E.; Aven, T.: Probability and possibility-based representations of uncertainty in fault tree analysis. In: Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis. 33. Jg., 2013, 1, S. 121–133

- [FLEI07] Fleischer, J.; Nyhuis, P.; Schuh, G.; Serwotka, H.: Proaktive Anlaufsteuerung entlang der Wertschöpfungskette von Produktionssystemen (ProactAS). In: Schneller Produktionsanlauf in der Wertschöpfungskette. (Reihe: Schneller Produktionsanlauf in der Wertschöpfungskette, ReiheBd. 4,1). Frankfurt am Main: VDMA-Verl., 2007
- [FLEI16] Fleischer, B.; Theumert, H.: Aufbau und Vorgehensweise des Buches. In: Fleischer, B.; Theumert, H. (Hrsg.): Entwickeln Konstruieren Berechnen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 1–11
- [FÖLL22] Fölling, C.: Komplexitätsreduktion durch hybride Montageplanung. Dissertation RWTH Aachen University, 2022
- [FREY16] Frey, D.: Graduiertenkolleg "Anlaufmanagement": Neue Wege im Serienanlauf - Mit dem Scrum-Ansatz zu mehr Agilität im Anlauf. In: UdZ - Unternehmen der Zukunft. 17. Jg., 2016, 1, S. 30–31
- [FRIT98] Fritsche, R.: Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel. Dissertation Technische Universität Berlin Berlin, 1998
- [GART12] Gartz Thomas: Diskrete Migration als Anlaufstrategie für Montagesysteme. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2012
- [GART16] Gartz, T.; Brambring, F.; Basse, F.: Target-oriented Prototyping in Highly Iterative Product Development. In: Procedia CIRP. 51. Jg., 2016, S. 19–23
- [GAUB09] Gaubinger, K.: Prozessmodell des integrierten Innovations- und Produktmanagements. In: Gaubinger, K.; Werani, T.; Rabl, M. (Hrsg.): Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement. Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 17–27
- [GAUS16] Gausemeier, J.; Pfänder, T.; Lehner, A.-C.: Strategische Unternehmensführung mit Szenario-Management. In: Spath, D.; Westkämper, E. (Hrsg.): Handbuch Unternehmensorganisation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 1–13
- [GERP05] Gerpott, T. J.: Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage Stuttgart Germany: Schäffer-Poeschel Verlag, 2005
- [GERS98] Gerst, M.: Aktionsfeld 2: Änderungserkennung (Operation Field 2: Change detection). In: Lindemann, U.; Reichwald, R. (Hrsg.): Integriertes Änderungsmanagement (Integrated change management). Berlin: Springer, 1998, S. 132–153
- [GUAR16] Guaragni, F.; Schmidt, T.; Paetzold, K.: Traditional and Agile Product Development in a Hyperconnected World: Turning Weaknesses into Strengths. In: Procedia CIRP. 52. Jg., 2016, S. 62–67

- [GUST89] Gustmann, K.-H.; Rettschlag, G.; Wolff, H.-P.: Produktionsanlauf neuer Erzeugnisse und Anlagen. 1. Aufl. Berlin: Verl. d. Wirtschaft, 1989
- [HANU11] Hanusch, H.: Nutzen-Kosten-Analyse. (Reihe: Vahlens Kurzlehrbücher). 3rd ed. München: Franz Vahlen, 2011
- [HAUP20] Hauptmanns, U.: Prozess- und Anlagensicherheit. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2020
- [HELL06] Helling, H.: Konzept eines integrierten Produkt- und Prozessmodells zur effizienten Steuerung der Entwicklungsreife am Beispiel der Automobilentwicklung. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern Kaiserslautern, 2006
- [HERR09] Herrmann, C.; Wenda, A.; Bruns, H.; Weinhonig, K.: Ramp-up Failure Rate. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 104. Jg., 2009, 6, S. 454–458
- [HESS20] Hesse, S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. 5. Auflage München: Hanser, 2020
- [HIGH13] Highsmith, J.: Adaptive Software Development. A Collaborative Approach to Managing Complex Systems. Hoboken: Pearson Education, Limited, 2013
- [ISHI76] Ishikawa, K.: Guide to quality control. Tokyo, 1976
- [JARR11] Jarratt, T. A. W.; Eckert, C. M.; Caldwell, N. H. M.; Clarkson, P. J.: Engineering change: an overview and perspective on the literature. In: Research in Engineering Design. 22. Jg., 2011, 2, S. 103–124
- [JENK07] Jenke, K.: Konzept zur Lösung technischer Qualitätsprobleme in der Produktion durch Anwendung der Theorie des erfinderischen Problemlösens (TRIZ). Dissertation Kaiserslautern, 2007
- [KALU13] Kalus, G.: Projektspezifische Anpassung von Vorgehensmodellen: Feature-basiertes Tailoring. Dissertation Technische Universität München München, 2013
- [KAMP16] Kampker, A.; Förstmann, R.; Ordnung, M.; Haunreiter, A.: Prototypen im agilen Entwicklungsmanagement. In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift. 118. Jg., 2016, 7-8, S. 72–77
- [KANT18] Kantelberg, J.: Gestaltung agiler Entwicklungsprozesse technischer Produkte. Dissertation RWTH Aachen University, 2018
- [KERN09] Kern, J.: Ishikawa Diagramme - Ursache-Wirkungs-Diagramme. München: GRIN Verlag GmbH, 2009

- [KESS99] Kessler, E. H.; Chakrabarti, A. K.: Concurrent development an product innovations. In: Brockhoff, K. (Hrsg.): *The Dynamics of Innovation. Strategic and Managerial Implications.* . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 1999, S. 281–304
- [KIRS08] Kirsch, T.; Buchholz, W.: An- und Auslaufmanagement. In: *Industrie Management*, 2008, 3, S. 45–48
- [KLAP05] Klappert, S.: *Systembildendes Technologie-Controlling.* Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2005
- [KLAP11] Klappert, S.; Schuh, G.; Aghassi, S.: Einleitung und Abgrenzung. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2.* (Reihe: VDI-Buch) 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 5–10
- [KLEI16] Klein, T. P.: *Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau.* Dissertation Technische Universität München, 2016
- [KLEP20] Kleppmann, W.: *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren.* 10. Auflage München: Hanser, 2020
- [KLIN20] Klink, P.; Sardesai, S.; Gehring, J.; Görtz, M. D. FAST RAMP-UP: Anlaufmanagement nach disruptiven pandemischen Ereignissen. Whitepaper im Rahmen des Forschungsprojekts "Fast Ramp-Up". Herausgegeben von Michael ten Hompel, Michael Henke und Uwe Clausen Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, 2020
- [KLIR06] Klir, G. J.: *Uncertainly and Information. Foundations of Generalized Information Theory.* New York: John Wiley & Sons, 2006
- [KLOC05] Klocke, F.; Brinksmeier, E.; Weinert, K.: Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. In: *CIRP Annals.* 54. Jg., 2005, 2, S. 22–45
- [KLOC08] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren.* (Reihe: VDI-Buch, Bd. 1). 8., [neu bearb.] Aufl. Berlin: Springer, 2008
- [KLOC16] Klocke, F.; Stauder, J.; Mattfeld, P.; Müller, J.: Modeling of Manufacturing Technologies During Ramp-up. In: *Procedia CIRP.* 51. Jg., 2016, S. 122–127
- [KLOC18] Klocke, F.: Prozessauslegung und Prozessüberwachung. In: Klocke, F. (Hrsg.): *Fertigungsverfahren 1.* (Reihe: VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 441–499
- [KLOC98] Klocke, F.; Fallböhmer, M.; Trommer, G.: Generieren und Bewertung von Prozeßketten. in frühen Phasen der Produktentwicklung. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF.* 10. Jg., 1998, 93, S. 461–464

- [KLUG02] Kluge, F.; Seebold, E.: Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache. 24., durchges. und erw. Aufl. Berlin: de Gruyter, 2002
- [KNET04] Knetsch, T.: Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen. Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg Magdeburg, 2004
- [KNÜP12] Knüppel, K.; Tschöpe, S.; Nyhuis, P.: Reifegradbasierte Bewertung der Anlaufähigkeit. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 107. Jg., 2012, 6, S. 427–431
- [KOHL13] Kohler, K.; Hochreuter, T.; Diefenbach, S.; Lenz, E.; Hassenzahl, M.: Durch schnelles Scheitern zum Erfolg. Eine Frage des passenden Prototypen? In: Usability Professionals. 1. Jg., 2013, S. 78–84
- [KOLL98] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. (Reihe: Springer eBook Collection Computer Science and Engineering). neubearbeitete und erweiterte Auflage Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998
- [KOMU15] Komus, A.; Kuberg, M.: Status Quo Agile. Studie zu Verbreitung und Nutzen agiler Methoden Hochschule Koblenz Koblenz, 2015
- [KOMU20] Komus, A.; Kuberg, M.: Ergebnisbericht: Studie Status Quo (Scaled) Agile 2019/2020. 4. Internationale Studie zu Nutzen und Erfolgsfaktoren (skalierter) agiler Ansätze Hochschule Koblenz Koblenz, 2020
- [KOOP18] Koop, A.; Moock, H.: Lineare Optimierung – eine anwendungsorientierte Einführung in Operations Research. . 2. Aufl. 2018 Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018
- [KREB11] Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Dissertation Technische Universität München München, 2011
- [KUHN02] Kuhn, A.; Wiendahl, H. P.; Eversheim, W.; Schuh, G.: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Ergebnisbericht der Untersuchung "fast ramp-up". Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2002
- [KUKU17] Kukulies, J.; Schmitt, R.: Stabilizing production ramp-up by modeling uncertainty for product design verification using Dempster–Shafer theory. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 23. Jg., 2017, S. 187–196
- [LAIC03] Laick, T.: Hochlaufmanagement-Sicherer Produktionshochlauf durch zielorientierte Gestaltung und Lenkung des Produktionsprozesssystems. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern Kaiserslautern, 2003

- [LANZ05] Lanza, G.: Simulationsbasierte Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen. Dissertation Universität Karlsruhe Karlsruhe, 2005
- [LAUX14a] Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: Probleme und Lösungskonzepte der Entscheidungstheorie: ein Überblick. In: Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y. (Hrsg.): Entscheidungstheorie. (Reihe: Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 3–28
- [LAUX14b] Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidung bei Unsicherheit: Grundlagen. In: Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y. (Hrsg.): Entscheidungstheorie. (Reihe: Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 83–112
- [LAW13] Law, A. M.: Simulation modeling and analysis. (Reihe: McGraw-Hill series in industrial engineering and management science). Fifth edition Dubuque: McGraw-Hill Education, 2013
- [LEWA74] Lewandowski, R.: Prognose- und Informationssysteme 1. Berlin: de Gruyter, 1974
- [LIM08] Lim, Y.-K.; Stolterman, E.; Tenenber, J.: The anatomy of prototypes. Prototypes as filters, prototypes as manifestations of design ideas. In: ACM Transactions on Computer-Human Interaction. 15. Jg., 2008, 2, S. 1–27
- [LÜDT16] Lüdtke, B.: Lösungsraum-Steuerung in der Produktentwicklung. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2016
- [LUHM99] Luhmer, A.: Die z-Situation als dynamisches Konzept in Gutenbergs Produktionstheorie. In: Steven, M. (Hrsg.): Die Theorie der Unternehmung in Forschung und Praxis., 1999, S. 223–238
- [LUTZ22] Lutz, N. J.: Integration virtueller Methoden in das Anlaufmanagement skalierbarer Fertigungssysteme. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2022
- [MACH11] Macherauch, E.; Zoch, H.-W.: Praktikum in Werkstoffkunde. 91 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik. (Reihe: Studium Werkstofftechnik). 11., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011
- [MAUE16] Maue, A.: Aufwandsorientierte Gestaltung des Produktionsanlaufs am Beispiel der Automobilproduktion. Dissertation RWTH Aachen University, 2016
- [MEIS21] Meister, M.: Methodik zur adaptiven Planung digital unterstützter Problemlösungsprozesse im Produktionsanlauf. Dissertation Technische Universität Darmstadt, 2021

- [MENG01] Menge, H.; Güthling, O.: Langenscheidts Großwörterbuch Altgriechisch. Altgriechisch-Deutsch. (Reihe: Langenscheidts Grosswörterbücher). 30. Aufl. Berlin: Langenscheidt, 2001
- [MIGN18] Mignolet, M. P.; Brake, M. R. W.; Segalman, D. J.: A Primer for Uncertainty Modeling in Jointed Structures. In: Brake, M. R. (Hrsg.): The Mechanics of Jointed Structures. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 585–592
- [MONE11] Monego, T. M.; Engelhardt-Nowitzki, C.; Schönwetter, G.: Der Serienanlauf als Teil des Innovationsprozesses: eine empirische Untersuchung über den Stand in österreichischen Industrieunternehmen. In: Forschungsinitiative AGTIL 2011, 2011, S. 183–200
- [MÜLL07] Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Dissertation Technische Universität München München, 2007
- [MÜLL18] Müller, J.: Integrative Gestaltung von Fertigungsprozess- und Prüffolgen für sicherheitskritische Bauteile. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2018
- [NAGA13] Nagarajah, A.: Methodisches Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 319–341
- [NAGE10] Nagel, J.: Risikoorientiertes Anlaufmanagement. Dissertation Technische Universität Cottbus, 2010
- [NAGE11] Nagel, J.: Grundlagen. In: Nagel, J. (Hrsg.): Risikoorientiertes Anlaufmanagement. . Wiesbaden: Gabler, 2011, S. 4–78
- [NAKA88] Nakajima, S.: Introduction to TPM. Total productive maintenance. Cambridge, Mass.: Productivity Press, 1988
- [NAU12] Nau, B.: Anlauforientierte Technologieplanung zur Auswahl von Fertigungstechnologien. Dissertation RWTH Aachen University, 2012
- [NGO21] Ngo, Q. H.: Gestaltungsmodell für qualitätsorientierte Produktionsanläufe. Dissertation Apprimus Verlag, 2021
- [OBER10] Oberkampf, W. L.; Roy, C. J.: Verification and Validation in Scientific Computing. Cambridge University Press, 2010
- [OEST09] Oestreich, M.; Romberg, O.: Keine Panik vor Statistik! Erfolg und Spaß im Horrorfach nichttechnischer Studiengänge. (Reihe: Studium). 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009

- [OPIT06] Opitz, A.; Müller, E.; Hildebrand, T.: Die optimale Anlaufkurve in der Serienfertigung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 101. Jg., 2006, 6, S. 356–359
- [OVES12] Ovesen, N.: The Challenges of Becoming Agile: Implementing and conducting scrum in integrated product development. Dissertation Aalborg University, 2012
- [PAHL13] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Heusel, J.; Bronnhuber, T.; Hufenbach, W.; Helms, O.; Schlick, C.; Klocke, F.; Dilger, K.; Müller, R.: Gestaltungsrichtlinien. In: Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. 2013. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 583–751
- [PART91] Partridge, E.: Origins. An etymological dictionary of modern English. 4. ed., Repr London: Routledge, 1991
- [PATZ82] Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1982
- [PETE08] Peters, N.; Hofstetter, J. S.: Konzepte und Erfolgsfaktoren für Anlaufstrategien in Netzwerken der Automobilindustrie. In: Schuh, G.; Stölzle, W.; Straube, F. (Hrsg.): Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 9–29
- [PFOH00] Pfohl, H.-C.; Gareis, K.: Die Rolle der Logistik in der Anlaufphase. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft. 70. Jg., 2000, 11, S. 1189–1214
- [POPP94] Popper, K. R.: Alles Leben ist Problemlösen: Über Erkenntnis, Geschichte und Politik. 8. Aufl., 38. - 41. Tsd München, Zürich: Piper, 1994
- [PÖSC21] Pöschl, S.: Prozessplanungsmodell für eine Effizienzsteigerung von Inbetriebnahmeprozessen im Maschinenbau. Dissertation Universität Stuttgart Stuttgart, 2021
- [QUIC10] Quick, J.: Graduiertenkolleg Anlaufmanagement: Entscheidungsmodelle im Produktionsanlauf. In: UdZ - Unternehmen der Zukunft, 2010, 1, S. 34–35
- [RAKO07] Rakowsky, U. K.: Fundamentals of the Dempster-Shafer Theory and its applications to reliability modeling. In: International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2007, Vol. 14, No. 6 (2007), S. 579–601

- [REFA90] REFA Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.: Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. (Reihe: Methodenlehre der Betriebsorganisation / REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation). 2. Aufl. München: Hanser, 1990
- [REIM22] Reim, J.: Szenario-Technik und Szenario-Rechnung. In: Reim, J. (Hrsg.): Erfolgsrechnung - Wertsteigerung durch Wertschöpfung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 585–595
- [REIN96] Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement. Ein Kurs für Studium und Praxis. (Reihe: Springer eBook Collection Business and Economics) Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996
- [RENN12] Renner, T.: Performance Management im Produktionsanlauf. Dissertation RWTH Aachen University, 2012
- [REY20] Rey, J.: Methodik zur hochiterativen Gestaltung von Fertigungsprozessfolgen. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2020
- [RISS03] Risse, J.: Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie. Dissertation Technische Universität Berlin Berlin, 2003
- [RODE13] Roderburg, A.: Methodik zur Entwicklung von hybriden Fertigungstechnologien. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2013
- [RÜST07] Rüstig, A.: Einfluss von standortspezifischen Faktoren auf den Produktionsanlauf am Beispiel der Kfz-Zulieferindustrie. Dissertation Technische Universität Darmstadt Darmstadt, 2007
- [SALO93] Salomons, O. W.; van Houten, F.; Kals, H.: Review of research in feature-based design. In: Journal of Manufacturing Systems. 12. Jg., 1993, 2, S. 113–132
- [SAND14] Sandhaus, G.; Berg, B.; Knott, P.: Hybride Softwareentwicklung. Das Beste Aus Klassischen und Agilen Methoden in Einem Modell Vereint. (Reihe: Xpert. press Ser) Berlin, Heidelberg: Vieweg, 2014
- [SCHI18] Schiefer, H.; Schiefer, F.: Statistik für Ingenieure. Wiesbaden: Springer, 2018
- [SCHL16] Schloske, A.: Besondere Merkmale - Systematisch ermitteln und durchgängig behandeln (engl. Special characteristics - Systematic identification and consistent treatment). Vortrag Fraunhofer IPA, 2016
- [SCHM10] Schmitt, R.; Schuh, G.; Gartzel, T.; Schmitt, S.: Das Aachener Modell zum interdisziplinären Anlaufmanagement \*. In: wt Werkstattstechnik online. 100. Jg., 2010, 4, S. 317–322
- [SCHM15] Schmitt, R.; Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement. Strategien - Methoden - Techniken. (Reihe: Hanser eLibrary). 5., aktualisierte Auflage München: Hanser, 2015

- [SCHN11] Schneider, G.: Die Monte Carlo Simulation. Was ist darunter zu verstehen, welche Instrumente für die Anwendung werden benötigt und der Stellenwert verdeutlicht anhand eines Beispiels. München: GRIN, 2011
- [SCHN15] Schneider, S.: Agile Prozessplanung im Produktentstehungsprozess am Beispiel der Motorenproduktion. Dissertation Technische Universität Dortmund, 2015
- [SCHÖ06] Schöning, S.: Potenzialbasierte Bewertung neuer Technologien. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2006
- [SCHÖ18] Schönherr, R. O. M.: Entwicklung eines Konzeptes zur selbstlernenden Fehlervermeidung automatisierter Montagesysteme im Anlauf der Fahrzeugproduktion. Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2018
- [SCHR45] Schrutka von Rechtenstamm, L. W.: Leitfaden der Interpolation. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 1945
- [SCHU05] Schuh, G.; Kampker, A.; Frazkoch, B.: Anlaufmanagement. Kosten senken - Anlaufzeit verkürzen - Qualität sichern. In: wt Werkstattstechnik online. 95. Jg., 2005, 5, S. 405–409
- [SCHU11a] Schuh, G.; Klappert, S.; Orilski Simon: Technologieplanung. In: Schuh, G. (Hrsg.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. (Reihe: VDI-Buch) 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 171–222
- [SCHU11b] Schuh, G.; Klappert, S.; Mol, T.: Ordnungsrahmen Technologiemanagement. In: Schuh, G. (Hrsg.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. (Reihe: VDI-Buch) 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 11–32
- [SCHU11c] Schuh, G.; Klappert, S.; Schubert, J.; Nollau, S.: Grundlagen zum Technologiemanagement. In: Schuh, G. (Hrsg.): Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. (Reihe: VDI-Buch) 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, S. 33–54
- [SCHU12] Schuh, G.; Müller, J.; Rauhut, M.: Gestaltung von Produktentwicklungsprozessen. In: Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 161–247
- [SCHU14] Schuh, G.; Schmidt, C.: Grundlagen des Produktionsmanagements. In: Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement. (Reihe: VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 1–62

- [SCHU16a] Schuh, G.; Rudolf, S.; Riesener, M.; Kantelberg, J. Application of Highly-Iterative Product Development in Automotive and Manufacturing Industry. ISPIIM Innovation Symposium. Manchester, March 2016, 2016, S. 1–13
- [SCHU16b] Schuh, G.; Gartzten, T.; Basse, F.; Schrey, E.: Enabling Radical Innovation through Highly Iterative Product Expedition in Ramp up and Demonstration Factories. In: *Procedia CIRP*. 41. Jg., 2016, S. 620–625
- [SCHU16c] Schuh, G.; Lau, F.; Schroder, S.; Wetterney, T. Next generation hardware development: The role of technology intelligence to reduce uncertainty in Agile new Product Development. 2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET). Honolulu, HI, USA, 04.09.2016 - 08.09.2016: IEEE, 04.09.2016 - 08.09.2016, S. 2573–2582
- [SCHU17] Schuh, G.; Gartzten, T.; Soucy-Bouchard, S.; Basse, F.: Enabling Agility in Product Development through an Adaptive Engineering Change Management. In: *Procedia CIRP*. 63. Jg., 2017, S. 342–347
- [SCHU19] Schuh, G.; Prote, J.-P.; Gützlaff, A.; Cremer, S.; Schmitz, S.: Process Mining im Prototypenbau. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 114. Jg., 2019, 11, S. 707–710
- [SCHW07] Schwaber, K.: *Agiles Projektmanagement mit Scrum*. Unterschleißheim: Microsoft Press, 2007
- [SENT02] SENTZ, K.; FERSON, S. *Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory*, 2002
- [SHAF76] Shafer, G.: *A mathematical theory of evidence*. New Jersey: Princeton University Press, 1976
- [SLAM11] Slamanig, M.: *Produktwechsel als Problem im Konzept der Mass Customization. Theoretische Überlegungen und empirische Befunde-Zugl.: Klagenfurt, Univ., Diss., 2010. (Reihe: Gabler Research)*. 1. Aufl. Wiesbaden, 2011
- [SOMM15] Sommer, A. F.; Hedegaard, C.; Dukovska-Popovska, I.; Steger-Jensen, K.: Improved Product Development Performance through Agile/Stage-Gate Hybrids: The Next-Generation Stage-Gate Process? In: *Research-Technology Management*. 58. Jg., 2015, 1, S. 34–45
- [SPRI13] Springer Fachmedien Wiesbaden (Hrsg.). *Kompakt-Lexikon Wirtschaftspolitik. 3.200 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden* Wiesbaden, 2013: Springer Gabler
- [STAC73] Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. 1. Auflage Wien: Springer, 1973

- [STAD16] Stadler, M.: Optimierung von Anlaufmanagement und Entwicklungsprozessen. Dissertation Hamburg, 2016
- [STAP97] Stapleton, J.: DSDM, dynamic systems development method. The method in practice. Reprint Harlow: Addison-Wesley, 1997
- [STAU17] Stauder, J.: Anlauforientierte Gestaltung von Fertigungssystemen. Dissertation Aachen, 2017
- [STEI18] Steinhäuser, T.: Methode zur Reifebewertung und Priorisierung von Aufgaben in der Serienreifebung komplexer Produkte. Dissertation Technische Universität München München, 2018
- [STIC07] Stich, C.: Der Serienanlauf als Planungsumfeld. In: Stich, C. (Hrsg.): Produktionsplanung in der Automobilindustrie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2007, S. 5–25
- [TERM14] Termer, F.; Nissen, V.: Zum Begriff der Agilität - Betrachtungen und Implikationen aus etymologischer Perspektive. (Reihe: Ilmenauer Beiträge zur Wirtschaftsinformatik, Bd. 2014,4) Ilmenau: Techn. Univ. Inst. für Wirtschaftsinformatik, 2014
- [TERW01] Terwiesch, C.; Bohn, R.; Chea, K.: International product transfer and production ramp-up: a case study from the data storage industry. In: R&D Management. 31. Jg., 2001, 4, S. 435–451
- [TIET20] Tietjen, T.; Decker, A.: FMEA-Praxis. Einstieg in die Risikoabschätzung von Produkten, Prozessen und Systemen. (Reihe: Hanser eLibrary). 4., überarbeitete Auflage München: Hanser, 2020
- [TRÖG18] Tröger, P.: Unsicherheit und Uneindeutigkeit in Verlässlichkeitsmodellen. (Reihe: SpringerLink Bücher) Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018
- [TROM01] Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2001
- [TSCH98] Tschirky, H.; Koruna, S.: Konzept und Aufgaben des integrierten Technologie-Managements. In: Tschirky, H.; Koruna, S. (Hrsg.): Technologie-Management. Idee und Praxis. (Reihe: Technology, innovation and management). Zürich: Orell Füssli Verl. Industrielle Organisation, 1998, S. 193–394
- [TÜCK10] Tücks, G.: Ramp-Up Management in der Automobilindustrie. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2010
- [ULRI01] Ulrich, H.: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Ulrich, H.; Schwaninger, M. (Hrsg.): Systemorientiertes Management. Studienausg. Bern: Haupt, 2001, S. 167–201

- [ULRI76a] Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). In: WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium. 5. Jg., 1976, Nr. 8, S. 345–350
- [ULRI76b] Ulrich, H.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). In: WiSt Wirtschaftswissenschaftliches Studium. 5. Jg., 1976, Nr. 7, S. 304–309
- [UNGE11] Unger, D.; Eppinger, S.: Improving product development process design: a method for managing information flows, risks, and iterations. In: Journal of Engineering Design. 22. Jg., 2011, 10, S. 689–699
- [VDI00] VDI 3780 (September 2000). Technikbewertung Begriffe und Grundlagen.
- [VDI17] VDI 4520 (2017). Produktmanagement.
- [VDI19] VDI 2221 Blatt 1 (2019). Entwicklung technischer Produkte und Systeme.
- [VDI90] VDI 2234 (1990). Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur.
- [VERB20] Verband der Automobilindustrie (VDA); Qualitäts-Management-Center (QMC): Prozessbeschreibung Besondere Merkmale (BM). (Bd. VDA-Band 1 „Dokumentierte Information und Aufbewahrung“). 2. aktualisierte Auflage, 2020
- [WANG98] Wangenheim, S.: Planung und Steuerung des Serienanlaufs komplexer Produkte. Dargestellt am Beispiel der Automobilindustrie Dissertation Universität Stuttgart, 1998
- [WEHK20] Wehking, K.-H.: Technisches Handbuch Logistik 1. Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik. Berlin: Springer, 2020
- [WERD12] Werdich, M.: Methodik Grundlagen. In: Werdich, M. (Hrsg.): FMEA - Einführung und Moderation. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012, S. 21–77
- [WEST06] Westkämper, E.; Decker, M.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [WIEN02] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme. In: wt Werkstattstechnik online. 92. Jg., 2002, 11/12, S. 650–655
- [WILD21] Wildemann, H.: Anlaufmanagement. Leitfaden zur Verkürzung der Hochlaufzeit und Optimierung der An- und Auslaufphase von Produkten, Anlagen und Dienstleistungen. (Reihe: Leitfaden / TCW, Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management, Bd. 76). 20. Auflage München: TCW-Verlag, 2021

- [WINK07] Winkler, H.: Modellierung vernetzter Wirkbeziehungen im Produktionsanlauf. Dissertation Hannover, 2007
- [YAGE87] Yager, R. R.: On the dempster-shafer framework and new combination rules. In: Information Sciences. 41. Jg., 1987, 2, S. 93–137
- [YAMA89] Yamanouchi, T.: Breakthrough. The development of the Canon personal copier. In: Long Range Planning. 22. Jg., 1989, 5, S. 11–21
- [YOON95] Yoon, K.; Hwang, C. L.: Multiple attribute decision making. An introduction. (Reihe: Sage university papers series. Quantitative applications in the social sciences, Bd. no. 07-104) Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc, 1995
- [ZANG14] Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. 5. Auflage 2014 (erweitert) Winnemark: Zangemeister & Partner, 2014
- [ZEUG98] Zeugträger, K.: Anlaufmanagement für Großanlagen. Dissertation Universität Hannover Hannover, 1998



## A.2 Simulationsergebnisse

### Simulation Results

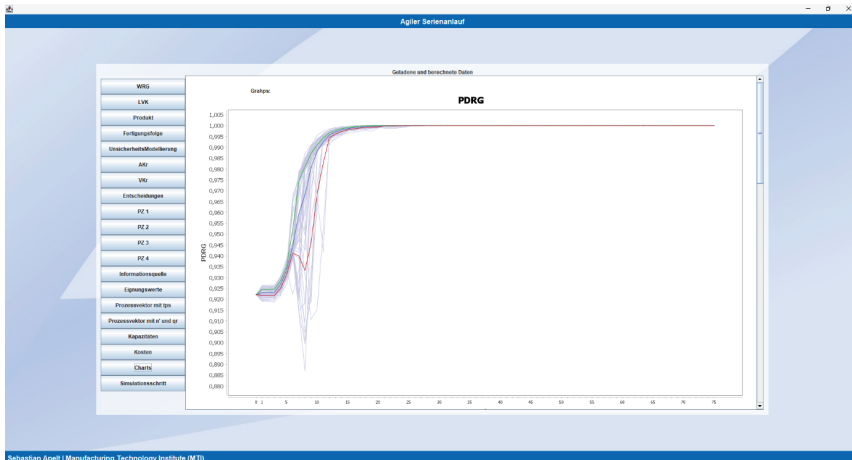


Abbildung A 2 Unsicherheitsbehaftete Anlaufkurve – Produktreifegrad  
*Uncertainty Related Ramp-up Curve – Product Maturity*

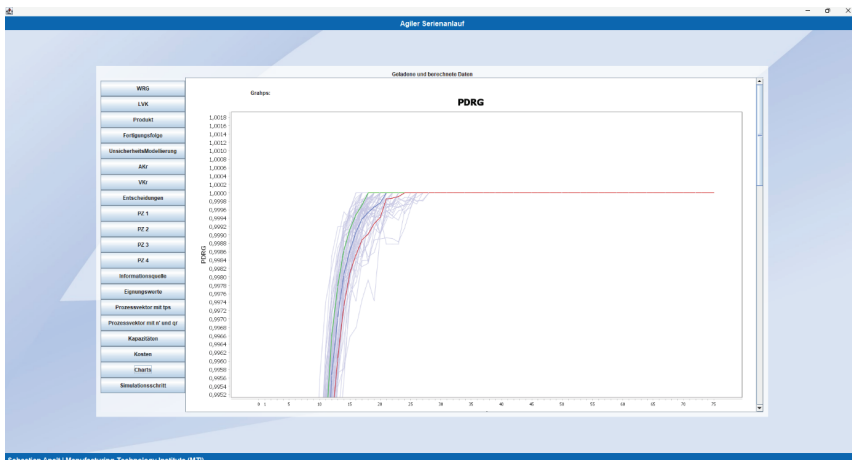


Abbildung A 3 Unsicherheitsbehaftete Anlaufkurve – Produktreifegrad Zoom  
*Uncertainty Related Ramp-up Curve – Product Maturity Zoom*

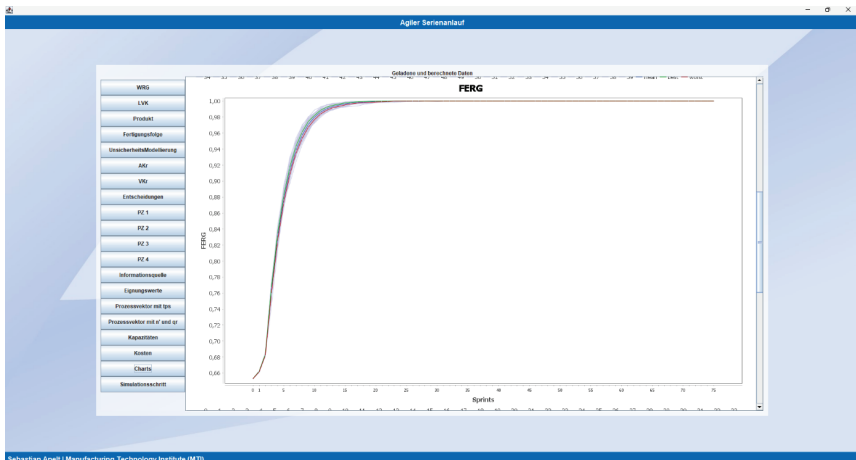


Abbildung A 4 Unsicherheitsbehaftete Anlaufkurve – Fertigungsreifegrad  
*Uncertainty Related Ramp-up Curve – Manufacturing Maturity*

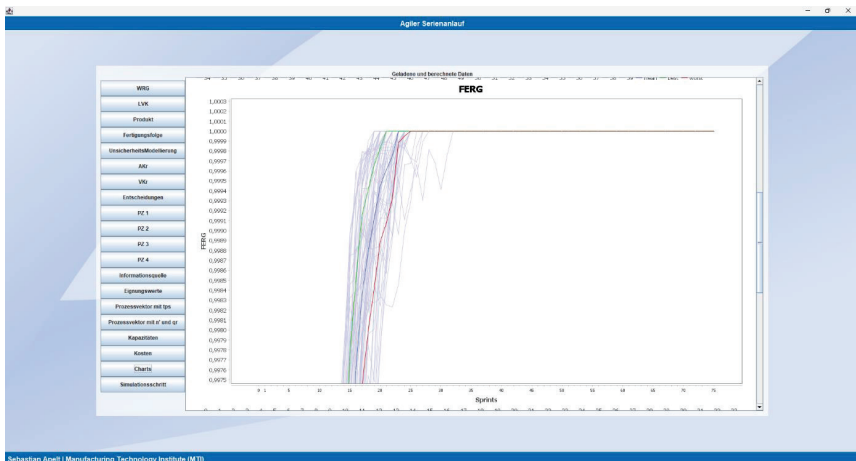


Abbildung A 5 Unsicherheitsbehaftete Anlaufkurve – Fertigungsreifegrad Zoom  
*Uncertainty Related Ramp-up Curve – Manufacturing Maturity Zoom*

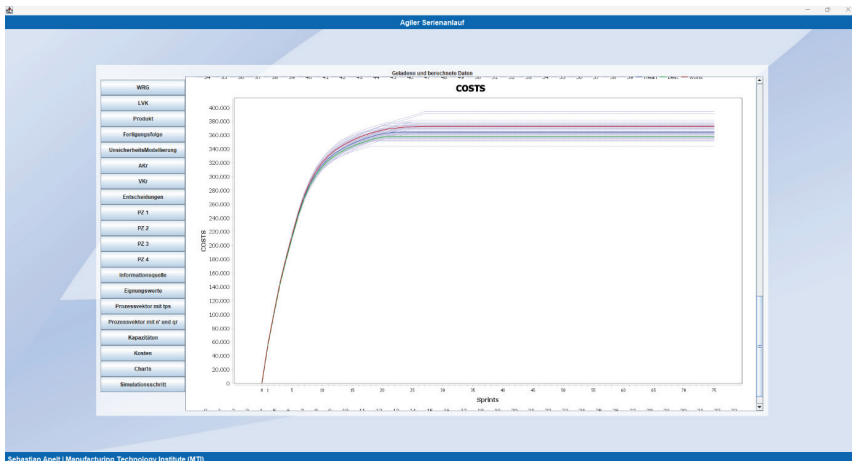


Abbildung A 6 Unsicherheitsbehaftete Anlaufkostenkurve  
*Uncertainty Related Ramp-up Cost Curve*

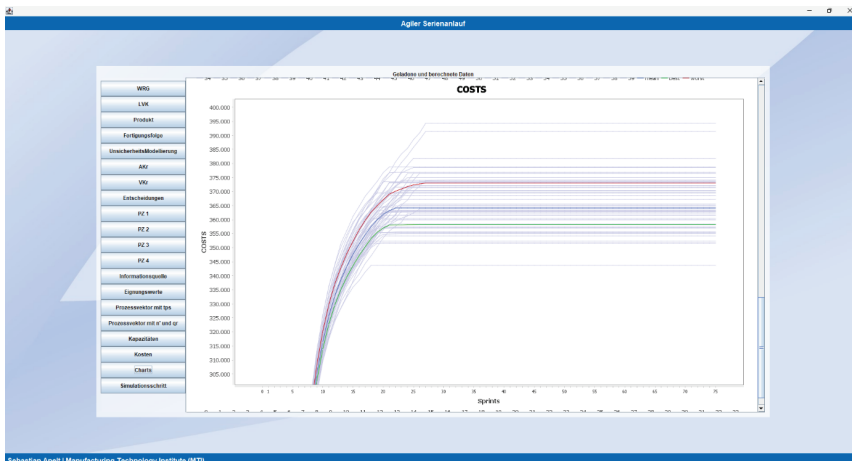


Abbildung A 7 Unsicherheitsbehaftete Anlaufkostenkurve Zoom  
*Uncertainty Related Ramp-up Cost Curve Zoom*

### A.3 Validierung anhand von Kapazitätsszenarien

Validation Based on Capacity Scenarios

**Vergleichsgrundlage**

**Fallbeispiel**

Anzahl: 30  
 K/KAPA: 0,5  
 $KAP_{max}^s$ : 200 h

**Anpassung**

$KAP_{max}^s$  : 80 h ↓

**Erwarteter Effekt**

Dauer ↑  
 In einem Sprint können weniger Defizite gleichzeitig adressiert werden

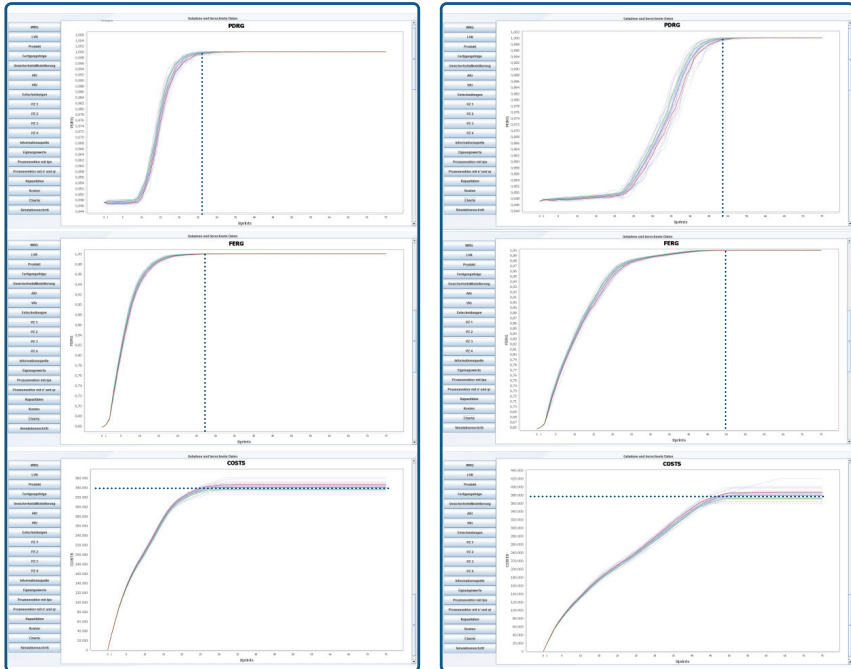


Abbildung A 8 Validierung der Auswirkungen geringerer Kapazitäten auf das Simulationsergebnis

Validation of the Effects of Lower Capacities on the Simulation Result

Vergleichsgrundlage	Anpassung	Erwarteter Effekt
<b>Fallbeispiel</b> Anzahl: 30 K/KAPA: 0,5 $KAP_{max}^S$ : 200 h	$KAP_{max}^S$ : 480 h ↑	Dauer ↓ In einem Sprint können mehr Defizite gleichzeitig adressiert werden

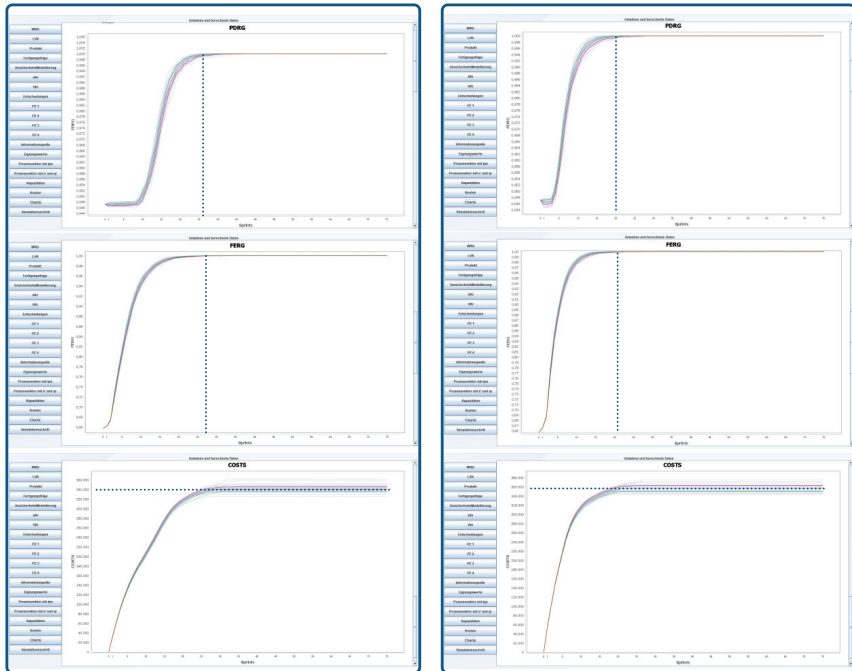


Abbildung A 9 Validierung der Auswirkungen höherer Kapazitäten auf das Simulationsergebnis

Validation of the effects of Higher Capacities on the Simulation Result

# B Lebenslauf

## *Curriculum Vitae*

### **Persönliche Angaben**

Apelt, Sebastian  
Geboren: 02.02.1990  
in Hückeswagen, Germany

### **Berufstätigkeit**

#### **RWTH Aachen University**

2022 – 2023 Referent Profilbereich Production Engineering ProdE  
2018 – 2023 Wissenschaftlicher Mitarbeiter Werkzeugmaschinenlabor WZL  
(heute Manufacturing Technology Institute MTI) | Abteilung  
Technologiemanagement in der Fertigung | Gruppe Nachhaltige  
Fertigung  
2012 Industriemechaniker, OTTO FUCHS KG, Meinerzhagen

### **Studentische Anstellungen**

2017 – 2018 Werkzeugmaschinenlabor WZL, RWTH Aachen University  
2017 Werksstudent Fertigungsplanung, OTTO FUCHS KG, Meinerzhagen  
2014 – 2016 Institut für Konstruktionstechnik IKT, RWTH Aachen University

### **Berufsausbildung**

#### **OTTO FUCHS KG, Meinerzhagen**

2009 – 2012 Berufsausbildung zum Mechatroniker

### **Hochschulstudium**

#### **RWTH Aachen University**

2016 – 2018 Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau, Vertiefungsbereich Produktionstechnik  
2012 – 2016 Bachelorstudium Wirtschaftsingenieurwesen Fachrichtung Maschinenbau, Vertiefungsbereich Kunststofftechnik

### **Schulbildung**

2006 – 2009 Allgemeine Hochschulreife, Eugen-Schmalenbach Berufskolleg, Halver (Ostendorf)  
2009 – 2012 Berufsausbildungsbegleitende Schule, Berufskolleg für Technik BKT, Lüdenscheid

### **Praktikum**

2015 Wirtschaftliches Praktikum, Daimler AG, Düsseldorf

