

Steffen Schrock

## **Entwicklung einer Methode zur Nutzung additiv gefertigter Spritzgussformeinsätze für die effiziente Validierung im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung**

Development of a method for the use of  
additive manufactured injection mould inserts  
for the efficient validation in the model of  
SGE – System Generation Engineering

Band 191

Systeme ▪ Methoden ▪ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen  
(Hrsg.)





## Steffen Schrock

# Entwicklung einer Methode zur Nutzung additiv gefertigter Spritzgussformteile für die effiziente Validierung im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung

## Development of a method for the use of additive manufactured injection mould inserts for the efficient validation in the model of SGE – System Generation Engineering

Band 191

Herausgeber Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright      IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2025  
                  Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
                  Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft  
                  Alle Rechte vorbehalten

ISSN      1615-8113

# **Entwicklung einer Methode zur Nutzung additiv gefertigter Spritzgussformteile für die effiziente Validierung im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)**  
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

## **DISSERTATION**

von

M.Eng. Steffen Schrock

Tag der mündlichen Prüfung: 17.07.2025

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Junk



## Vorwort der Herausgeber

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe\* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplett Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung, um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren.

Albert Albers und Sven Matthiesen

\* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)



## Vorwort zu Band 191

Die Entwicklung bis hin zur Herstellung neuer Produkte oder Systeme, welche die Bedürfnisse von Kunden, Anwendern und Gesellschaft durch entsprechende Funktionalität und technische Lösungen erfüllen, ist die Kernaufgabe des sogenannten Produktentstehungsprozess. Dieser setzt sich zusammen aus den Elementen *Strategische Produktplanung*, *Produktentwicklung* und *Produktionssystementwicklung*, bis hin zur Produktion. Der Prozess ist gekennzeichnet von einem dauernden Wechsel zwischen Synthese- und Analysephasen. In der Synthese generieren die Entwickelnden Lösungsideen und konkretisieren diese durch eine entsprechende Gestaltung, während in der Analysephase die Syntheseobjekte durch ein gezieltes virtuelles, physisches oder gemischtes Testing bezüglich des Erfüllungsgrades der, in dem Zielsystem der jeweiligen Produktgeneration festgelegten, Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen beurteilt werden. Dabei ist es wichtig – insbesondere in der heutigen Zeit mit den verkürzten Marktzyklen – auch die Synthese-Analyse-Zyklen in der Produktentwicklung zu verkürzen. Dies gelingt, indem man das u. a. in der *Karlsruher Schule für Produktentwicklung – KaSPro* seit vielen Jahren erforschte kontinuierliche und frühe Prototyping im Kontext der Validierung einsetzt. Kontinuierliche Validierung kann durch virtuelle Modelle, physische Modelle oder die Kombination von beiden in entsprechenden Validierungsumgebungen erfolgen. Hierbei spielt die *Frühe Phase*, also die Überprüfung der frühen ersten Syntheseergebnisse aus der Gestaltung, eine wichtige Rolle. In dieser Phase ist es aber oft schwierig, physische Prototypen bereits in der entsprechenden Qualität zu haben. Der hier zunächst allgemein beschriebene Prozess gilt ebenso für die Entwicklung von Kunststoffbauteilen, die mit verschiedenen Verfahren gefertigt werden, wobei das Spritzgießen das am häufigsten eingesetzte Verfahren darstellt. Trotz aller Möglichkeiten der Simulation ist eine frühe Verfügbarkeit von entsprechenden physischen Prototypen von großer Bedeutung, da nur so gewisse Aspekte überhaupt sinnvoll untersucht werden können. Die Möglichkeiten im Prototyping haben sich in den letzten Jahren durch das Aufkommen von 3D-Drucktechnologien in der Anwendung des Rapid Prototyping deutlich erweitert. Dabei stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Schon seit vielen Jahren etabliert ist das 3D-Drucken von Kunststoffbauteilen. Damit können auch frühe Validierungen durchgeführt werden. Allerdings entsprechen sie in vielen Bereichen in ihren Eigenschaften nicht den späteren realen Elementen. Der nun zusätzlich mehr und mehr in die Anwendung kommende Druck von metallischen Bauteilen erweitert die Potenziale erheblich. So können Bauteile, die im Design als Guss- oder Schmiedebau- teile gestaltet sind, bereits für die frühe Prototypphase auch als metallisch gedruckte Bauteile realisiert werden, um erste Validierungsergebnisse zu gewinnen. Neben dem direkten Prototyping mittels 3D-Druck gibt es mit dem sogenannten *Additive Tooling* eine weitere Anwendungsmöglichkeit: die direkte Erstellung von Prototypwerkzeugen. Dabei lassen sich sowohl metallische Werkzeuge als auch solche aus Kunststoff additiv herstellen um so bereits in der frühen Phase der Produktentwicklung spritzgegossene Bauteile in seriennaher Form realisieren zu können.

Diesen Aspekt systematisch zu untersuchen, die Potenziale zu ermitteln, aber auch die Grenzen aufzuzeigen, hat sich Herr Dr.-Ing Steffen Schrock in der vorgelegten wissenschaftlichen Arbeit zum Ziel gesetzt. Er hat in seiner Arbeit das Potenzial des *Additive Tooling* im Kontext des Prototyping umfänglich untersucht und dabei sowohl einen Prozess zur Nutzung dieser Anwendung als auch diverse und für die Praxis geeignete Methoden und Werkzeuge erarbeitet. Die Arbeit überzeugt auch durch die strukturierte Überprüfung des Nutzens der definierten Methoden und Prozesse. Herr Dr.-Ing. Steffen Schrock hat mit der vorgelegten Arbeit einen wichtigen wissenschaftlichen Beitrag zum weiteren Ausbau der *Karlsruher Schule für Produktentwicklung – KaSPro* im Kontext der Aktivität Validierung geleistet und gleichzeitig relevante Lösungen für die Unternehmenspraxis vorgelegt. Die wissenschaftliche Arbeit ist in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Junk von der Hochschule Offenburg und u.a. der Nutzung deren Labors Rapid Prototyping entstanden. Sie zeigt damit auch, welche Mehrwerte durch eine solche pragmatische Kooperation in konkreten wissenschaftlichen Fragestellungen zwischen Hochschulen erreicht werden können.

September, 2025

Albert Albers

## Kurzfassung

Die Produktvalidierung ist die zentrale Aktivität zur Wissensgenerierung während der Produktentwicklung. Bei der Entwicklung von Spritzgussprodukten stehen seriennahe Prototypen aufgrund der meist kostenintensiven Herstellung von Spritzgusswerkzeugen und der langen Durchlaufzeiten häufig erst spät im Entwicklungsprozess zur Verfügung. Das *Additive Tooling (AT)* bietet eine Möglichkeit, solche seriennahen Prototypen herzustellen. Aktuelle Studien zeigen, dass die Herstellung von Spritzgussprototypen mit AT im Vergleich zum konventionellen Werkzeugbau in manchen Fällen kostengünstiger und schneller sein kann. Der Validierungsprozess mit AT weist jedoch verschiedene Herausforderungen auf, die auf die spezifischen Eigenschaften von AT-Werkzeugen und auf mangelndes Wissen zurückzuführen sind. Darüber hinaus gibt es bisher keinen ganzheitlichen und systematischen Ansatz zur Unterstützung von Entwickelnden bei der Nutzung von AT zur Produktvalidierung.

In der vorliegenden Arbeit wird daher eine unterstützende Methode zur Nutzung von AT für die Validierung von Spritzgussprodukten erarbeitet. Zunächst werden relevante Grundlagen und Forschungsarbeiten zu den Themengebieten *Produktentwicklung* und *Produktvalidierung*, *Spritzgießen im Kontext der Produktentwicklung* sowie dem *Additive Tooling* aufgezeigt. Basierend auf dem Stand der Forschung, einer Marktstudie, einer technischen Vorstudie und einer Interviewstudie werden die Potenziale des AT für die Produktvalidierung, aber auch die Risiken und Anwendungshindernisse identifiziert. Darauf aufbauend werden der Unterstützungsbedarf und das Zielsystem für die zu entwickelnde Unterstützung konkretisiert.

Mit der *AT-Systematik* wird schließlich eine systematische Vorgehensweise zur Nutzung des AT in der Produktvalidierung vorgestellt. Die AT-Systematik gliedert den Validierungsprozess mit AT in die sechs Phasen *Konkretisierung der Validierungsziele*, *Prüfung der Validierungsumgebung*, *Aufbau der Validierungsumgebung*, *Nutzung der Validierungsumgebung*, *Auswertung und Interpretation der Ergebnisse*, sowie *Nachbereiten und Lernen*. Innerhalb dieser Phasen werden dem Anwender konkrete Aufgaben und Aktivitäten vorgeschlagen, sowie zusätzliche, phasen- und aktivitätenspezifische Methoden und Hilfsmittel zur Verfügung gestellt. Insbesondere für die AT-spezifische Unterstützung werden die *AT-Checkliste*, die *AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM)* und der *AT-Konstruktionskatalog* eingeführt.

Zur Evaluation der AT-Systematik erfolgt eine Bewertung des Erfolgsbeitrages, der Unterstützungsleistung und der Anwendbarkeit anhand von Anwendungsstudien und Interviews. Die erzielten Evaluationsergebnisse legen den Schluss nahe, dass die AT-Systematik den Einsatz von AT in der Entwicklung von Spritzgussprodukten sowie die Herstellung validierungsgeeigneter AT-Prototypen unterstützt und damit durch die Potenziale des AT zu einer effizienteren Produktvalidierung beiträgt.



## Abstract

Product validation is the central activity for generating knowledge during product development. In the development of injection molded products, prototypes with properties close to series production are often only available late in the development process due to the usually cost-intensive production of injection molds and the long lead times. *Additive tooling (AT)* offers the possibility of producing such near-series prototypes. Current studies show that the production of injection molding prototypes with AT can be more cost-effective and faster in some cases compared to conventional toolmaking. However, the validation process with AT presents various challenges due to the specific characteristics of AT molds and a lack of knowledge. In addition, there is no holistic and systematic approach to support developers in the use of AT for product validation.

Therefore, the purpose of this thesis is the development of a supporting method for the use of AT in the validation of injection molded products. First, relevant fundamentals and research work on the topics of *product development and product validation*, *injection molding in the context of product development*, and *Additive Tooling* are presented. The potential of AT for product validation, as well as the risks and barriers to its application, are identified based on the current state of research, a market study, a preliminary technical study, and an interview study. Based on this, the need for support and the system of objectives for the support to be developed are specified.

As a result, a systematic approach to the use of AT in product validation is presented in the form of the *Additive-Tooling-Design-Method (ATDM)*. The ATDM divides the validation process using AT into six phases: *Determine validation objectives, verify and choose validation technology, building the validation environment, using the validation environment, evaluating and interpreting the results, and follow-up and learning*. Within these phases, tangible tasks and activities are proposed to the user, and additional phase- and activity-specific methods and tools are provided. In particular, the *AT-Checklist*, the *AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM)*, and the *AT-Design-Catalog* are presented for AT-specific support.

Based on application studies and interviews, the ATDM is evaluated for its contribution to success, support performance and applicability. The evaluation results obtained suggest that the ATDM supports the use of AT in the development of injection molded products and the production of validatable AT prototypes, thus contributing to more efficient product validation through the potential of AT.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen eines kooperativen Promotionsverfahrens zwischen dem IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Hochschule Offenburg. An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, für die engagierte Betreuung meiner Arbeit, das mir entgegebrachte Vertrauen sowie die wertvollen wissenschaftlichen Gespräche, die immer wieder neue Impulse gaben und wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Junk herzlich für die Übernahme des Korreferats sowie für seine langjährige fachliche und persönliche Begleitung, die meine Entwicklung seit meiner Einstellung an der Hochschule Offenburg im Labor Rapid Prototyping entscheidend geprägt hat. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer für die Übernahme des Vorsitzes in der Promotionsprüfung danken.

Weiterhin danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen am IPEK, der Forschungsgruppe Entwicklungsmethodik und -management (EMM) sowie der Hochschule Offenburg für die vielen spannenden Diskussionen, Anregungen und die Möglichkeit, kontinuierlich Feedback zu meiner Forschung einzuholen. Mein Dank gilt auch allen studentischen Abschlussarbeitern und wissenschaftlichen Hilfskräften, die ich betreuen durfte und die einen großen Beitrag zu meiner Forschung geleistet haben. Zudem danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Braunform GmbH für die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung praktischer Versuche.

Ebenso danke ich der Hochschule für Technik (HFT) Stuttgart, welche im Zusammenwirken mit den staatlichen und landeskirchlichen Hochschulen für angewandte Wissenschaften (HAW) in Baden-Württemberg aus Fördermitteln des baden-württembergischen Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst die Finanzierung meiner Forschung in den ersten drei Jahren durch ein Promotionsstipendium ermöglichte.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Frau Nina und meiner Familie. Ihr habt mir nicht nur stets Verständnis entgegebracht und mir den Rückhalt für die Erstellung dieser Arbeit gegeben, sondern auch für viele schöne Momente während dieser Zeit gesorgt.

Gengenbach, September 2025

Steffen Schrock



„Alles Wissen und alles Vermehren unseres Wissens endet nicht mit einem  
Schlußpunkt, sondern mit einem Fragezeichen.“

-Hermann Hesse



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>xxi</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>xxiii</b>
<b>Formelzeichen.....</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Fokus der Arbeit.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit .....	5
<b>2 Grundlagen und Stand der Forschung.....</b>	<b>7</b>
2.1 Produktentwicklung und -validierung .....	7
2.1.1 Definition und Begriffsbestimmung .....	7
2.1.2 Modelle & Methoden der Produktentwicklung .....	11
2.1.3 Prozess der Validierung in der Produktentwicklung .....	22
2.1.4 Prototypen in der Produktvalidierung .....	27
2.1.5 Zwischenfazit.....	32
2.2 Spritzgießen im Kontext der Produktentwicklung.....	34
2.2.1 Definition und Begriffsbestimmung .....	34
2.2.2 Verfahrensgrundlagen: Spritzgießen .....	35
2.2.3 Entwicklungsablauf der Spritzgussproduktentwicklung .....	43
2.2.4 Zwischenfazit.....	50
2.3 Additive Tooling.....	52
2.3.1 Definition und Begriffsbestimmung .....	52
2.3.2 Verfahrensgrundlagen: Additive Manufacturing .....	54
2.3.3 AM-Verfahren und AM-Materialien für Additive Tooling .....	56
2.3.4 Relevante Forschungsergebnisse und Beispiele zu Additive Tooling.....	60
2.3.5 Zwischenfazit.....	75
<b>3 Forschungsbedarf und Zielsetzung .....</b>	<b>77</b>
3.1 Forschungsbedarf .....	77
3.2 Forschungziel .....	79

3.3	Forschungsthese und Forschungsfragen .....	82
<b>4</b>	<b>Vorgehensweise .....</b>	<b>83</b>
4.1	Einordnung in die Design Research Methodology .....	83
4.2	Angewandte empirische Methoden .....	87
4.2.1	Interview .....	87
4.2.2	Fragebogen .....	88
4.2.3	Fallstudie .....	88
4.2.4	Live-Lab Studie .....	89
4.2.5	Teilnehmende Beobachtung .....	90
4.3	Forschungsumgebung .....	91
<b>5</b>	<b>Vertiefende Untersuchung und Bewertung von Additive Tooling .....</b>	<b>93</b>
5.1	Markt- und Beschaffungsstudie .....	94
5.1.1	Studiendesign .....	95
5.1.2	Studienergebnisse .....	97
5.1.3	Zwischenfazit .....	101
5.2	Technische Vorstudie: „Zugprobenwerkzeug“ .....	101
5.2.1	Studiendesign & Versuchsaufbau .....	102
5.2.2	Studienergebnisse .....	104
5.2.3	Zwischenfazit .....	108
5.3	Interviewstudie 1 – Status quo und Unterstützungsbedarf .....	109
5.3.1	Interviewdesign .....	109
5.3.2	Studienergebnisse .....	110
5.3.3	Zwischenfazit .....	115
5.4	Potenziale und Hürden in der Anwendung von AT in der Produktentwicklung .....	116
5.4.1	Vor- und Nachteile, sowie Chancen und Risiken des AT .....	117
5.4.2	Zeit und Kosten bis zur Verfügbarkeit von Prototypen und Validierungsergebnissen .....	118
5.4.3	Verhältnis von Aufwand zu Wiedergabetreue .....	120
5.4.4	Hürden in der Anwendung von AT .....	122
5.5	Fazit zu Kapitel 5 .....	124
<b>6</b>	<b>Unterstützung in der Anwendung von Additive Tooling zur Validierung</b>	<b>127</b>
6.1	Zielsystem zur Unterstützung von Additive Tooling .....	128
6.1.1	Handlungsfelder .....	128
6.1.2	Zielsystemelemente .....	130
6.2	Beschreibung der AT-Systematik .....	135
6.2.1	Anwendungsbereich der AT-Systematik in der integrierten Produktentwicklung .....	138

6.2.2	Phase 1: Konkretisierung der Validierungsziele .....	140
6.2.3	Phase 2: Prüfung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung 143	
6.2.4	Phase 3: Aufbau der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung 152	
6.2.5	Phase 4: Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung 154	
6.2.6	Phase 5: Auswertung und Interpretation der Ergebnisse .....	155
6.2.7	Phase 6: Nachbereiten und Lernen .....	156
6.3	Support innerhalb der AT-Systematik .....	157
6.3.1	AT-Checkliste .....	158
6.3.2	Konstruktions- und Anwendungsunterstützung.....	160
6.4	Support-Evaluation anhand Fallstudie A: „Besteck-Set“ .....	168
6.4.1	Studiendesign.....	168
6.4.2	Studienergebnisse.....	169
6.5	Fazit zu Kapitel 6 .....	171
<b>7</b>	<b>Evaluation.....</b>	<b>175</b>
7.1	Übersicht zu Evaluationsstudien.....	176
7.2	Fallstudien B bis D: „Eiskratzer“, „Karabiner“ und „Tesla-Ventil“ .....	178
7.2.1	Studiendesign.....	178
7.2.2	Studiendurchführung und Arbeitsergebnisse .....	181
7.2.3	Studienergebnisse .....	191
7.3	Fallstudie E: „Benchmark-Bauteil“ und Interviewstudie 2 .....	196
7.3.1	Studiendesign .....	196
7.3.2	Studiendurchführung und Arbeitsergebnisse .....	197
7.3.3	Studienergebnisse .....	203
7.4	Interviewstudie 3 - Methodenevaluation .....	206
7.4.1	Studiendesign .....	206
7.4.2	Studienergebnisse .....	207
7.5	Fazit zu Kapitel 7 .....	214
<b>8</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>219</b>
8.1	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	219
8.2	Ausblick und weiterführende Forschung .....	228
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>I</b>	
<b>Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Arbeit entstanden sind .....</b>	<b>XVI</b>	
<b>Glossar .....</b>	<b>XVII</b>	
<b>Anhang A – Produktprofil-Schema.....</b>	<b>XXI</b>	

<b>Anhang B – Daten zur Forschungsumgebung.....</b>	<b>XXIII</b>
B1 – 3D-Drucker: Stratasys J750 .....	XXIII
B2 – Werkzeug-Stammform .....	XXIV
<b>Anhang C – Markt- und Beschaffungsstudie .....</b>	<b>XXV</b>
<b>Anhang D – Technische Vorstudie .....</b>	<b>XXVII</b>
D1 – Daten und Parameter der technischen Vorstudie „Zugprobe“ .....	XXVII
D2 – Versuchsaufbau.....	XXVIII
D3 – Versuchsauswertung .....	XXIX
D4 – Prozess-Modell der Vorstudie „Zugprobe“ .....	XXXIII
D5 – Zugversuch-Prüfprotokoll: ABS, AT-Formeinsatz.....	XXXIV
D6 – Zugversuch-Prüfprotokoll: ABS, Stahl-Formeinsatz.....	XXXV
D7 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PP, AT-Formeinsatz.....	XXXVI
D8 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PP, Stahl-Formeinsatz .....	XXXVII
D9 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PBT, AT-Formeinsatz.....	XXXVIII
D10 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PBT, Stahl-Formeinsatz .....	XXXIX
<b>Anhang E – Umfragen und Interviews der DS-I und PS .....</b>	<b>XLI</b>
E1 – Interviewstudie 1: Interview-Leitfaden .....	XLI
E2 – Studien zu Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U).....	XLIV
<b>Anhang F – Präskriptive Studie und AT-Systematik .....</b>	<b>XLVII</b>
F1 – Phasenmodell der AT-Systematik inklusive Leitfragen, Aktivitäten des Referenzprozesses und Methodenempfehlungen .....	XLVII
F2 – Aufbau und Struktur der Literatur-Datenbank.....	L
F3 – AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM).....	LIII
F4 – AT-Konstruktionskatalog .....	LVI
F5 – Support-Evaluation anhand Fallstudie A .....	CXI
<b>Anhang G – Fallstudien B, C &amp; D .....</b>	<b>CXV</b>
G1 – Fragebogen 1: Selbsteinschätzung .....	CXV
G2 – Fragebogen 2: Bewertung der AT-Systematik .....	CXVIII
G3 – Strukturmechanische Simulation .....	CXXV
G4 – Fertigungsparameter der Fallstudien B bis D.....	CXXVI
G5 – Entwicklungsgenerationen „Eiskratzer“ .....	CXXVII
G6 – Kalkulation zu den Fallstudien B bis D .....	CXXVIII
<b>Anhang H – Fallstudie E .....</b>	<b>CXXXI</b>
<b>Anhang I – Interviewstudie 3 .....</b>	<b>CXXXIII</b>
I1 – Experteninterview Nr. 3: Fragebogen .....	CXXXIII
I2 – Experteninterview Nr. 3: Expertenpanel .....	CXXXVI

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Beispiel zur Anwendung additiv gefertigter Spritzgussformemeinsätze zur Herstellung von Spritzgussprototypen (siehe Fallstudie B, S. 178) .....	2
Abbildung 1.2:	Thema und fokussierte Forschungsfelder der vorliegenden Arbeit in Form eines ARC-Diagramms (Areas of relevance and contribution) nach Blessing und Chakrabarti (2009, S. 64–66) ..	4
Abbildung 1.3:	Aufbau dieser Arbeit nach Kapitel .....	5
Abbildung 2.1:	Elemente einer Innovation nach Albers und Heimicke et al. (2018) zitiert nach Albers et al. (2020, S. 4) .....	8
Abbildung 2.2:	Produktlebenszyklus in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 25.....	9
Abbildung 2.3:	Das erweiterte ZHO-Modell (Albers, Behrendt, Schroeter, Ott & Klingler, 2013, S. 393, zitiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 544) .....	11
Abbildung 2.4:	Darstellungsarten von Abläufen (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 29).....	12
Abbildung 2.5:	Vereinfachte Darstellung der drei Variationsarten ÜV, PV und AV im Modell der SGE am Beispiel der Entwicklung eines Rauchwarnmeldesystems (Albers & Rapp, 2022, S. 31) .....	15
Abbildung 2.6:	Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE bzw. SGE (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 29).....	16
Abbildung 2.7:	Das integrierte Produktentstehungsmodell - iPeM (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016) .....	18
Abbildung 2.8:	Einordnung verschiedener Problemlösemethoden nach Einsatzbereich und Detaillierungsgrad (in Anlehnung an Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016) .....	20
Abbildung 2.9:	Der Problemlösungsprozess SPALTEN (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016).....	21
Abbildung 2.10:	Validierung und Design im Produktentstehungsprozess (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 545).....	22
Abbildung 2.11:	Kritikalitätsmatrix nach Albers et al. (2014, zitiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 552).....	23

Abbildung 2.12:	Darstellung der Zusammenhänge von Test, Testfall, Testumgebung und Testinterpretation (in Anlehnung an Albers, Behrendt et al., 2016, S. 555) .....	25
Abbildung 2.13:	SPALTEN-Prozess zur Auswahl und Anwendung von Validierungsmethoden (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 550) .....	26
Abbildung 2.14:	Einordnung von Prototypen anhand der Aufgabenkomplexität (in Anlehnung an Schmidt et al., 2017, S. 541) .....	30
Abbildung 2.15:	Das Filter-Fidelity-Modell (FFM) zum Vergleich von Prototypen nach Hochreuter et al. (2013, S. 178) .....	31
Abbildung 2.16:	Unterteilung der Kunststoffe (Bonten, 2020, S. 36) .....	36
Abbildung 2.17:	Übersicht und Einteilung amorpher und teilkristalliner Thermoplaste (Jaroschek, 2018, S. 9) .....	38
Abbildung 2.18:	Schema zur Auswahl geeigneter Thermoplaste (Bonten, 2020, S. 389) .....	39
Abbildung 2.19:	Wesentliche Abläufe des Spritzgießens (Bonten, 2020, S. 291) .....	40
Abbildung 2.20:	Fehleranalyse mittels Ursache-Wirkungsdiagramm zur Unterstützung der Abmusterungsphase (Schötz, 2013, S. 165) .....	41
Abbildung 2.21:	Funktionselemente eines beispielhaften Normalwerkzeugs (Bonten, 2020, S. 297) .....	42
Abbildung 2.22:	Klassisch sequenzielles (links) und integratives, iteratives (rechts) Vorgehen zur Entwicklung von Spritzgussprodukten und Spritzgusswerkzeugen (Schuh et al., 2018) .....	44
Abbildung 2.23:	Wichtige Konstruktionsregeln und -tipps, veranschaulicht am Beispiel des „Polyman“ (Ritter, 2017, zitiert nach VDWF, 2023) .....	47
Abbildung 2.24:	Phasen der Werkzeugerstellung (in Anlehnung an Lichius & Schmidt, 1986, zitiert nach Mitterlehner, 2020, S. 27, sowie in Anlehnung an Bonten, 2020, S. 298) .....	48
Abbildung 2.25:	Zusammenfassende Darstellung eines Konstruktionsalgorithmus für Spritzgusswerkzeuge aus Hopmann et al. (2018, S. 99), der die Wechselwirkungen zwischen Werkzeugfunktionen verdeutlicht. ....	49
Abbildung 2.26:	Klassifizierung verschiedener Anwendungen von AM und Abgrenzung von direktem und indirektem Tooling (in Anlehnung an Gebhardt, Kessler & Thurn, 2019, S. 22) .....	53

Abbildung 2.27:	Beispielhafte Systemanordnung bestehend aus 3D-Druck-Software, 3D-Drucker und Stammwerkzeug mit AT-Formeinsätzen zur Herstellung von AT-Prototypen (formlabs, 2023).....	54
Abbildung 2.28:	Einfluss der Bauteilorientierung auf die Form am Beispiel einer Bohrung (in Anlehnung an Gebhardt, 2016, S. 23).....	55
Abbildung 2.29:	Datenfluss und Prozessschritte der additiven Fertigung (VDI-Richtlinie 3405, S. 24) .....	56
Abbildung 2.30:	Eingrenzung dieser Arbeit auf die AM-Grundprinzipien des lichtreaktiven Photopolymer-Aushärtens (in Anlehnung an DIN EN ISO/ASTM 52900) .....	57
Abbildung 2.31:	Prinzip der Laser-Stereolithographie (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3405, S. 8) .....	58
Abbildung 2.32:	Prinzip des Digital Light Processing (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3405, S. 17) .....	59
Abbildung 2.33:	Prinzip des Poly-Jet Modelling (VDI-Richtlinie 3405, S. 14) ....	60
Abbildung 2.34:	Kostenpotenzial verschiedener AM-Materialien gegenüber einem Referenzwerkzeug aus Stahl (links) in einem spezifischen Anwendungsfall (rechts) (Kampker, Tribs, Alves et al., 2018, S. 50, S. 52).....	62
Abbildung 2.35:	Wirtschaftlicher Vergleich von Werkzeugalternativen nach Tosello et al., 2019, S. 784.....	63
Abbildung 2.36:	Wirtschaftlicher Vergleich von Werkzeugalternativen mit Berücksichtigung sprungfixer Kosten nach Kampker et al., 2020, S. 12.....	64
Abbildung 2.37:	E-Modul (Youngsches Modul) und Zugfestigkeit von <i>Digital ABS</i> in Abhängigkeit der Temperatur parallel und senkrecht zur Schichtebene (Mendible et al., 2017, S. 346–347) .....	65
Abbildung 2.38:	Oberflächenbeschaffenheit eines PJM-Formeinsatzes (a) und typisches Schadensbild in Form von Ausbrüchen (b) (Mendible et al., 2017, S. 350).....	66
Abbildung 2.39:	AT-Formeinsätze zur Herstellung von Mikro-Spritzgussteilen (a) mit Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Formeinsatzoberfläche (b) und Formteilbeschaffenheit (c) (Zhang et al., 2018, S. 5).....	68
Abbildung 2.40:	Oberflächenbeschaffenheit des Formeinsatzes (links) und des Formteils (rechts) (Volpato et al., 2016) .....	69

Abbildung 2.41:	AT-Formeinsatz mit komplexer Formteilgeometrie und Schieberfunktion zur Auflösung von Hinterschneidungen (Schuh, Bergweiler, Lukas & Abrams, 2020, S. 104) .....	72
Abbildung 2.42:	Direkte Umsetzung der CAD-Daten in die Werkzeugfunktion am Beispiel einer Oberflächentextur (Burggräf et al., 2022, S. 7) .	73
Abbildung 3.1:	Initiales Zielmodell an die zu entwickelnde Unterstützung in Anlehnung an das <i>Initial Impact Model</i> nach Blessing und Chakrabarti (2009) zur Beschreibung des Forschungsziels ....	81
Abbildung 4.1:	Forschungsvorgehen in dieser Arbeit in Anlehnung an die DRM nach Blessing und Chakrabarti (2009).....	86
Abbildung 4.2:	Methodensteckbrief „Interview“ (nach Marxen, 2014, S. 108) .	87
Abbildung 4.3:	Methodensteckbrief „Fragebogen“ (nach Marxen, 2014, S. 110) .....	88
Abbildung 4.4:	Methodensteckbrief „Fallstudie“ (nach Marxen, 2014, S. 102) 89	
Abbildung 4.5:	Methodensteckbrief „Live-Lab Studie“ (nach Albers, Walter et al., 2018) .....	90
Abbildung 4.6:	Methodensteckbrief „(Teilnehmende) Beobachtung“ (nach Marxen, 2014, S. 85, 94) .....	91
Abbildung 5.1:	Übersicht zu den in Kapitel 5 durchgeföhrten Studien als Grundlage zur Potenzialbewertung und Ermittlung des in Kapitel 6 beschriebenen Unterstützungsbedarfs und Zielsystems.....	94
Abbildung 5.2:	Übersicht zu den Formeinsätzen FE-1 bis FE-3 des ersten Studienteils (in Anlehnung an Chang (2020)) .....	96
Abbildung 5.3:	Durchschnittliche Beschaffungszeit ( $\bar{x}$ ) von Angebotsanfrage bis prognostizierter Lieferung für die Formeinsatzvarianten FE1- FE3 (Schrock et al., 2020, S. 265) .....	98
Abbildung 5.4:	Preis- und Lieferzeitvergleich der Formeinsatzvarianten FE4 (niedrigste Komplexität) bis FE6 (höchste Komplexität) (in Anlehnung an Kaltenbach, 2021).....	100
Abbildung 5.5:	Aufbau des Schnellwechselwerkzeugs mit Auswerferpaket und Zugproben-Formeinsatz (in Anlehnung an Proksch, 2020a, S. 34).....	103
Abbildung 5.6:	Beschädigter Formeinsatz (li.) und Simulationsergebnis (re.) (in Anlehnung an Proksch, 2020a, zitiert nach Schrock et al., 2022) .....	104

Abbildung 5.7:	Darstellung wichtiger Referenzprozessschritte und erzeugter Objekte für das Referenzsystem (Schrock et al., 2022, S. 6).105
Abbildung 5.8:	Optimierte Vorgehensmodell der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (Schrock et al., 2022, S. 7) .....106
Abbildung 5.9:	Prinzipielle Darstellung der Potenziale von AT hinsichtlich Effizienz und Agilität im PEP auf Basis der zusammengefassten Erkenntnisse aus Tabelle 5.5 .....120
Abbildung 5.10:	Tendenzielle Einordnung von AT, RP und KT hinsichtlich Aufwand und Wiedergabetreue auf Basis der DS-I .....121
Abbildung 5.11:	Unterschiedliche Betrachtungsebenen von AT zur Entwicklung einer Anwenderunterstützung.....125
Abbildung 6.1:	Erweitertes Zielmodell an die zu entwickelnde Unterstützung in Anlehnung an das <i>Initial Impact Model</i> nach Blessing und Chakrabarti (2009) mit prinzipieller Darstellung der Evaluation .....130
Abbildung 6.2:	Prinzipielles Vorgehen zur Definition von Anforderungen an die zu entwickelnde Methode.....132
Abbildung 6.3:	Gliederung der AT-Systematik mit Kurzbeschreibung der sechs Phasen und Angabe der wichtigsten Phasenergebnisse (in Anlehnung an Schrock et al., 2022).....136
Abbildung 6.4:	Übersicht über die verschiedenen Hilfsmittel innerhalb der sechs Phasen der AT-Systematik .....137
Abbildung 6.5:	AT-spezifische Referenzsystemelemente, welche im Modell der SGE zur Entwicklung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung genutzt werden können. .....138
Abbildung 6.6:	Kopplung der AT-Systematik mit dem integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM) nach ALBERS .....139
Abbildung 6.7:	Prinzip zur Beschreibung von Testfällen im Kontext der AT-Systematik (in Anlehnung an Schrock, Junk & Albers, 2023) 143
Abbildung 6.8:	Möglichkeiten zur technischen Eignungsprüfung von AT hinsichtlich der mechanischen und thermischen Belastung bzw. Belastbarkeit in zwei Schritten.....146
Abbildung 6.9:	Schema zur Durchführung der strukturmechanischen Formeinsatzsimulation auf Basis der Spritzgussprozesssimulation .....148

Abbildung 6.10:	Template für die Abweichungsanalyse zwischen Serien- und Prototypingprozess mit beispielhafter Parameterbeschreibung	151
Abbildung 6.11:	Beispielhafte Ausprägung zweier Filter-Fidelity-Profile in einem Filter-Fidelity-Modell unter möglichen Filterdimensionen .....	152
Abbildung 6.12:	Schematischer Aufbau der AT-Checkliste als Kanban-Board	159
Abbildung 6.13:	Ausschnitt aus der Umsetzung der AT-Checkliste im Online-Tool „Trello“, wie sie in den Evaluationsstudien eingesetzt wurde.....	160
Abbildung 6.14:	Vorgehen zur Entwicklung der AT-DSM und des AT-Konstruktionskatalogs.....	162
Abbildung 6.15:	Beispielhafte Wirkbeziehungen beim Spritzgießen mit AT-Formeinsätzen der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (siehe Abschnitt 5.2).....	163
Abbildung 6.16:	Modell zur systematischen Erfassung von Einflussfaktoren per DSM zur Unterstützung verschiedener Teil-Aktivitäten des AT (Schrock et al., 2021).....	163
Abbildung 6.17:	Prinzip der DSM-Modellierung anhand beispielhafter AT-Einflussfaktoren in grafischer Darstellung (Schrock et al., 2021).....	164
Abbildung 6.18:	Steckbrief zur Beschreibung der AT-DSM .....	166
Abbildung 6.19:	Auszug aus dem AT-Konstruktionskatalog am Beispiel von Konstruktionsrichtlinien für geometrische Strukturen in der Unterkategorie „Vertiefungen: Bohrungen“ (Schmieder, 2022) .....	167
Abbildung 6.20:	AT-Formeinsatz mit gespritztem Formteil (links), AT-Prototyp des Besteck-Sets (Mitte), Testdurchführung zur Validierung (rechts) .....	170
Abbildung 7.1:	Prinzipieller Ablauf und Forschungsvorgehen im Live-Lab „Workshop Additive Tooling“ (Schrock et al., 2023) .....	180
Abbildung 7.2:	Vorgehen im Workshop Additive Tooling nach den Phasen der AT-Systematik mit Übersicht zu den eingesetzten Methoden und Hilfsmitteln (Schrock et al., 2023) .....	181
Abbildung 7.3:	Beispiele und symbolische Darstellung aus dem Referenzsystem von Team 1 zur Entwicklung des „Eiskratzers“ im Modell der SGE.....	182

Abbildung 7.4:	Priorisierung der Validierungsziele anhand der gewichteten Unsicherheit in der Erfüllung von Kundenanforderungen am Beispiel von Team 1 „Eiskratzer“ (Schrock et al., 2023) .....	183
Abbildung 7.5:	Schematische Übersicht zum Vorgehen der studentischen Teams in den Phasen 1 und 2 mit Angabe der wesentlich genutzten Methoden (in Anlehnung an Schrock et al., 2023) .....	184
Abbildung 7.6:	Beispiele aus dem Referenzsystem zur Entwicklung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung im Modell der SGE .....	185
Abbildung 7.7:	Schematische Übersicht zum Vorgehen der drei studentischen Teams in Phase 3 am Beispiel „Tesla-Ventil“ (in Anlehnung an Schrock et al., 2023) .....	187
Abbildung 7.8:	Vorgehen zur Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung in Phase 4 (Schrock et al., 2023) .....	188
Abbildung 7.9:	Beispiele und Eindrücke aus dem Prototyping- und Validierungsprozess: „Eiskratzer“ - Enteisung einer Autoscheibe (links); „Tesla-Ventil“ - Prüfung der Diodizität (Mitte); „Karabiner“ - Zugversuch (rechts) (Schrock et al., 2023) .....	189
Abbildung 7.10:	Selbststeinschätzung der Studienteilnehmer vor und nach dem Workshop „Additive Tooling“ (Schrock et al., 2023) .....	191
Abbildung 7.11:	Retrospektive Bewertung der Relevanz der sechs Phasen der AT-Systematik aus Probandensicht (n = 15; Schrock et al., 2023) .....	193
Abbildung 7.12:	Bewertung von Nutzen und Gestaltung der AT-Systematik aus Probandensicht (n = 15; Schrock et al., 2023) .....	194
Abbildung 7.13:	Vergleich der Herstellkosten zwischen konventionellem (KT) und additivem Tooling (AT) für die Fallstudien B bis D .....	195
Abbildung 7.14:	Vergleich der Fertigungszeiten zwischen konventionellem (KT) und additivem Tooling (AT) für die Fallstudien B bis D .....	195
Abbildung 7.15:	„Benchmark-Bauteil“ mit Darstellung der relevanten Untersuchungsmerkmale (in Anlehnung an Bühler, 2022) ....	199
Abbildung 7.16:	Werkzeugdesign mit Darstellung der relevanten Untersuchungsmerkmale (in Anlehnung an Bühler, 2022) ....	200
Abbildung 7.17:	Gerüstetes Werkzeug mit AT-Formeinsätzen und Druckluftkühlung auf Auswerferseite (links) und Düsenseite (rechts) (in Anlehnung an Bühler, 2022) .....	201

Abbildung 7.18:	Mittels AT hergestellter „Benchmark-Bauteil“-Prototyp. Rechts: Düsenseite (A-Seite), Links: Auswerferseite (B-Seite) .....	202
Abbildung 7.19:	Bewertung der Unterstützungsleistung (U) der AT-Systematik .....	208
Abbildung 7.20:	Bewertung der Anwendbarkeit (A) der AT-Systematik .....	210
Abbildung 7.21:	Bewertung des Erfolgsbeitrags (E) der AT-Systematik .....	211
Abbildung 7.22:	Experteneinschätzung zu Chancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT zur Validierung <i>ohne</i> und <i>mit</i> der AT-Systematik .....	211
Abbildung 7.23:	Bewertung der selbst generierten Hilfsmittel AT-Checkliste, AT-DSM und AT-Konstruktionskatalog (n=11).....	212
Abbildung 8.1:	Übersicht zu den Studien der DS-I zur Ermittlung von Potenzialen und Hürden von AT in der Produktentwicklung mit symbolischer Darstellung der Studieninhalte .....	222
Abbildung 8.2:	Die sechs Phasen der AT-Systematik (Schrock et al., 2022) und die AT-spezifischen Hilfsmittel AT-Checkliste, AT-DSM sowie AT-Konstruktionskatalog.....	223
Abbildung 8.3:	Template zur Analyse von Abweichungen zur Bewertung der Wiedergabetreue (links) und angepasstes Filter-Fidelity-Modell zur Auswahl einer geeigneten Prototypingtechnologie auf Basis relevanter Wiedergabedimensionen (rechts) .....	224
Abbildung 8.4:	Studien der DS-II mit symbolischer Darstellung der Studieninhalte.....	225

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Anforderungskriterien und Qualitätsmerkmale nach VDI-Richtlinie 3405.....	29
Tabelle 4.1:	Typen von Forschungsprojekten nach der DRM (in Anlehnung an Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18).....	86
Tabelle 5.1:	Zusammengefasste Ergebnisse der Zugversuche nach DIN EN ISO 527.....	108
Tabelle 5.2:	Expertenpanel der ersten Interviewstudie .....	110
Tabelle 5.3:	Anregungen an eine Unterstützung des AT aus Interviewstudie 1 .....	116
Tabelle 5.4:	Zusammenfassung der wichtigsten Vor- und Nachteile, sowie Chancen und Risiken des AT gegenüber dem KT.....	117
Tabelle 5.5:	Bewertung der Herstellzeiten und -kosten von Werkzeug und Prototyp bei konventionellem (KT) und additivem Tooling (AT) .....	119
Tabelle 6.1:	Anforderungen an den Erfolgsbeitrag (E) der Methode .....	133
Tabelle 6.2:	Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U) der Methode .....	134
Tabelle 6.3:	Anforderungen an die Anwendbarkeit (A) der Methode .....	135
Tabelle 6.4:	Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U) der Methode durch die Phasen der AT-Systematik.....	172
Tabelle 6.5:	Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen an die Anwendbarkeit (A) der Methode .....	173
Tabelle 7.1:	Übersicht über alle durchgeführten Evaluationsstudien zur <i>Support-, Application- und Success-Evaluation</i> .....	177
Tabelle 7.2:	Übersicht zu den durchgeführten Workshops und der jeweiligen Entwicklungsaufgabe der Fallstudien B, C und D .....	181
Tabelle 7.3:	Übersicht über die von den Workshopteilnehmern dokumentierten Arbeitsergebnisse je Phase (in Anlehnung an Schrock et al., 2023) .....	190

Tabelle 7.4:	Bewertung der Relevanz der sechs Phasen der AT-Systematik für die Durchführung von Fallstudie E (in Anlehnung an Bühler, 2022) .....	204
Tabelle 7.5:	Bewertung der AT-Systematik durch Experten im Kontext von Fallstudie E „Benchmark“ (in Anlehnung an Bühler, 2022) ...	205

# Abkürzungsverzeichnis

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer
AM	Additive Manufacturing
AT	Additive Tooling
AV	Attributvariation
AWKG	Adolf Würth GmbH & Co. KG
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
DLP	Digital Light Processing
DRM	Design Research Methodology
DS-I	Deskriptive Studie 1
DS-II	Deskriptive Studie 2
DSM	Design-Structure-Matrix
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFM	Filter-Fidelity-Modell
FFP	Filter-Fidelity-Profil
GV	Gestaltvariation
HoQ	House of Quality
HSC	High Speed Cutting (Hochgeschwindigkeitszerspanung)
IPEK	Institut für Produktentwicklung
iPeM	integriertes Produktentstehungsmodell
KaSPro	Karlsruher Schule für Produktentwicklung
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KT	Konventionelles Tooling (subtraktive Werkzeugfertigung)
MBSE	Model-based Systems Engineering

MJM	Multi-Jet Modelling
PBT	Polybutylenterephthalat
PE	Produktentwicklung
PEP	Produktentwicklungsprozess
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PJM	Poly-Jet Modelling
PP	Polypropylen
PS	Präskriptive Studie
PV	Prinzipvariation
RP	Rapid Prototyping
SGE	Systemgenerationsentwicklung
SLA	Stereolithografie
SPALTEN	Akronym für eine Problemlösungsmethode aus sieben Schritten: Situationsanalyse, Problemeingrenzung, Alternative Lösungen, Lösungsauswahl, Tragweitenanalyse, Entscheiden und Umsetzen, Nachbereiten und Lernen
ÜV	Übernahmevariation
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
ZHO	Systemtripel aus Ziel,- Handlungs-, und Objektsystem

# Formelzeichen

$\bar{x}$	Arithmetisches Mittel
$r$	Korrelationskoeffizient
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$\sigma_M$	Mittlere Zugspannung
$E$	E-Modul
$F_Z$	Werkzeugzuhaltkraft
$\sigma$	Standardabweichung
$n$	Stichprobengröße



# 1 Einleitung

Zu Beginn dieser Arbeit wird zunächst die Motivation für die Bearbeitung des Themas dargelegt (siehe Abschnitt 1.1). Zudem werden der Fokus (siehe Abschnitt 1.2) und der Aufbau (siehe Abschnitt 1.3) der Arbeit erläutert.

## 1.1 Motivation

Das Spritzgießen ist das bedeutendste Fertigungsverfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen, mit dem überwiegend Thermoplaste verarbeitet werden (Hopmann, Michaeli, Greif & Ehrig, 2017, 2 f.). Im Jahr 2022 wurden weltweit etwa 400 Millionen Tonnen Kunststoffe verarbeitet – mit seit Jahrzehnten steigender Tendenz (PlasticsEurope, 2023). Allein in Deutschland erwirtschaftete die Kunststoffverarbeitende Industrie<sup>1</sup> 2022 einen Umsatz von 78,9 Mrd. € (GKV-Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie, 2023). Die zur Produktion benötigten Spritzgusswerkzeuge sind allerdings oft teuer, besitzen lange Entwicklungs- und Fertigungszeiten und stehen daher meist erst spät im Entwicklungsprozess zur Verfügung. Aufgrund dieser eingeschränkten Werkzeugverfügbarkeit können auch seriennahe Prototypen erst spät erzeugt werden. Im Rahmen einer erfolgreichen Produktentwicklung ist jedoch die von Beginn an und kontinuierlich durchgeföhrte Validierung die zentrale Aktivität für den Wissensgewinn, sowie für den steten Abgleich zwischen den Zielen und Zwecken des Produktes und dem erreichten Entwicklungsstand (Albers, 2010; Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016).

Für die Validierung im Entwicklungsprozess von Spritzgussprodukten wird in der Regel auf verschiedene Technologien und Anwendungen, wie die Simulation, das Rapid Prototyping (RP, „3D-Druck“)<sup>2</sup> oder vereinfachte Prototypenwerkzeuge zurückgegriffen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass Prototypen das zu entwickelnde Produkt immer nur zu einem gewissen Grad originalgetreu wiedergeben. Beispielsweise bietet das RP zwar eine Möglichkeit zur schnellen, günstigen und frühen Herstellung physischer Prototypen, da diese allerdings mit einer anderen Fertigungstechnologie, in Schichtbauweise und in der Regel auch aus anderen

---

<sup>1</sup> Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten.

<sup>2</sup> Die Patentierung der Stereolithographie durch den Physiker Chuck Hull im Jahr 1984 gilt als Geburtsstunde des „3D-Drucks“ bzw. des Additive Manufacturing (AM) (Gibson et al., 2021, S. 44). Bis heute wurden viele weitere AM-Verfahren entwickelt, welche häufig in der Anwendung des Rapid Prototyping (RP) eingesetzt werden.

Werkstoffen als das zu entwickelnde Spritzgussprodukt hergestellt werden, besitzen sie meist auch abweichende Eigenschaften (Gebhardt, 2016, S. 98). Bestimmte Fehler im Produkt- oder Werkzeugdesign lassen sich entsprechend nur während eines zumindest seriennahen Fertigungsprozesses entdecken. Nicht seriennahe Prototypen sind somit nur bedingt geeignet im Hinblick auf bestimmte Fragestellungen und Validierungsziele. Gemäß der „Rule-of-Ten<sup>3</sup>“ führt eine späte Fehlerdetektion zu exponentiell erhöhten Änderungskosten und ebenfalls zu einer Verlängerung der Entwicklungszeit (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 168).

Die Technologie des Additive Manufacturing (AM) kann jedoch nicht nur für die direkte Herstellung von Prototypen in der Anwendung des RP eingesetzt werden, sondern auch für die Herstellung von Werkzeugen, mit deren Hilfe dann Prototypen hergestellt werden. Diese Anwendung des AM wird häufig mit den Begriffen Additive Tooling (AT) oder Rapid Tooling (RT) bezeichnet<sup>4</sup>. Dabei wird meist nicht das gesamte Spritzgusswerkzeug, sondern nur die formgebenden Komponenten, üblicherweise sogenannte Formeinsätze, additiv gefertigt. Diese werden dann in ein Stammwerkzeug eingesetzt, welches als „Grundaufbau“ dient (siehe Abbildung 1.1). Somit können mit AT-Werkzeugen Spritzgussbauteile bzw. Prototypen im Zielfertigungsverfahren und im Ziellmaterial hergestellt werden.

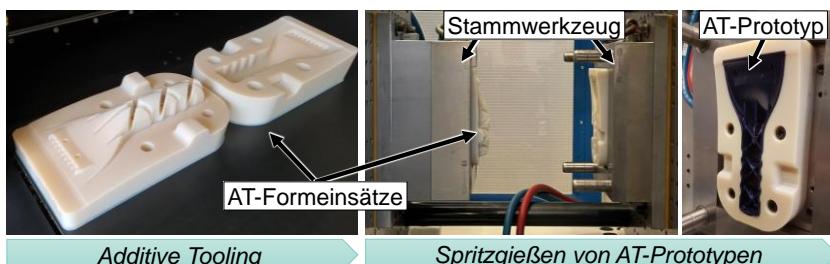


Abbildung 1.1: Beispiel zur Anwendung additiv gefertigter Spritzgussformeinsätze zur Herstellung von Spritzgussprototypen (siehe Fallstudie B, S. 178)

Aktuelle Studien belegen, dass AT in manchen Fällen nicht nur für die Herstellung von Spritzgusswerkzeugen oder Formeinsätzen geeignet ist, sondern auch schneller und kostengünstiger als die konventionelle Werkzeugherstellung sein kann (Kampker, Ayvaz & Lukas, 2020; Lozano, Álvarez, Isaza & Montealegre-Rubio,

---

<sup>3</sup> Auch bekannt als „Zehner-Regel“.

<sup>4</sup> Eine detaillierte Betrachtung des AT erfolgt in Kapitel 2.3.

2022; Tosello et al., 2019). Somit könnte durch das AT ein früherer Erkenntnisgewinn und eine effizientere Validierung ermöglicht werden. Gegenwärtig werden Spritzgusswerkzeuge, sowohl für die Serien- als auch für die Prototypenproduktion, allerdings überwiegend durch subtraktive Verfahren hergestellt. Da als Werkstoffe für die additive Werkzeugfertigung oft Photopolymere eingesetzt werden, unterscheiden sich die AT-Werkzeuge in ihren Eigenschaften deutlich von konventionell hergestellten Werkzeugen aus Stahl oder Aluminium. So sind die aus Photopolymeren hergestellten Werkzeuge unter anderem verhältnismäßig empfindlich gegen mechanische Belastungen, besonders bei höheren Temperaturen, wie sie beim Spritzgießen von Thermoplasten auftreten und können entsprechend schnell versagen ohne eine ausreichende Anzahl oder Qualität der Prototypen zu liefern (Mendible, Rulander & Johnston, 2017). Entwickler stehen demnach nicht nur vor der Herausforderung geeignete Anwendungsfälle für AT zu identifizieren, sondern auch mit dem AM eine zusätzliche Fertigungstechnologie mit seinen eigenen spezifischen Fertigungsrestriktionen in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Damit AT-Werkzeuge effektiv und effizient in der Produktentwicklung eingesetzt werden können, bedarf es entsprechend neuer und angepasster Prozessabläufe und eines AT-spezifischen Fachwissens.

Das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach ALBERS beschreibt die Entwicklung neuer technischer Systeme und Produkte auf der Basis eines Referenzsystems, dessen Elemente durch Variation auf die zu entwickelnde System- oder Produktgeneration abgebildet werden (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015a; Albers, Rapp et al., 2019; Albers & Rapp, 2022). Auch Spritzgussprodukte werden in der Regel in Generationen auf den Markt gebracht (Hopmann, Menges, Michaeli & Mohren, 2018, S. 563) und können somit durch die SGE beschrieben werden. Im Kontext der Entwicklung von Spritzgussprodukten und Spritzgusswerkzeugen stellen z.B. vorangegangene Produkt- und Werkzeuggenerationen oder die oft für die Werkzeuggestaltung eingesetzten Baukastensysteme Referenzsystemelemente dar. Zwar wird AT in der Praxis bislang selten eingesetzt, allerdings bestehen verschiedene wissenschaftliche Arbeiten, in denen die praktische Anwendung von AT untersucht wurde (vgl. Abschnitt 2.3.4). Nach dem Modell der SGE stellen die Forschungsergebnisse dieser Arbeiten ebenfalls wertvolle und relevante Referenzsystemelemente dar, welche durch entsprechende Variation auf die Entwicklung und Nutzung von AT-Werkzeugen übertragen werden können.

Obwohl AT zunehmend Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen ist, gibt es bisher keine ganzheitliche methodische Unterstützung für die Integration von AT in die Entwicklungspraxis. Mit dieser Arbeit soll deshalb ein Beitrag zur Anwenderunterstützung von AT und zur Nutzung von AT für die Validierung in der Produktentwicklung im Beschreibungsmodell der SGE geleistet werden.

## 1.2 Fokus der Arbeit

Das mit der vorliegenden Arbeit verbundene Ziel der Entwicklung einer Unterstützung zur Nutzung von AT in der Produktentwicklung erfordert die Betrachtung verschiedener Forschungsfelder. Zu den Schwerpunkten zählen hier die *Produktentwicklung*, das *Additive Manufacturing* und das *Spritzgießen*. Daran schließen sich weitere, essenziell relevante oder hilfreiche Forschungsfelder an. Mit der in dieser Arbeit durchgeführten Forschung zur Entwicklung einer Unterstützung für das AT soll weiterhin ein Beitrag für die Bereiche *Prototyping*, *Validierung* und *Verifikation*, *Entwicklungsprozesse des Spritzgießens*, sowie *Methoden und Gestaltungsrichtlinien für AT* geleistet werden. Einen genaueren Überblick über die fokussierten Forschungsfelder wird in Abbildung 1.2 gegeben.

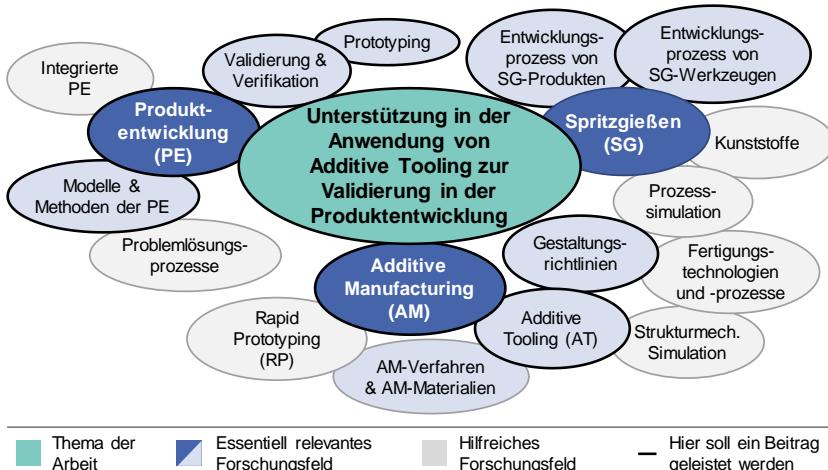


Abbildung 1.2: Thema und fokussierte Forschungsfelder der vorliegenden Arbeit in Form eines ARC-Diagramms (Areas of relevance and contribution) nach Blessing und Chakrabarti (2009, S. 64–66)

Im Forschungsfeld der Produktentwicklung werden einige der in der Praxis bewährten Modelle und Methoden der *KaSPro – Karlsruher Schule für Produktentwicklung* als Basis für die zu entwickelnde Unterstützung herangezogen. Dazu zählen das Modell der *SGE – Systemgenerationsentwicklung nach ALBERS*, das *integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)* und die Problemlösungsmethode *SPALTEN* (siehe Abschnitt 2.1.2). Aufgrund der Vielzahl an mittlerweile verfügbaren AM-Verfahren und AM-Materialien erfolgt im Verlauf der Arbeit eine Eingrenzung auf Verfahren, die auf der lichtreaktiven Aushärtung von Photopolymeren (Photopolymerisation)

basieren, zu denen unter anderem die Stereolithografie, das Digital Light Processing und das Poly-Jet Modelling gehören (siehe Abschnitt 2.3).

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Forschungsarbeit ist in acht Kapitel gegliedert, die in Abbildung 1.3 dargestellt sind. Die Inhalte der Kapitel werden im Folgenden kurz vorgestellt.

- 1 Einleitung
- 2 Grundlagen und Stand der Forschung
- 3 Forschungsbedarf und Zielsetzung
- 4 Vorgehensweise
- 5 Vertiefende Untersuchung von Additive Tooling
- 6 Unterstützung in der Anwendung von Additive Tooling
- 7 Evaluation
- 8 Diskussion und Ausblick

Abbildung 1.3: Aufbau dieser Arbeit nach Kapitel

In **Kapitel 2** wird der Stand der Forschung zu relevanten und hilfreichen Forschungsfeldern dargelegt. Dazu werden zunächst die Grundlagen der Produktentwicklung und Validierung erörtert. Dabei werden auch die in dieser Arbeit genutzten Modelle und Methoden, wie das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung, der Problemlösungsprozess SPALTEN und das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) eingeführt. Zudem wird die Rolle von Prototypen und deren Integration in die Validierung aufgezeigt. Weiterhin wird das Spritzgießen im Kontext der Produktentwicklung beschrieben, der typische Entwicklungsablauf aufgezeigt und die Verfahrensgrundlagen des Spritzgießen erörtert. Anschließend wird der Begriff des Additive Tooling (AT) eingeführt sowie die Grundlagen des Additive Manufacturing (AM) und relevante AM-Verfahren aufgezeigt. Den Abschluss von Kapitel 2 bildet eine ausführliche Erörterung aktueller Forschungsarbeiten zur Untersuchung des Additive Tooling unter wirtschaftlicher und technischer Betrachtung.

In **Kapitel 3** wird auf Basis der Grundlagen und des Standes der Forschung der Forschungsbedarf erläutert und das Forschungsziel formuliert. Weiterhin wird eine Forschungsthese gebildet, welche durch drei Forschungsfragen operationalisiert wird.

In **Kapitel 4** werden das Forschungsvorgehen entlang der Design Research Methodology (DRM) geschildert und die angewandten empirischen Methoden sowie die Forschungsumgebung erläutert.

In **Kapitel 5** werden vertiefende Untersuchungen des AT im Rahmen einer Markt- und Beschaffungsstudie, sowie anhand einer technischen Vorstudie beschrieben. Weiterhin werden die Ergebnisse der ersten Interviewstudie zum bisherigen Wissensstand und zum Unterstützungsbedarf der Studienteilnehmer vorgestellt. Zudem erfolgt eine Bewertung der Potenziale des AT im Kontext der Produktentwicklung.

In **Kapitel 6** erfolgt zunächst die Konkretisierung des Zielsystems an die zu entwickelnde Unterstützung. Mit der *AT-Systematik* wird anschließend eine Methode präsentiert, welche die zielgerichtete Anwendung von AT zur Validierung in der Produktentwicklung unterstützen soll. Neben der Beschreibung des 6-Phasen-Modells der AT-Systematik werden zusätzliche Methoden und Hilfsmittel beschrieben, welche situationsspezifisch Anwendung finden können.

In **Kapitel 7** wird die Anwendung und Evaluation der zuvor beschriebenen *AT-Systematik* aufgezeigt. Dazu werden vier Fallstudien mit praktischer Methodenanwendung sowie zwei Interviewstudien vorgestellt.

In **Kapitel 8** erfolgt abschließend die Zusammenfassung der Arbeit und eine kritische Betrachtung der Knergebnisse. Zudem wird ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen gegeben.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden relevante Grundlagen und der Stand der Forschung zu den Schwerpunkten *Produktentwicklung und Validierung* (siehe Abschnitt 2.1), *Spritzgießen* (siehe Abschnitt 2.2) und *Additive Tooling* (siehe Abschnitt 2.3) aufgezeigt. Die Betrachtung der Produktentwicklung geschieht dabei mit dem Fokus auf den Aktivitäten *Validieren* und *Verifizieren*. Weiterhin wird die Situation der Spritzgussproduktentwicklung aufgezeigt und erläutert, wie diese in Verbindung mit den Möglichkeiten des AT steht. Neben der Vorstellung der Verfahrensgrundlagen des Additive Manufacturing (AM) und verschiedener AM-Verfahren wird eine ausführliche Betrachtung des Standes der Forschung im Bereich AT vorgenommen. Zusätzlich werden verschiedene Definitionen eingeführt, welche das Verständnis und die Beschreibung von Sachverhalten im Rahmen dieser Arbeit erleichtern sollen.

### 2.1 Produktentwicklung und -validierung

Zu Beginn dieses Kapitels erfolgt eine Einführung der Begriffe *Innovation* und *Produktentwicklung* (siehe Abschnitt 2.1.1). Anschließend werden Modelle und Methoden der Produktentwicklung aufgezeigt (siehe Abschnitt 2.1.2). Weiterhin wird die Relevanz der *Validierung* innerhalb der Produktentwicklung (siehe Abschnitt 2.1.3), sowie die Rolle von *Prototypen* zur Produktvalidierung (siehe Abschnitt 2.1.4) beschrieben.

#### 2.1.1 Definition und Begriffsbestimmung

Schumpeter (1939) unterscheidet zwischen den Begriffen der *Invention* („Erfahrung“) und der *Innovation* („Neuerung“), wobei Innovationen durch am Markt erfolgreiche Inventionen entstehen. Entsprechend erzielt die reine Invention zunächst keinen wirtschaftlichen Nutzen (Schumpeter, 1939, S. 80). Damit eine Invention sich am Markt erfolgreich durchsetzen kann, muss durch sie eine entsprechende Bedürfnissituation befriedigt werden (Albers, Heimicke et al., 2018, S. 254). Um diese Bedürfnissituation zu erfassen, beschreiben Albers und Heimicke et al. (2018) das *Produktprofil*. Dabei handelt es sich um ein „*Modell eines Nutzenbündels, das den angestrebten Anbieter-, Kunden- und Anwendernutzen für die Validierung zugänglich macht und den Lösungsraum für die Gestaltung einer Produktgeneration explizit vorgibt.*“ (Albers, Heimicke et al., 2018, S. 255, zitiert nach Albers et al., 2020, S. 4). Als Hilfestellung zur Erfassung des Produktprofils stellen Albers und Heimicke et al.

(2018) das Produktprofil-Schema vor, welches die initiale Beschreibung des Produktes und der Bedürfnissituation enthält (siehe Anhang A).

Aus diesem Verständnis heraus erweitern Albers und Heimicke et al. (2018) den Innovationsbegriff nach Schumpeter und definieren Innovation als „die erfolgreiche Realisierung einer Neuheit, einer kreativen Idee oder Invention am Markt mit erweitertem Kunden-, Anwender- und Anbieternutzen“ (zitiert nach IPEK Glossar, 2021). Folglich entsteht Innovation erst durch die technische Realisierung (Invention) eines validen Produktprofils, welches sich zusätzlich erfolgreich am Markt durchsetzt. Dieses Verständnis von Innovation wird mit dem „Innovationstrichter“ in Abbildung 2.1 visualisiert.

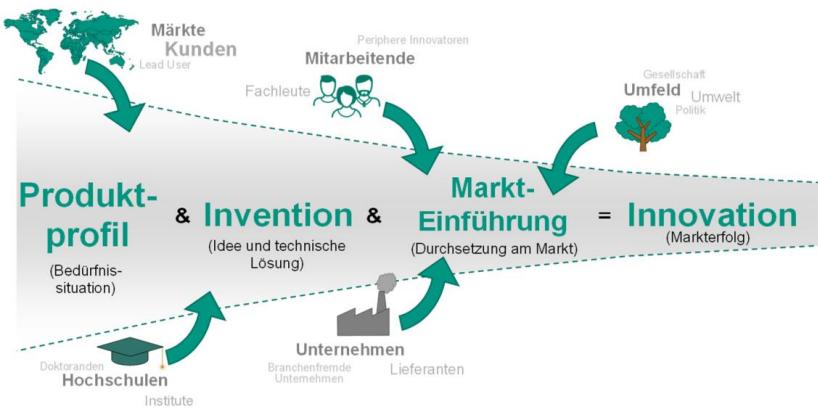


Abbildung 2.1: Elemente einer Innovation nach Albers und Heimicke et al. (2018) zitiert nach Albers et al. (2020, S. 4)

Wie mit dem „Innovationstrichter“ symbolisiert wird, setzen sich von vielen Inventionen tatsächlich nur ein Teil auch als Innovationen am Markt durch. Die Aufgabe der *Produktentwicklung*, als interdisziplinärer Unternehmensprozess, ist daher die „Entwicklung eines marktfähigen Produkts, basierend auf der Definition initialer Ziele und Anforderungen an das Produkt, die im Lauf des Prozesses kontinuierlich weiterentwickelt und iterativ angepasst werden“ (VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 8). Weiterhin ist die Produktentwicklung, neben den Phasen der *strategischen Produktplanung* und *Produktionssystementwicklung*, eine Phase innerhalb der *Produktentstehung* und Teil des *Produktlebenszyklus* (Albers & Gausemeier, 2012, S. 18). Nach der VDI-Richtlinie 2221 (2019, Blatt 1, S. 8, S. 25) zählt zudem die *Produktion* als Teil der Produktentstehung (siehe Abbildung 2.2).

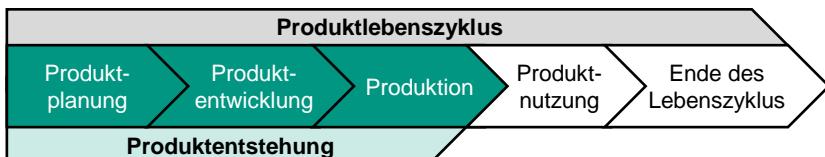


Abbildung 2.2: Produktlebenszyklus in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 25

Nach Albers (2010, S. 5) stellt die Validierung die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess dar. Dabei sollte die Validierung von Beginn an, kontinuierlich und systematisch durchgeführt werden (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 559), wodurch Ziele und Anforderungen fortlaufend detailliert und neue Entwicklungsaktivitäten initiiert werden (VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 41–42). Eine weitere Begründung für den möglichst frühen Beginn der Validierung findet sich zudem in der „Rule of Ten“, wonach sich der Aufwand für die Fehlerkorrektur und -vermeidung in jedem Schritt der Produktentwicklung um den Faktor zehn erhöht (Ehrlein Spiel & Meerkamm, 2017, S. 168; Lindemann, 2009). Neben einer Kostenreduktion lässt sich zudem die Time-to-Market verkürzen, wenn verbindliche Entscheidungen früh im Entwicklungsprozess getroffen werden können (sog. „Frontloading“, Gebhardt, 2016, S. 349). Allerdings stellen insbesondere in der *frühen Phase der Produktentwicklung*, also dem Zeitraum von Projektinitiierung bis zum Erhalt einer technisch bewertbaren Lösung, das hohe Maß an Unsicherheit und die häufig nur eingeschränkte Verfügbarkeit von Prototypen eine Herausforderungen dar (Albers, Rapp, Birk & Bursac, 2017). Wie in Abschnitt 2.1.4 aufgezeigt wird, werden je nach Entwicklungsphase in der Regel unterschiedliche Prototypen eingesetzt.

In der VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1 wird die „*Absicherung der Eigenschaftserfüllung*“ (kurz: *Absicherung*) als zentrale Aktivität der Produktentwicklung genannt, in der alle Berechnungs-, Simulations-, Versuchs- und Testaktivitäten stattfinden. Als Bestandteil der Qualitätssicherung umfasst die Absicherung die beiden Begriffe *Verifikation* und *Validierung*. Um in dieser Arbeit nicht kontinuierlich zwischen den Begriffen *Absicherung*, *Validierung* und *Verifikation* unterscheiden zu müssen, wird nachfolgend eine vereinfachende Definition des Validierungsbegriffs eingeführt<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Der Begriff *Absicherung* wird überwiegend in der industriellen Praxis als Begriff für die *Validierung* genutzt (Albers, Behrendt, Klingler und Matros (2016, S. 542)). Die Begriffe *Validierung* und *Verifikation* werden eher in den theoretischen Modellen verwendet.

### **Definition 1: Validierung und Verifikation**

Nach VDI 2221 werden die Begriffe Verifikation und Validierung, übertragen auf technische Systeme, wie folgt definiert:

- Die Verifikation dient der Überprüfung, ob eine Realisierung mit der Spezifikation übereinstimmt. Sie dient sozusagen der Beantwortung der Frage: „Wird das Produkt richtig entwickelt?“
- Die Validierung stellt die Prüfung des Produktes auf die Eignung für seinen Zweck bzw. die Erzielung seines Mehrwertes dar. Dabei fließen sowohl die Erwartungen des Fachexperten als auch die Erwartungen des Anwenders ein. Die Validierung dient sozusagen der Beantwortung der Frage: „Wird das richtige Produkt entwickelt?“

In dieser Arbeit wird der Begriff *Validierung*, falls nicht explizit anders beschrieben, synonym zum Begriff der *Absicherung* genutzt. Die *Verifikation* wird entsprechend dem Absicherungsbegriff und der Beschreibung nach Albers, Matros, Behrendt und Jetzinger (2015, S. 81) als Teilaktivität der *Validierung* gesehen.

Auf Basis der *Theorie der Systemtechnik* nach Ropohl (1975) kann die Produktentwicklung als die Überführung eines zunächst vagen *Zielsystems* in ein *Objektsystem* mittels eines *Handlungssystems* beschrieben werden (Albers, 2010). Albers, Lohmeyer und Ebel (2011) erweitern das Modell aus *Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO-Modell)* um die grundlegenden Aktivitäten der Analyse und Synthese und fügen dem Handlungssystem die Bestandteile *Wissensbasis* und *Lösungsraum* hinzu (siehe Abbildung 2.3). In diesem erweiterten ZHO-Modell wird der iterative Charakter der Produktentwicklung verdeutlicht, indem die Produktentwicklung als Wiederholung vieler Kreations- und Validierungsschritte verstanden wird. Während die Kreation eine Zielanalyse mit folgender Objektsynthese darstellt, ist die Validierung eine Objektanalyse mit darauffolgender Zielsynthese (Albers, Behrendt et al., 2016).

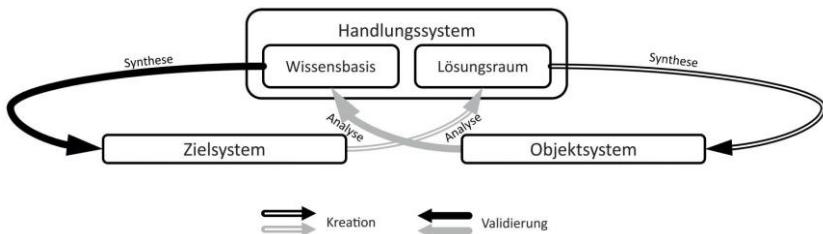


Abbildung 2.3: Das erweiterte ZHO-Modell (Albers, Behrendt, Schroeter, Ott & Klingler, 2013, S. 393, zitiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 544)

Gericke et al. (2021) beschreiben die Produktentwicklung unter anderem als *Problemlöseprozess*, bei dem auftretende Probleme durch menschliches Denken gelöst werden müssen. Zur Problemlösung, also auch zur Produktentwicklung, erfolgt entsprechend eine konstante Informationsverarbeitung mit hohem Informationsbedarf (Dörner, 1987; Gericke et al., 2021). Die Informationsgewinnung kann dabei über verschiedene Methoden, wie Markt- oder Literaturanalyse, Forschung, Berechnung, Versuche usw. geschehen. Die Informationsverarbeitung erfolgt anschließend durch beispielsweise Analyse der Informationen und Synthese durch Überlegungen und Kombinationen. Schließlich erfolgt die Ausgabe der Informationen in Skizzen, Zeichnungen, Tabellen, Prüfberichten usw. Dabei wird in Iterationen vorgegangen, welche zu einer Koevolution von Problem und Lösung führen. Das heißt, dass ein zu Beginn unscharfes Problemverständnis über mehrere Problembeschreibungs- und Lösungsvorschlag-Zyklen schrittweise verbessert wird. (Gericke et al., 2021)

### 2.1.2 Modelle & Methoden der Produktentwicklung

In Theorie und Praxis gibt es zahlreiche verschiedene Modelle, die den Produktentwicklungs- oder Produktentstehungsprozess in zeitlicher oder sachlicher Abfolge darstellen. Zu den wahrscheinlich bekannteren Modellen zählen das *allgemeine Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221* (2019)<sup>2</sup>, das *V-Modell nach VDI 2206*<sup>3</sup> oder der *Stage-Gate-Prozess* nach COOPER<sup>4</sup>. Innerhalb dieser Modellvielfalt können Modelle zum Beispiel anhand ihres Detaillierungs- und Formalisierungsgrades unterschieden werden (siehe Abbildung 2.4). Zu den ganzheitlichen Modellen zählen das *Münchener Vorgehensmodell (MVM)* von LINDEMANN<sup>5</sup>, das *4-Zyklen-Modell der*

<sup>2</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1.

<sup>3</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 2206, S. 29.

<sup>4</sup> Vgl. Cooper (1990, 1994); VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 26.

<sup>5</sup> Vgl. Lindemann (2009, S. 217).

Produktentstehung von GAUSEMEIER<sup>6</sup> und das *integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)* von ALBERS<sup>7</sup>, welche darauf ausgerichtet sind den gesamten Entwicklungsprozess von der Ideenfindung bis zur Fertigstellung unter Einbezug unterschiedlicher Interessenvertreter auf verschiedenen Ebenen zu planen und zu steuern.

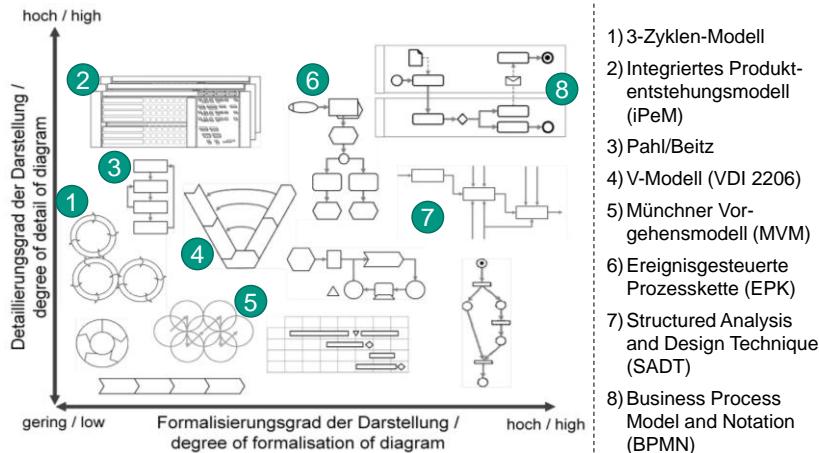


Abbildung 2.4: Darstellungsarten von Abläufen (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 29)

Gemäß dem Modellbegriff nach Stachowiak (1973) sind *Modelle* durch ein *Abbildung*-, ein *Verkürzungs*- und ein *pragmatisches Merkmal* charakterisierbar. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass Modelle Abbildungen oder Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale sind, die selbst wiederum Modelle sein können (Stachowiak, 1973, S. 131). Das Verkürzungsmerkmal besagt, dass Modelle nicht alle und nur jene Attribute des Originals erfassen, die die Modellerschaffer oder -nutzer als relevant erachten (Stachowiak, 1973, S. 132). Das pragmatische Merkmal besagt, dass Modelle für bestimmte „modellnutzende Subjekte“, innerhalb bestimmter Zeitintervalle und für einen bestimmten Zweck ihre Ersetzungsfunktion erfüllen (Stachowiak, 1973, S. 132–133). Entsprechend geben auch Produktentwicklungsmodelle nur eine zweckmäßige, reduzierte und abstrahierte Version der Realität wieder (VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 28).

<sup>6</sup> Vgl. Bender und Gericke (2021, S. 87 f.).

<sup>7</sup> Vgl. Kapitel 2.1.2.2, sowie Albers, Reiss, Bursac und Richter (2016).

Browning et al. (2006, zitiert nach Bender & Gericke, 2021) nennen verschiedene mögliche Verwendungszwecke von Prozessmodellen. Bei der *Prozessvisualisierung* dienen die Modelle der Darstellung und Kommunikation von Abhängigkeiten, Verantwortlichkeiten und Aktivitäten. Zur *Prozessplanung* unterstützen sie bei der Auswahl von Aktivitäten, der Prozessgestaltung und Strukturierung, der Koordination von Zuständigkeiten und Ressourcen sowie der Abschätzung und Optimierung von Kennwerten. Innerhalb der *Prozessdurchführung* und -*kontrolle* dienen sie der Fortschrittsbeurteilung, der Ressourcenkontrolle sowie der Prozesskorrektur und -änderung. Für die *Prozessverbesserung* genutzt dienen sie bspw. der kontinuierlichen Verbesserung des Prozesses, dem Wissensmanagement und der Qualitätssicherung. (Bender & Gericke, 2021, S. 74)

Wichtige Methoden zur Beschleunigung von Prozessen stellen das *Simultaneous Engineering* und *Concurrent Engineering* dar (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017; Feldhusen & Grote, 2013; Putnik & Putnik, 2019). Im Gegensatz zu traditionellen, meist sequenziell organisierten Entwicklungsprozessen werden beim Simultaneous Engineering verschiedene Aktivitäten (z.B. Produkt- und Produktionssystementwicklung) überlagert und parallel durchgeführt (VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 26). Concurrent Engineering bezeichnet dagegen die Aufteilung einer einzelnen umfangreichen Aufgabe (z.B. im Rahmen der Produktentwicklung) auf mehrere Personen oder Gruppen, die diese Aufgabe parallel bearbeiten (VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 26). Ehrlenspiel und Meerkamm (2017) beschreiben Simultaneous Engineering als „zielgerichtete, interdisziplinäre Zusammen- und Parallelarbeit von Produkt-, Produktions- und Vertriebsentwicklung mit Hilfe eines straffen Projektmanagements“ unter Betrachtung des gesamten Produktlebenslaufs zur Zeit- und Kostenreduktion und Qualitätsverbesserung (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 279).

Weiterhin weist die Produktentwicklung zahlreiche Wechselwirkungen zu sogenannten Begleitprozessen, wie dem Projekt-, Risiko-, Anforderungs- oder Kostenmanagement auf (Bender & Gericke, 2021, S. 73). Ein Vorgehen, welches diese Begleitprozesse inkludiert, sowie die Bedingungen der Umwelt und verschiedene Unternehmenssteile berücksichtigt, wird als *integrierte Produktentwicklung (IPE)* bezeichnet (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, 236 f.). Nach Ehrlenspiel und Meerkamm (2017) stehen bei der IPE die Elemente Mensch, Methodik, Organisation und Technik im Vordergrund.

Entsprechend der Vielfalt von etablierten und die Produktentwicklung unterstützen den Modellen und Methoden, würde eine ausführliche Betrachtung aller möglichen Ansätze den Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Weiterhin wurde diese Arbeit im Kontext der Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) durchgeführt. Daher werden im Folgenden nur jene Modelle und Methoden der KaSPro eingeführt,

auf die in dieser Arbeit aufgebaut wurde. Dazu zählen das *Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung* (siehe Abschnitt 2.1.2.1), das *integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)* (siehe Abschnitt 2.1.2.2) sowie der *Problemlösungsprozess SPALTEN* (siehe Abschnitt 2.1.2.3).

### 2.1.2.1 Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung

Verschiedene Quellen weisen darauf hin, dass Produkte selten von Grund auf neu entwickelt werden (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015b; Albers, Bursac & Rapp, 2017; Bender & Gericke, 2021; Eckert, Alink & Albers, 2010; Feldhusen & Grote, 2013). Vielmehr wird zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit und zur Reduzierung des Entwicklungsrisikos eine Übernahme oder Modifikation bestehender Funktionen und Teilsysteme angestrebt (Eckert et al., 2010). Albers et al. (2015a, S. 17) schlussfolgern, dass der Neuheitsgrad eines Produktes nicht nur durch die Anzahl neu entwickelter Teilsysteme, sondern auch durch die Verbesserung von Funktionen und Eigenschaften bereits bestehender Elemente oder eine Erweiterung ihres Anwendungsbereiches definiert wird. Um diese Beobachtungen in einem Beschreibungsmodell der Produktentstehung abilden zu können, führen Albers et al. (2015a) das Modell der *PGE – Produktgenerationsentwicklung* ein. Das Modell dient zudem als Grundlage für die qualitative und quantitative Planung, Einordnung, Beschreibung und Steuerung einer Entwicklungsaufgabe mit dem Fokus auf der Entwicklungspraxis von Unternehmen (Albers et al., 2015a, S. 18). Da es sich bei Produkten immer um Systeme handelt, führen Albers und Rapp (2022) das Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung auf Basis des Modells der PGE ein. Dabei basiert die Entwicklung neuer technischer Produkte bzw. neuer technischer Systeme im Modell der SGE auf zwei Grundhypothesen:

- (1) Die Entwicklung eines jeden Produktes oder Systems basiert auf den Elementen eines *Referenzsystems*. Dessen Elemente stammen aus bestehenden oder bereits geplanten sozio-technischen (Teil-) Systemen und der dazugehörigen Dokumentation, die entweder in die Entwicklung neuer technischer Produkte oder Systeme übernommen werden oder als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer neuen Produkt- oder Systemgeneration dienen (Albers, Rapp et al., 2019; Albers & Rapp, 2022).
- (2) Die Entwicklung der *Teilsysteme* einer neuen Produkt- oder Systemgeneration erfolgt ausschließlich auf der Basis von drei Arten der Variation: *Übernahmevariation*, *Ausprägungsvariation* und *Prinzipvariation* (Albers et al., 2015a; Albers & Rapp, 2022).

Bei der Übernahmevariation (ÜV) werden sowohl die Gestalt als auch das Prinzip des Teilsystems aus dem Referenzsystemelement, unter einer gegebenenfalls notwendigen Anpassung der Schnittstellen, in die neue Generation übernommen. Im

Modell der SGE wird der Variationsoperator Ausprägungsvariation (AV) anstelle des Variationsoperators Gestaltvariation (GV)<sup>8</sup> eingeführt. Bei der AV werden die Elemente und Verknüpfungen des referenzierten Teilsystems grundsätzlich beibehalten, wobei deren Ausprägungen, zumindest teilweise, verändert werden. Bei der Prinzipvariation (PV) wird neben der Gestalt auch das grundlegende Lösungsprinzip verändert. Die zuvor beschriebenen Zusammenhänge werden in Abbildung 2.5 anhand eines Beispiels verdeutlicht.

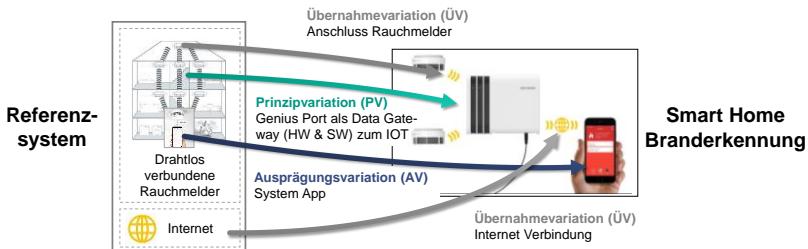


Abbildung 2.5: Vereinfachte Darstellung der drei Variationsarten ÜV, PV und AV im Modell der SGE am Beispiel der Entwicklung eines Rauchwarnmeldesystems (Albers & Rapp, 2022, S. 31)

Im Modell der SGE werden Produktgenerationen mit  $G_i$  bezeichnet, wobei  $i \in \mathbb{N}$ . Die aktuell zu entwickelnde Generation wird als  $G_n$  ( $i = n$ ) deklariert, wonach die aktuell im Markt befindliche Generation als  $G_{i=n-1}$  bezeichnet wird. Im Referenzsystem der aktuell zu entwickelnden Generation ( $R_{i=n}$ ) stellt in der Regel die Vorgängergeneration  $G_{n-1}$  ein wesentliches Element dieses Referenzsystems dar. Eine Produktgeneration  $G_1$  weist nach diesem Verständnis keine direkte Vorgängergeneration auf, weshalb die Entwicklung einer ersten Produktgeneration besondere Herausforderungen mit sich bringt. Jedoch kann auch hier ein Referenzsystem gebildet werden, welches sich aus verschiedenen internen und externen Referenzsystemelementen (RSE), wie dem verfügbaren Wissen und Dokumentationen (interne RSE), oder Wettbewerbsprodukten, sowie Forschungsergebnissen (externe RSE), zusammensetzen kann. Somit kann das Modell der SGE auch für Neuentwicklungen bzw. für Entwicklungsvorhaben mit hohem Neuentwicklungsanteil Anwendung finden, bei denen keine direkte Vorgängergeneration existiert. Weiterhin werden die durch die Variationsparameter ( $V$ ) ÜV, AV und PV erzeugten Teilsysteme als  $\mathcal{US}_{i=n}$ ,  $\mathcal{AS}_{i=n}$  und  $\mathcal{PS}_{i=n}$  zusammengefasst. Mathematisch lässt sich dieser Zusammenhang wie folgt ausdrücken (Albers, Bursac & Rapp, 2017):

<sup>8</sup> Im Modell der PGE wird bei der Gestaltvariation (GV) die Gestalt des referenzierten Teilsystems verändert, wobei das Lösungsprinzip aber erhalten bleibt.

$$R_{i=n} \xrightarrow{V} G_{i=n} = \dot{U}S_{i=n} \cup AS_{i=n} \cup PS_{i=n} \quad 2.1$$

Im Zuge der Entwicklungstätigkeiten und basierend auf dem kontinuierlichen Kreislauf aus Analyse und Synthese, können auch sogenannte Entwicklungsgenerationen ( $E_{n,m}$ )<sup>9</sup> geplant werden, welche iterativ bis zum finalen Produkt weiterentwickelt werden (siehe Abbildung 2.6). Dabei bietet es sich im Hinblick auf eine möglichst frühe Validierung an, zunächst nur die kritischen Teilbereiche als Neuentwicklung (PV, AV) und das Restsystem mit einem hohen Anteil an Übernahmevariation zu gestalten. Somit kann eine schnellere prototypische Umsetzung des Gesamtsystems erfolgen, welche im kontinuierlichen Analyse-Synthese-Kreislauf der Validierung weiterentwickelt wird. (Albers, Bursac & Rapp, 2017; Albers & Rapp, 2022)

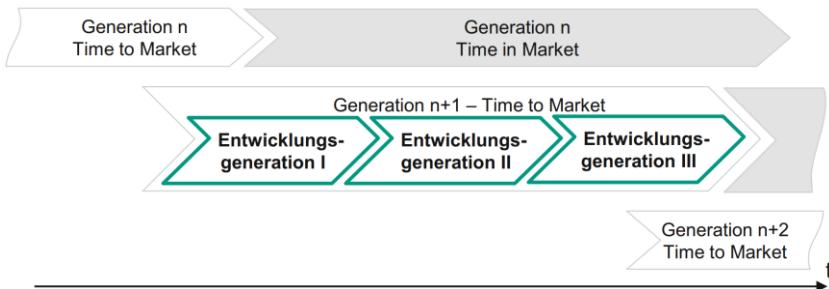


Abbildung 2.6: Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE bzw. SGE (Albers, Bursac & Rapp, 2017, S. 29)

Eine Erhöhung des Anteils an Attribut- und Prinzipvariation erhöht zwar tendenziell das Entwicklungsrisiko, jedoch kann nicht pauschal davon ausgegangen werden, dass bestimmte Variationsarten ein höheres oder niedrigeres Entwicklungsrisiko mit sich bringen, weshalb eine dahingehende Bewertung im Kontext des spezifischen Entwicklungsprojektes erfolgen muss (Albers & Rapp, 2022, S. 34). Zudem übt die Herkunft der Referenzsystemelemente einen entscheidenden Einfluss auf das Entwicklungsrisiko aus. So weist die Nutzung interner RSE, aufgrund der besseren Dokumentation und Wissensbasis, ein deutlich geringeres Risiko gegenüber der Nutzung externen RSE auf (Albers, Rapp et al., 2017; Albers, Rapp et al., 2019; Albers & Rapp, 2022).

<sup>9</sup> Mit  $n =$  aktuelle Generation. Persönliche Ergänzung:  $m =$  Index der Entwicklungsgeneration, mit  $m \in \mathbb{N}$ .

Basierend auf den vorgestellten Arbeiten lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass eine gute Übertragbarkeit des Modells der SGE nach ALBERS auf die Entwicklung von Spritzgussprodukten und -werkzeugen besteht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auch in diesem Kontext zumeist in Generationen entwickelt und das Modell der SGE selbst ohne direkte Vorgängergeneration anwendbar ist. Zudem wird auch bei der Werkzeugentwicklung häufig auf Referenzen zurückgegriffen. So mit kommt der *bewussten* Bildung und Nutzung eines *Referenzsystems im Modell der SGE* durch den Entwickler eine besondere Bedeutung zu. Auf die Verbindung zwischen der Entwicklung des Produktes und der dazugehörigen Werkzeuge wird im Verlauf der Arbeit noch detaillierter eingegangen (siehe Abschnitt 2.2). Typische Referenzsystemelemente in der Werkzeugentwicklung können Vorgängerwerkzeuge oder die oft eingesetzten Baukastensysteme sein, welche Standardelemente wie Platten, Anguss-, Entformungs- oder Führungselemente beinhalten. In der Regel weisen speziell die formgebenden Elemente einen höheren Neuentwicklungsanteil (AV, PV) auf, da diese auf das zu fertigende Produkt ausgerichtet sein müssen (vgl. Emmerich, 2014, S. 33). Hingegen findet die Integration bestimmter Werkzeugfunktionen, wie die Entformung, die Werkzeugkühlung (abgesehen vom Verlauf der Kühlkanäle) oder die Integration von Messsystemen häufig in Form einer ÜV statt. Auf Basis dieser Gegebenheiten wird in dieser Arbeit das Modell der SGE als grundlegendes Beschreibungsmodell der Produktentwicklung in der Unterstützung des AT herangezogen.

### **2.1.2.2 Integriertes Produktentstehungsmodell - iPeM**

Das *integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)* ist ein generisches Metamodell, welches die Ableitung situationsspezifischer Produktentwicklungsprozesse und deren Modellierung ermöglicht (Albers & Braun, 2011a). Basierend auf der Systemtheorie nach Ropohl (1975) und dem erweiterten ZHO-Modell nach ALBERS (vgl. Abschnitt 2.1.1) beschreibt das iPeM die kontinuierliche Interaktion zwischen Ziel-, Handlungs- und Objektsystem, wobei das Zielsystem durch das Handlungssystem in das Objektsystem überführt wird. Das Zielsystem enthält explizite Ziele sowie deren Abhängigkeiten und Randbedingungen an das zu entwickelnde Produkt. Das Objektsystem enthält sämtliche während der Überführung anfallenden Dokumente und Artefakte. Am Ende des Produktentwicklungsprozesses entspricht das Objektsystem schließlich dem Produkt. Für die iterative Überführung stellt das sozio-technische Handlungssystem die notwendigen Ressourcen (z.B. Personal, Maschinen, Budget usw.), sowie strukturierende Aktivitäten, Methoden und Prozesse zur Verfügung. Da während dieses Transformationsprozesses stetig neues Wissen generiert wird, wächst und ändert sich das Zielsystem im Laufe des Entwicklungsprozesses. (Albers & Braun, 2011a)

Der über das iPeM modellierte Produktentstehungsprozess bildet dabei nicht nur die zu entwickelnde *Produktgeneration*, sondern auch das zugehörige *Produktions- und Validierungssystem* sowie die *Unternehmensstrategie* auf eigenen, parallelisierten Ebenen ab, welche durch ein gemeinsames Ressourcensystem miteinander verbunden sind (siehe Abbildung 2.7). Die Modellierung verschiedener Produktgenerierungen auf eigenen Ebenen ist ebenfalls möglich. So können Abhängigkeiten beschrieben werden und es wird eine produkt- und prozessübergreifende Ressourcenplanung ermöglicht. Allen Ebenen liegen dieselben Aktivitäten der Produktentstehung zugrunde. So wird in der Ebene „Validierungssystem“ die Entwicklung von Elementen zur Validierung des Produktes (z.B. die Entwicklung und Realisierung eines Prüfstandes) und in der Ebene „Produktionssystem“ alle Vorgänge zur Entwicklung, Aufbau und Nutzung des Produktionssystems beschrieben. Zusammenhänge zwischen Produkt und Unternehmensstrategie lassen sich über die Ebene „Strategie“ abbilden, was zum Beispiel das Geschäftsmodell, das Marketing oder die Steuerung der Entwicklungsstrategie beinhalten kann. (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

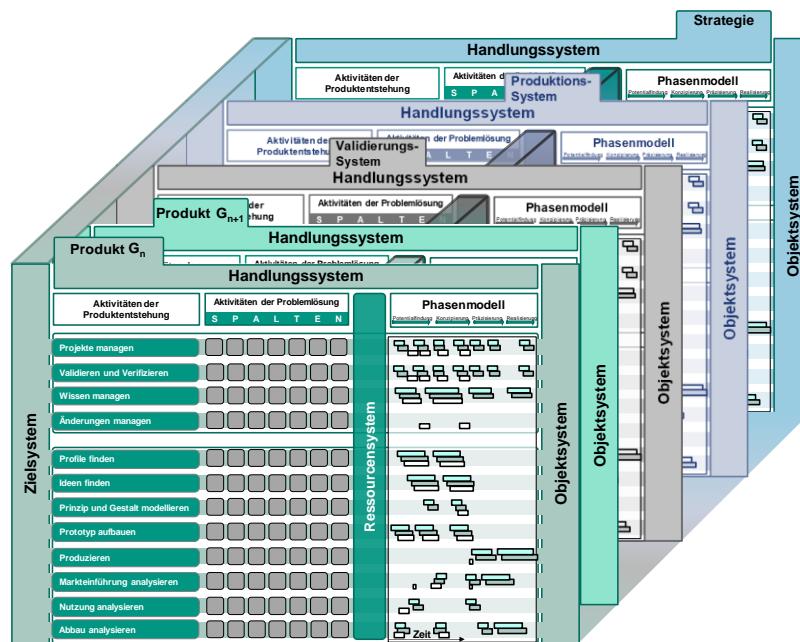


Abbildung 2.7: Das integrierte Produktentstehungsmodell - iPeM (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

Das Handlungssystem jeder Ebene wird im iPeM in eine *Aktivitätenmatrix*, das ebenenübergreifende *Ressourcensystem* und das *Phasenmodell* gegliedert. Innerhalb der Aktivitätenmatrix wird weiterhin in die *Aktivitäten der Produktentstehung (Makro-Aktivitäten, senkrecht abgebildet)* und *Aktivitäten der Problemlösung (Mikro-Aktivitäten, waagerecht abgebildet)* unterschieden. (Albers & Braun, 2011a; Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

Die Aktivitäten der Produktentstehung bestehen wiederum aus *Basis- und Kernaktivitäten*, welche die Handlungsfelder der Produktentstehung aus Sicht des Entwicklers darstellen. Die Kernaktivitäten sind layerspezifisch und führen direkt zu einer Erhöhung des Produktreifegrades. Im Layer *Produkt* bestehen die Kernaktivitäten aus: *Profile finden, Ideen finden, Modellierung von Prinzip und Gestalt, Prototyp aufbauen, Produzieren, Analyse der Markteinführung, Analyse der Nutzung und Analyse des Abbaus*. Die Basisaktivitäten hingegen sind in allen Layern gleich. Sie werden parallel und regelmäßig wiederkehrend zu den Kernaktivitäten durchgeführt und dienen der Unterstützung, Verbesserung und Absicherung des Produktentwicklungsprozesses. Zu ihnen gehören: *Projekte managen, Validieren und Verifizieren, Wissen managen und Änderungen managen*. Zur Durchführung der Basisaktivität *Validieren und Verifizieren* bedarf es Prototypen, welche durch die Kernaktivität *Prototyp aufbauen* erzeugt werden. Da die Validierung kontinuierlich durchgeführt wird, liegen auch sich stetig ändernde Reifegrade vor, weshalb in der Regel verschiedene Arten virtueller oder physischer Prototypen genutzt werden. (Albers & Braun, 2011a; Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016)

Die Aktivitäten der Problemlösung werden nach dem Problemlösungsprozess *SPALTEN* (siehe Abschnitt 2.1.2.3) durchgeführt und situationsspezifisch mit geeigneten Methoden unterstützt (Albers & Braun, 2011a). Das Phasenmodell dient der Visualisierung des zeitlichen Verlaufs der Aktivitäten anhand des Referenz-, SOLL- und IST-Prozesses (Albers, Reiss, Bursac & Richter, 2016).

### **2.1.2.3 Problemlösungsprozess „SPALTEN“**

Nach Albers, Burkhardt, Meboldt und Saak (2005), Ehrlenspiel und Meerkamm (2017, S. 74–77) und Bender und Gericke (2021, S. 28–32) können einzelne Phasen der Produktentwicklung, sowie auch der Produktentwicklungsprozess im Ganzen, als eine Aneinanderreihung vieler zu lösender Probleme betrachtet werden. Ein Problem stellt dabei eine Diskrepanz zwischen einem wenig bekannten Anfangszustand (Ist-Zustand) und dem gewünschten Endzustand (Soll-Zustand) dar, wobei beide Zustände durch den teilweise unbekannten Lösungsweg verbunden sind (ebd.). Probleme können in unterschiedlichen Komplexitätsgraden vorliegen, welche von Einflussfaktoren wie Problemart, Situation, Zeit, Person, Umfang und Information abhängen (ebd.). Eine Übersicht über praxisrelevante Problemlösungsmethoden ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

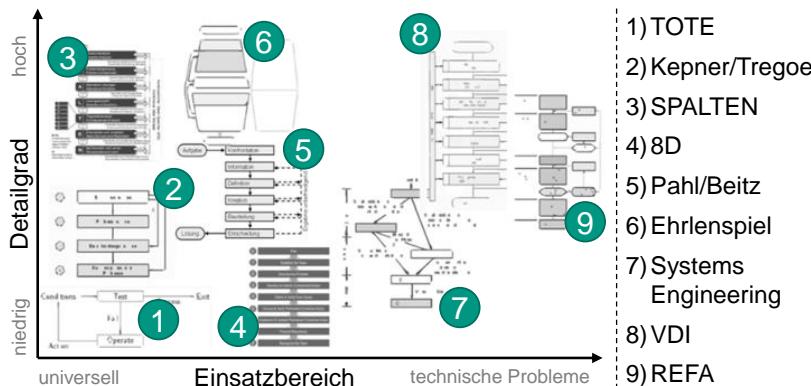


Abbildung 2.8: Einordnung verschiedener Problemlösemethoden nach Einsatzbereich und Detaillierungsgrad (in Anlehnung an Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)

Vor dem beschriebenen Hintergrund stellen Albers et al. (2005) den Problemlösungsprozess *SPALTEN* vor, der sich durch seine universelle Einsetzbarkeit und einen hohen Detailgrad kennzeichnet. Das Akronym *SPALTEN* steht für die im Folgenden beschriebenen, sequenziell durchzuführenden Arbeitsschritte (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016):

- **Situationsanalyse**: Während der Situationsanalyse werden die relevanten Informationen gesammelt und aufbereitet. Diese stellen die Grundlage für die Folgeschritte dar.
- **Problemeingrenzung**: Zur Problemeingrenzung wird das Problem auf Basis der Informationsgrundlage beschrieben und analysiert, wobei auch Problemzusammenhänge erkannt werden sollen. Somit soll der „Kern“ des Problems identifiziert werden (Hauptursache). Diese Daten bilden die Grundlage für den Soll-Ist-Vergleich.
- **Alternative Lösungen**: Für das beschriebene Problem werden möglichst viele verschiedene Lösungsalternativen erarbeitet, um den Lösungsraum vollständig abzudecken. Dieser Schritt kann durch Kreativitätstechniken unterstützt werden.
- **Lösungsauswahl**: Die erarbeiteten Lösungsalternativen werden miteinander verglichen und anhand von definierten Kriterien bewertet.
- **Tragweitenanalyse**: Die Tragweitenanalyse dient der Ermittlung und Prüfung von Chancen und Risiken der gewählten Lösung.
- **Entscheiden und Umsetzen**: In diesem Schritt erfolgt die Umsetzung der zunächst nur gedanklich bestehenden Lösung in die Realität. Dabei sind die zuvor identifizierten Chancen und Risiken zu berücksichtigen.

- **Nachbereiten und Lernen:** Im letzten Schritt wird das entstandene Wissen nachhaltig gesichert. Dazu wird der Problemlösungsprozess reflektiert und das generierte Wissen für zukünftige Prozesse dokumentiert.

Durch den fraktalen Charakter von SPALTEN lässt sich jeder Problemlösungsschritt für sich wiederum in einen eigenen SPALTEN-Prozess zerlegen, wodurch auch komplexe Probleme gelöst werden können (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016). Zudem beeinhaltet die SPALTEN-Methodik weitere Elemente. Dazu gehört die Bildung eines *Problemlösungsteams (PLT)*, welches nach jedem Schritt auf seine Zusammensetzung geprüft und gegebenenfalls angepasst werden sollte. Nach jedem Schritt findet ein *Informationscheck (IC)* statt, welcher die ausreichende Nutzung der gesammelten Informationen sicherstellen soll und prüft, ob für die Durchführung des nächsten Schrittes zusätzliche Informationen benötigt werden. Alle Ideen werden während des Prozesses im *kontinuierlichen Ideenspeicher (KIS)* gesammelt, welcher sämtlichen Teammitglieder zur Verfügung steht. (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016) In Abbildung 2.9 wird der SPALTEN-Prozess mit den beschriebenen Elementen dargestellt.

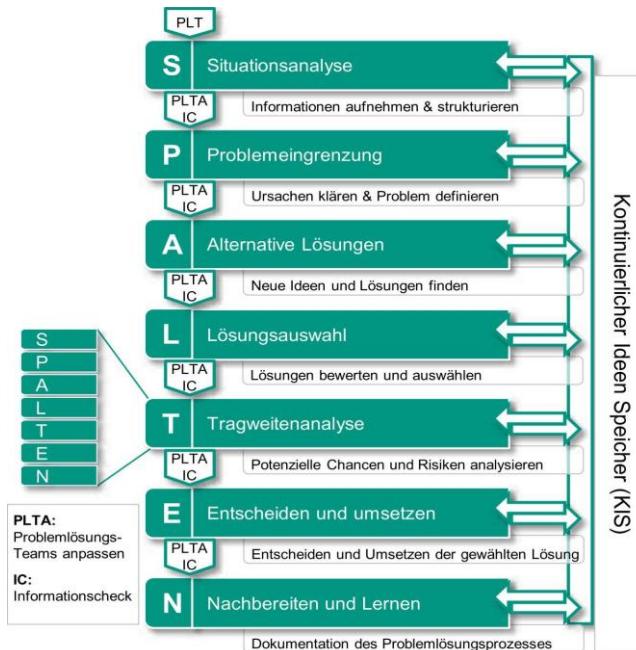


Abbildung 2.9: Der Problemlösungsprozess SPALTEN (Albers, Reiss, Bursac & Breitschuh, 2016)

Wie in Abschnitt 2.1.3 gezeigt wird, kann z.B. auch die Auswahl und Anwendung von Validierungsmethoden in einem SPALTEN-Prozess erfolgen. In dem universell einsetzbaren SPALTEN-Prozess wird zudem ein hohes Potenzial für die Übertragbarkeit auf ein systematisches Vorgehen zur Nutzung des AT gesehen. Wie in Abschnitt 6.2 beschrieben wird, basiert daher auch das systematische Vorgehen der entwickelten Unterstützung auf dem Grundgedanken und den Grundschritten des SPALTEN-Prozesses.

### 2.1.3 Prozess der Validierung in der Produktentwicklung

Die Validierung im Systemtripel des ZHO-Modells (siehe Abschnitt 2.1.1) setzt sich nach Albers et al. (2015) aus den drei Aktivitäten *Bewertung*, *Objektivierung* und *Verifikation* zusammen (siehe Abbildung 2.10). Dabei werden die Elemente des Objektsystems aus Sicht der Stakeholder überprüft, um sicherzustellen, dass die technische Umsetzung und das spätere Produkt am Markt erfolgreich sein können. Zudem müssen Ergebnisse und Ziele den eigentlichen Bedarfen und zukünftigen Anwendungsfällen gegenübergestellt werden. Es ist weiterhin notwendig, die Einflüsse der Stakeholder und die Umgebung des Produkts oder seiner Teile in geeigneten Modellen darzustellen. Die Verifikation stellt anschließend den reinen Abgleich zwischen den Elementen des Objektsystems und Zielsystems dar, um deren Richtigkeit zu überprüfen. Sie ist somit ein Teil der Validierung, welcher meist formal durchgeführt und objektiv bewertet werden kann. Die Autoren heben hervor, dass „die Validität nur durch das Zusammenspiel aller beschriebenen Teilaktivitäten erreicht werden kann“ (Albers et al., 2015, S. 76).

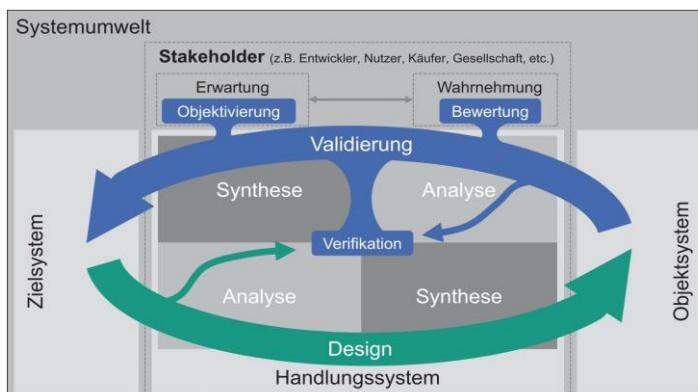


Abbildung 2.10: Validierung und Design im Produktentstehungsprozess (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 545)

Zu Beginn der Validierungsaktivität sind zunächst die *Validierungsziele* zu definieren, eine geeignete *Validierungsumgebung* zu schaffen und *Testfälle* zu planen (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 547). Zur Definition der Validierungsziele werden die Kundenanforderungen ermittelt, spezifiziert, analysiert und strukturiert (Bender & Gericke, 2021). Bei der Definition von Validierungszielen spielt zudem die Identifikation und Beschreibung der Anwendungsfälle des Produktes eine entscheidende Rolle, da sich daraus auch spezifische Anforderungen an das System und die Validierungsumgebung ergeben (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 555). Aufgrund des dynamischen Charakters von Anforderungen, sollte der Produktentwicklungsprozess (PEP) dazu von einem Requirements Management begleitet werden (Bender & Gericke, 2021, S. 211). Anschließend kann der Validierungsbedarf ermittelt und priorisiert werden. Eine Priorisierung ist notwendig, da meist nicht unendlich viele Ressourcen (z.B. Budget oder Zeit) zur Verfügung stehen (Albers, Klingler & Wagner, 2014). Über die Kritikalitätsmatrix nach Albers et al. (2014) lässt sich der Validierungsbedarf über die drei Faktoren Unsicherheit bezüglich des *Anwendungsszenarios*, der verwendeten *Technologie* sowie der *Auswirkungen* bewerten (Abbildung 2.11). Als kritisch eingestufte Teilsysteme sind entsprechend bevorzugt zu validieren (Albers et al., 2014). Weitere Methoden und Ansätze zur Unterstützung bei der Erfassung, Bewertung und Priorisierung kritischer Teilsysteme und Validierungsbedarfe bieten unter anderem die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA) und das Quality Function Deployment (QFD).

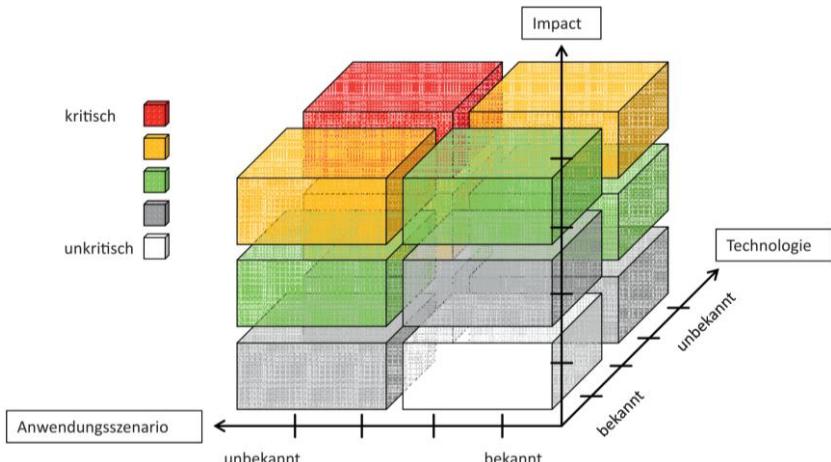


Abbildung 2.11: Kritikalitätsmatrix nach Albers et al. (2014, zitiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 552)

Schork, Güttinger und Kirchner (2020) stellen zur Ermittlung von Anforderungen an funktionelle Prototypen die Methode *House of Properties* (HoP) vor. Um die Methode möglichst anwenderfreundlich zu halten, kombinieren die Autoren bekannte Ansätze wie die FMEA, das QFD und die Kritikalitätsmatrix nach Albers et al. (2014). Die Methode baut auf den Hauptschritten Funktionsanalyse, Bauteilanalyse und Eigenschaftsanalyse auf. Die Funktionsanalyse dient der Analyse von Produktfunktionen und Identifikation kritischer Funktionen und deren Wechselwirkungen untereinander. Zudem ermöglicht sie die Bewertung der Kritikalität anhand einer modifizierten Version der Kritikalitätsmatrix nach ALBERS, bei der die Kritikalität der Funktionen „hinsichtlich ihrer Neuheit, ihrer technischen Schwierigkeit und ihrer Bedeutung für das Endprodukt bewertet“ werden (Schork et al., 2020, S. 295). Weiterhin erfolgt eine Bauteilanalyse in den Kategorien Werkstoffeigenschaften, Oberflächeneigenschaften und geometrische Eigenschaften, woraus sich schließlich auch die notwendigen Eigenschaften des zu entwickelnden Prototypen ableiten lassen. Im HoP, das sich an das House of Quality (HoQ) anlehnt, wird anschließend die Eigenschaftsanalyse durchgeführt. Dazu werden die Ergebnisse der Funktionsanalyse und Bauteilanalyse zusammengeführt, mit dem Ziel jene Eigenschaften zu ermitteln, die einen kritischen Einfluss auf die Bauteilfunktion haben. (Schork et al., 2020) Die Eintragungen im HoP stellen allerdings vielmehr eine Grundlage zur Auswahl passender Prototypen dar. So geben die Autoren lediglich an, dass kritische Systeme bevorzugt mit geeigneten physischen Funktionsprototypen validiert werden sollten, „während auf die exakte Abbildung unkritischer Eigenschaften gegebenenfalls verzichtet werden kann“ (Schork et al., 2020, S. 297). Eine Gegenüberstellung mit möglichen Prototypingtechnologien inklusiver der Betrachtung ihrer Anwendungseignung findet allerdings nicht statt. Für eine fundierte Auswahl geeigneter Prototypen sollte demnach der Einsatz weitere Methoden in Erwägung gezogen werden (siehe Abschnitt 2.1.4.2).

Der eigentliche Erkenntnisgewinn der Validierung wird letztlich durch die Durchführung von Tests innerhalb einer *Validierungsumgebung* erzielt. Nach Albers und Behrendt et al. (2016) wird der Begriff „Validierungsumgebung“ wie folgt definiert:

**Definition 2: Validierungsumgebung**

Eine Validierungsumgebung ist „eine konkrete Ausprägung des Handlungssystems zur Validierung in Bezug auf Methoden und das Ressourcensystem für eine oder mehrere Kombinationen aus einem Produkt, einem Punkt im Produktlebenszyklus und einem Validierungsziel“. (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 547)

Nach Ebel (2015) ermittelt ein Test „Systemeigenschaften eines [zu untersuchenden] Systems [...] und liefert Erkenntnisse über das System, insbesondere ob das

System zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt.“ (zitiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 554). Dabei besteht der Test immer aus einem *Testfall*, einer *Testumgebung* und einer *Testinterpretation* (Ebel, 2015, S. 136, vgl. Abbildung 2.12). In einem Testfall werden die „Randbedingungen, Eingangsgrößen und das erwartete Systemverhalten eines [zu testenden] Systems“ beschrieben (Ebel, 2015, S. 136). Ein Testfall ist immer eine verkürzte Abbildung der Realität, und kann nur spezifische Anwendungsfälle und Anforderungen abdecken (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 554). Eine Testumgebung beinhaltet nach Ebel (2015, S. 136) „die Gesamtheit aller physischen und virtuellen Modelle bzw. Originale, die notwendig sind, um einen oder mehrere Testfälle durchzuführen und das erwartete Systemverhalten zu erfassen.“ Die Testinterpretation ist der Bestandteil eines Tests, der das festgestellte Systemverhalten in Systemeigenschaften umwandelt und Erkenntnisse über das System und den Test liefert. Die Testinterpretation muss die Testumgebung berücksichtigen und die Ergebnisse mit den ursprünglichen Testzielen vergleichen, um zu beurteilen, ob das System die gewünschten Anforderungen erfüllt und der Test die gewünschten Erkenntnisse geliefert hat. (Ebel, 2015)

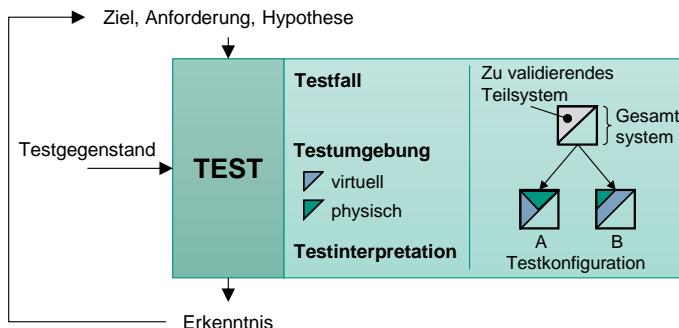


Abbildung 2.12: Darstellung der Zusammenhänge von Test, Testfall, Testumgebung und Testinterpretation (in Anlehnung an Albers, Behrendt et al., 2016, S. 555)

Entsprechend der Einzigartigkeit eines jeden Produktentwicklungsprozesses muss also auch eine Validierungsumgebung produkt- und zweckspezifisch aufgebaut und eingesetzt werden. In der Literatur finden sich zahlreiche etablierte und die Validierung unterstützende Modelle und Methoden, deren ausführliche Betrachtung jedoch den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde. Eine umfangreiche Beschreibung bekannter Modelle und Methoden, sowie deren Einbindung in den Validierungsprozess findet sich unter anderem in der Arbeit von Klingler (2016). Da existierende Ansätze

zur Validierung entweder zu generisch oder zu spezialisiert sind, beschreibt Klingler eine eigene, durchgängige Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE. Auch in Albers und Behrendt et al. (2016) findet sich eine umfangreiche Beschreibung zur Validierung und Verifikation mit einer Auswahl geeigneter Methoden. Einen weiteren ganzheitlichen Ansatz zur kontinuierlichen Validierung komplexer mechatronische Systeme bietet beispielsweise der IPEK-X-in-the-Loop-(XiL)-Ansatz. Über das XiL-Framework lassen sich die virtuelle und physische Validierung eines Teilsystems im Verbund mit dem Gesamtsystem, der Umwelt, dem Anwender und weiterer interagierender Systeme modellieren (Albers & Düser, 2010, zitiert nach Albers et al., 2014, S. 83–84).

Wie auch der Produktentwicklungsprozess als Ganzes, können die Aktivitäten der Validierung als Schritte eines Problemlösungsprozesses gesehen werden. Somit lassen sich die Kernschritte der Validierung, wie beispielsweise die Auswahl geeigneter Validierungsmethoden auch in einem SPALTEN-Prozess darstellen (siehe Abbildung 2.13, Albers, Behrendt et al., 2016, S. 550).

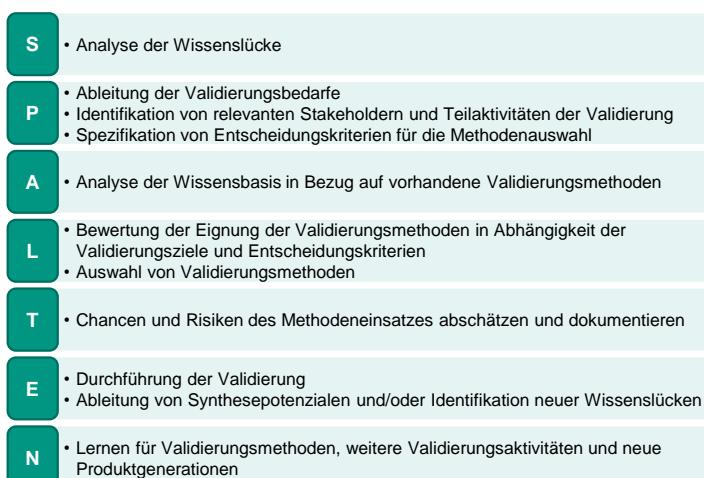


Abbildung 2.13: SPALTEN-Prozess zur Auswahl und Anwendung von Validierungsmethoden (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 550)

Weiterhin sollte auch das von Albers et al. (2015) beschriebene *Push- und Pull-Prinzip* der Validierung berücksichtigt werden, welches im Folgenden kurz beschrieben wird. Die Aktivitäten zur Entwicklung von Produktideen und -profilen, sowie deren Umsetzung in der Modellierung von Prinzip und Gestalt werden aufgrund ihres direkten Produktbezugs als primäre Aktivitäten bezeichnet. Nach dem *Push-Prinzip*

der Validierung, welches auf den klassischen, phasenorientierten Ansätzen beruht, löst erst der Abschluss dieser primären Aktivitäten den Bedarf der Validierung und damit sekundäre Aktivitäten, wie die Auswahl und den Aufbau einer Validierungs-umgebung, aus. Dieses Vorgehen birgt die Gefahr, dass nicht valide Teilsysteme und ein unüberschaubarer Validierungsbedarf sowie Iterationsschleifen entstehen. Nach dem *Pull-Prinzip* hingegen findet eine Parallelisierung von primären und sekundären Aktivitäten statt, indem bereits während der Synthese die entsprechende Validierung geplant wird. Somit ermöglicht das *Pull-Prinzip* eine Vorverlegung der Validierung im Sinne des *Frontloading* und führt zu einer bedarfsgerechteren Reduktion von Wissenslücken und Unsicherheiten. Es entstehen durch das *Pull-Prinzip* automatisch zweckgebundene Prototypen, die auf das wesentliche reduziert werden können. (Albers et al., 2015)

### **2.1.4 Prototypen in der Produktvalidierung**

Während der Produktentwicklung werden unterschiedlichste Arten von Prototypen für verschiedenste Verwendungszwecke eingesetzt. Dabei bestehen in der Literatur diverse Begriffe und Definitionen zur Bezeichnung von Prototypen, wie beispielsweise Modell, Artefakt oder Demonstrator (Ferraris, 2023, S. 11; Gebhardt, 2016). Ebenso vielseitig sind die spezifischen Bezeichnungen für die Prototypen in verschiedenen Unterkategorien, die sich in der Regel am Ziel, am Zweck, an der Fachdisziplin oder an der Prozessphase orientieren (Ferraris, 2023, S. 12). In Abschnitt 2.1.4.1 erfolgt daher zunächst eine Einordnung des Begriffs „Prototyp“. Anschließend werden in Abschnitt 2.1.4.2 Möglichkeiten zur Auswahl geeigneter Prototypen erläutert.

#### **2.1.4.1 Definitionen und Klassifizierungen von Prototypen**

Nach DIN EN ISO/ASTM 52900 ist ein Prototyp eine „physikalische Darstellung eines gesamten Produkts oder einer Komponente davon, die mit Einschränkungen für Analyse, Design und Auswertung verwendet werden kann“, wobei die Anforderungen vom konkreten Analyse- und Auswertungsbedarf abhängt (DIN EN ISO/ASTM 52900, S. 18). Formen, Matrizen oder Vorrichtungen, die für Prototypen-Zwecke eingesetzt werden, werden als Werkzeugprototyp bezeichnet (DIN EN ISO/ASTM 52900, S. 18). Nach Gebhardt (2016, S. 345) bezeichnet der Begriff Prototyp „[...] jede Art von physischem Muster, Modell oder Attrappe (Mock-Up), die geeignet ist, die Entwicklung von der Produktidee zum Produkt zu verbessern und zu verkürzen, indem sie den virtuellen Entwurf dreidimensional erfassbar macht“. Ein Prototyp entspricht nicht dem Produkt, sondern hat einen idealerweise hohen Abstraktionsgrad, so dass er nur die zu evaluierenden Funktionalitäten aufweist (Gebhardt, 2016; Lim, Stolterman & Tenenberg, 2008). Da sie nur für eine begrenzte Dauer eingesetzt

werden, sollten Prototypen zudem schnell, einfach und zu geringen Kosten verfügbar sein (Feldhusen & Grote, 2013, S. 77; Gebhardt, 2016, S. 345 f.). Prototypen werden häufig auch als Modelle bezeichnet, was auch dem Modellbegriff nach Stachowiak (1973) entspricht<sup>10</sup>, da sie ein Abbildungs-, ein Verkürzungs- und ein pragmatisches Merkmal aufweisen. In Abhängigkeit von Validierungszweck und Reifegrad können die Modelle in physischer (Prototyp), virtueller (Simulationsmodell) oder gemischter<sup>11</sup> Form auftreten (Albers et al., 2013; VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 41). Im Kontext der werkzeuggestützten Serienproduktion bezeichnet der Verband Deutscher Industrie Designer (VDID, zitiert nach Gebhardt, 2016, S. 358) ein *Muster* als Teil einer *Serie*, das keinen Abstraktionsgrad, eine hohe Detaillierung und vollen Funktionsumfang aufweist und somit den vollständigen Test aller Produkteigenschaften ermöglicht. Nach dieser Definition lassen sich Muster eindeutig von oben genanntem Verständnis von Prototypen abgrenzen. Je nach Phase oder Zweck lassen sich Prototypen verschiedenen Modellklassen zuordnen, wobei in der Literatur jedoch keine einheitliche Klassifizierung vorherrscht. Typische Modellklassen werden unter anderem in der VDI-Richtlinie 3405 genannt, wonach Modelle in die Klassen Konzeptmodelle, Geometrie- oder Funktionsprototypen und technische Prototypen unterteilt werden (zitiert nach Gebhardt, 2016, S. 359). In dieser Einteilung dienen Konzeptmodelle überwiegend der Überprüfung des äußeren Erscheinungsbildes. Sie ermöglichen die frühe Realisierung eines physischen Produktmodells, weisen aber einen sehr hohen Abstraktionsgrad auf und entsprechen hinsichtlich Material, Maßen und Funktion nicht dem Produkt. Geometrieprototypen ermöglichen hingegen bereits eine Beurteilung von Maß, Form und Lage. Mit Funktionsprototypen lassen sich bereits Teifunktionen des zu entwickelnden Produktes überprüfen. Der technische Prototyp unterscheidet sich in seinen Eigenschaften kaum noch vom zu entwickelnden Produkt, kann aber durch ein anderes Fertigungsverfahren hergestellt worden sein. (Gebhardt, 2016, S. 359)

Kampker, Förstmann, Ordung und Haunreiter (2016) führen zusätzlich zu den klassischen Modellklassen den Begriff der *agilen Prototypen* ein. Im Gegensatz zu klassischen Prototypen unterliegen diese keiner starren Umsetzungsplanung und werden nach Bedarf entwickelt. Agile Prototypen sind somit „phasenadäquat auf das Wesentliche reduzierte Versuchsmodelle späterer Serienprodukte“, die „auf definierte Prüfzwecke spezifisch hin“ entwickelt werden, um der Dynamik von Entwicklungsprojekten und Planungsunsicherheiten entgegenwirken zu können. Durch ihre einfache Realisierbarkeit sollen agile Prototypen ein schnelleres Ausprobieren alternativer Lösungen ermöglichen und durch Versuch und Irrtum zu einem früheren Wissensaufbau beitragen. (Kampker et al., 2016, S. 75)

---

<sup>10</sup> Siehe Kapitel 2.1.2, S. 12.

<sup>11</sup> z.B. mittels Augmented Reality (AR).

### 2.1.4.2 Auswahl geeigneter Prototypen

Ein wichtiger Schritt hin zur Validierung ist die Auswahl geeigneter Prototypen. In der Regel ergeben sich durch das Validierungsziel und den Testzweck unterschiedliche Anforderungen an einen Prototypen (Albers, Behrendt et al., 2016; Schork et al., 2020), welche die Betrachtung verschiedener Anforderungskriterien und Qualitätsmerkmale erfordern. Eine Übersicht zu möglichen Anforderungskriterien und Qualitätsmerkmalen bietet die VDI-Richtlinie 3405 (siehe Tabelle 2.1). Weiterhin muss ein Prototyp nicht nur den Anforderungen zur Erfüllung des Validierungsziels gerecht werden, sondern auch in einer akzeptablen Zeit und zu akzeptablen Kosten herstellbar sein (Schork et al., 2020).

Tabelle 2.1: Anforderungskriterien und Qualitätsmerkmale nach VDI-Richtlinie 3405

Anforderungskriterien	Relevante Qualitätsmerkmale
Gestalterische Forderungen	Größe, Maßstab, Masse, Dichte, Sichtkanten und Oberflächenstrukturen, Farben/Transparenz, Haptik, Geruch
Geometrische Forderungen	Bauteilgröße und -komplexität, Längen- und Winkelmaße, Maßtoleranzen, Form- und Lageabweichungen, Schrumpfungs- und Schwindungsverhalten, minimale Strukturen, Wände, Schlüsse und Schichtdicken
Festigkeitsforderungen	Zug-, Druck-, Biege- und Torsionsfestigkeiten, statische und dynamische Zeitstandfestigkeiten, Schlagfestigkeiten, Härte, Reibungskoeffizient, Abrieb
Thermische Forderungen	Gebrauchstemperaturbereiche, Formbeständigkeit in Wärme, Erweichungstemperaturen, spezifische Wärme, Wärmeleitfähigkeit, thermischer Längenausdehnungskoeffizient
Elektrische Forderungen	Durchschlagsfestigkeit, Oberflächen und spez. Durchgangswiderstand, dielektrische Eigenschaftswerte, Kriechstromfestigkeit
Chemische Forderungen	Brennverhalten, Toxizität, Medienbeständigkeit, Wasseraufnahme, Lebensmittelechtheit, biologische Verträglichkeit, Lichtstabilität, Lichtdurchlässigkeit
Wirtschaftliche Forderungen	Stückzahlen/Losgrößen, Fertigungszeiten/Lieferzeiten, Fertigungskosten, Zuverlässigkeit, Abfall und Entsorgungskosten

Diefenbach, Christoforakos, Maisch und Kohler (2019) weisen darauf hin, dass die Erwartungshaltung an den Prototypen je nach Interessengruppe variieren kann. So haben Ingenieure vornehmlich ein Interesse an der Sicherstellung der technischen Machbarkeit, während Designer eher an der Ermittlung und Kommunikation von Nutzerbedürfnissen in der frühen Phase der Produktentwicklung interessiert sind (Diefenbach et al., 2019, S. 1704). Dabei müssen die verwendeten Produktartefakte oder Prototypen für den integrierten Nutzer klar verständlich und interpretierbar sein, da sonst verfälschte Ergebnisse erzielt und falsche Schlussfolgerungen abgeleitet werden könnten (Bender & Gericke, 2021, S. 151).

Die *Media Richness Theory (MRT)* nach Daft und Lengel (1983) beschreibt die Auswahl eines geeigneten Kommunikationsmediums im zwischenmenschlichen Bereich. Mit der „Media Richness“ wird der potenzielle Umfang des Informationsgehaltes eines Kommunikationsmediums (z.B. E-Mail, Telefonat, Gespräch von Angesicht zu Angesicht) beschrieben. Ein zu hoher Informationsgehalt kann zu ineffizienter Kommunikation (Überkomplizierung) und ein zu niedriger Informationsgehalt zu Missverständnissen (Übervereinfachung) führen (Daft & Lengel, 1983). Die Beschreibung der MRT nach Daft und Lengel (1983) ist allerdings begrenzt auf textbasierte und verbale Kommunikation. Schmidt, Wallisch, Böhmer, Paetzold und Lindemann (2017) erweitern die MRT für die objektbasierte Kommunikation und präsentieren auf dieser Grundlage ein Modell zur Auswahl passender Prototypen. Dazu werden als Kommunikationsmedium nun Produktartefakte oder Prototypen beschrieben, welche als effektiv und effizient gesehen werden, wenn sie weder zu stark vereinfacht noch zu kompliziert aufgebaut sind. Dieser Umstand lässt sich auch als das Verhältnis von *Informationsgehalt* zu *Aufgabenkomplexität* beschreiben (Schmidt et al., 2017, S. 541; siehe Abbildung 2.14). Die Einordnung und Bewertung von Prototypen setzt dementsprechend Kenntnisse über deren Eigenschaften und den Möglichkeiten ihrer Verwendung voraus (Schmidt et al., 2017, S. 545).

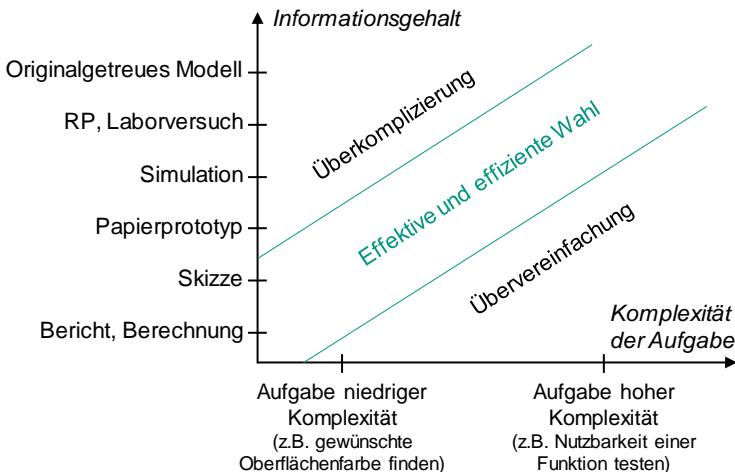


Abbildung 2.14: Einordnung von Prototypen anhand der Aufgabenkomplexität (in Anlehnung an Schmidt et al., 2017, S. 541)

Lim et al. (2008, S. 3) beschreiben Prototypen als zielgerichtet geformte Manifestationen von Designideen zur Erkundung eines Designraums mit dem Ziel der Wis-

sensgeneration. In diesem Verständnis werden die unterschiedlichen Designaspekte, die der Prototyp aufweisen kann, als *Filterdimensionen* bezeichnet. Über sie können durch die Konzentration auf bestimmte Bereiche des Designraums unnötige Aspekte des Entwurfs herausgefiltert werden. Der Filter sollte dabei immer so gewählt werden, dass der Prototyp in seiner einfachsten Form die interessierenden Eigenschaften wiedergibt, ohne jedoch das Gesamtbild zu verzerren.

Aufbauend auf diesem Verständnis führen Hochreuter, Kohler und Maurer (2013) ihr *Filter-Fidelity-Modell (FFM)* ein, welches die Kategorisierung von Prototypen anhand unterschiedlicher Dimensionen ermöglicht. Die jeweiligen Profile einzelner Prototypen werden als *Filter-Fidelity-Profile (FFP)* bezeichnet, welche die Wiedergabetreue eines Prototyps gegenüber dem Endprodukt auf einer fünfstufigen Skala von „nicht festgelegt“ bis „ausgestaltet“ darstellen. Prototypen mit hoher Wiedergabetreue werden als High-Fidelity-Prototypen und solche mit geringer Wiedergabetreue als Low-Fidelity-Prototypen bezeichnet (Kohler, Hochreuter, Diefenbach, Lenz & Hassenzahl, 2013, S. 79). Die FFP lassen sich grafisch darstellen und ermöglichen so eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Prototypen (siehe Abbildung 2.15).

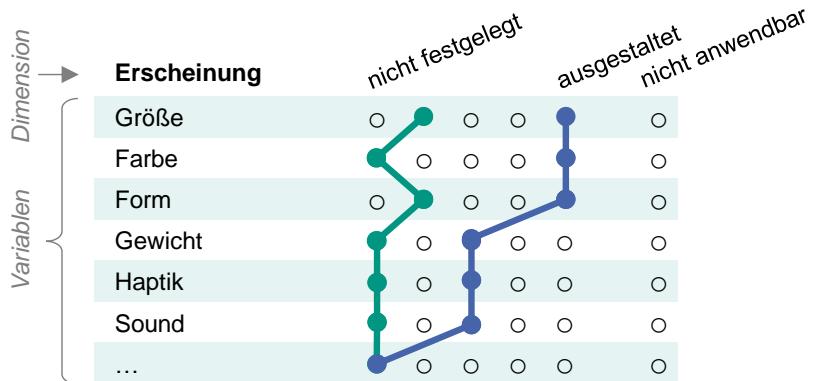


Abbildung 2.15: Das Filter-Fidelity-Modell (FFM) zum Vergleich von Prototypen nach Hochreuter et al. (2013, S. 178)

Die Darstellung der Filterdimensionen gibt einen Überblick über mögliche qualitative Eigenschaften der Prototypen und kann als eine Art Checkliste für den Umgang mit den Bestandteilen eines Prototyps dienen (Hochreuter et al., 2013, S. 170). Die Autoren schlagen bereits verschiedene Dimensionen und deren Merkmale (sog. Variablen) vor, stellen jedoch auch fest, dass die definierten Variablen zu unspezifisch

für eine konkrete Beschreibung aller einzelnen Elemente des Prototyps sind (z.B. kann ein Prototyp mehrere Elemente in verschiedenen Farben haben, wogegen nur eine Variable „Farbe“ besteht). Eine weitere Einschränkung besteht möglicherweise in der Anwendung des FFM auf sehr komplexe Systeme, für das wiederum eigene FFM für die einzelnen Teilsysteme gebildet werden müssten. Zudem sind die aus dem Software-Engineering stammenden Bezeichnungen für Dimensionen und Variablen nicht immer passend für andere Fachbereiche. (Hochreuter et al., 2013, S. 177)

Alternative Bezeichnungen für Filterdimensionen für die Anwendung des FFM zur Beschreibung physischer Prototypen könnten gegebenenfalls die in Tabelle 2.1 dargestellte Anforderungskriterien und Qualitätsmerkmalen bieten. Zudem liegt der Schluss nahe, dass bestimmte Anforderungen und Merkmale dieser Tabelle nur durch physische Prototypen mit möglichst hoher Wiedergabetreue valide abgebildet werden können.

### 2.1.5 Zwischenfazit

Wie die betrachteten Grundlagen zeigen, ist die Produktentwicklung ein iterativer Prozess aus vielen Kreations- und Validierungsschritten, der sich durch das ZHO-Modell beschreiben lässt (siehe Abschnitt 2.1.1). Dabei stellt die Validierung die zentrale Aktivität zum Wissensgewinn innerhalb der Produktentwicklung dar und sollte daher von Beginn an und kontinuierlich durchgeführt werden. Für eine erfolgreiche Produktentwicklung sollten zunächst nicht nur Kundenanforderungen, sondern das gesamte Produktprofil erfasst und somit der Validierung zugänglich gemacht werden. Aus organisatorischer Sicht besteht der Produktentwicklungsprozess aus verschiedenen interdisziplinären Haupt-, Teil- und Begleitprozessen, welche im Sinne einer effizienten Projektstruktur möglichst parallelisiert durchgeführt werden sollten. Die integrierte Produktentwicklung (IPE) berücksichtigt diese interdisziplinären Strukturen und stellt neben den Elementen der Organisation und Technik auch den Menschen und die Methodik in das Zentrum der Produktentwicklung. Als praktisch anwendbares Modell der IPE wurde daher das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) nach ALBERS eingeführt (siehe Abschnitt 2.1.2.2), welches auf dem ZHO-Modell basiert und an das in dieser Arbeit angeknüpft werden soll. Zudem können der Produktentwicklungsprozess als Ganzes, aber auch seine Teilprozesse als zu lösende Probleme verstanden werden. Entsprechend stellt auch der Validierungsprozess mit AT ein solches Problem dar. Daher wurde mit dem SPALTEN-Prozess eine Problemlösemethode vorgestellt (siehe Abschnitt 2.1.2.3), welche bereits Bestandteil des iPeM ist und, aufgrund der breiten Anwendbarkeit und ihres fraktalen Charakters, für die Entwicklung der Unterstützung berücksichtigt wird.

Da bereits festgestellt wurde, dass Produkte selten von Grund auf neu entwickelt werden und in der Regel auf den Elementen eines Referenzsystems basieren, soll die zu entwickelnde Unterstützung zudem auf dem Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung (siehe Abschnitt 2.1.2.1) und seinen Grundhypothesen aufbauen. Zudem wurde das Pull-Prinzip der Validierung vorgestellt (siehe Abschnitt 2.1.3), welches eine frühere und bedarfsgerechtere Validierung unterstützt. Da der Validierungsprozess nach dem Pull-Prinzip in der Lage sein muss, agil auf Validierungsanforderungen zu reagieren, sollte auch die methodische Unterstützung des AT auf diese Anforderung ausgerichtet sein.

Aufgrund der Einzigartigkeit eines jeden Produktentwicklungsprozesses muss auch eine Validierungsumgebung mit AT-Anwendung produkt- und zweckspezifisch aufgebaut und eingesetzt werden. Die ersten Schritte eines systematischen Vorgehens sollten daher die Konkretisierung der Validierungsziele und deren Priorisierung sowie die Ableitung von Testfällen sein. Eine Herausforderung im Aufbau einer geeigneten Validierungsumgebung liegt unter anderem in der Auswahl passender Prototypingtechnologien bzw. von Prototypen mit einer geeigneten Wiedergabekompetenz. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der Prototyp einerseits die gestellten Anforderungen erfüllt, andererseits aber auch auf das Wesentliche reduziert ist und somit möglichst schnell und kostengünstig erstellt werden kann. Als unterstützendes Hilfsmittel für die Bewertung und den Vergleich verschiedener Prototypen anhand der interessierenden Wiedergabedimensionen wurde das Filter-Fidelity-Modell (FFM) nach Hochreuter et al. (2013) eingeführt (siehe Abschnitt 2.1.4.2), welches zur Eignungsprüfung von AT in die zu entwickelnde Unterstützung integriert werden soll.

Um die Frage beantworten zu können, ob ein Prototyp für die Validierung geeignet ist, wird die folgende Definition eingeführt:

#### **Definition 3: Validierungseignung von Prototypen**

In dieser Arbeit gelten Prototypen als validierungsgeeignet, wenn sie eine für das *Erreichen des Validierungsziels* ausreichende *Wiedergabekompetenz* aufweisen. Die *Effizienz* eines Prototyps sowie der zugehörigen Vorgehensweise bemisst sich anhand des *zeitlichen* und *finanziellen* Aufwands, der für seine Planung, Realisierung und Anwendung erforderlich ist.

## 2.2 Spritzgießen im Kontext der Produktentwicklung

Bevor das Themengebiet des Additive Tooling behandelt und in den entsprechenden Kontext eingeordnet wird, werden in diesem Abschnitt zunächst die Grundlagen der Entwicklung und Herstellung von Spritzgussprodukten und der zu ihrer Herstellung benötigten Werkzeuge erläutert. Dazu werden zunächst die gebräuchlichen Begriffe (siehe Abschnitt 2.1.1) und Verfahrensgrundlagen des Spritzgießen (siehe Abschnitt 2.2.2) eingeführt. Anschließend wird der derzeit typische Entwicklungsablauf in der Spritzgießbranche aufgezeigt (siehe Abschnitt 2.2.3).

### 2.2.1 Definition und Begriffsbestimmung

Das *Spritzgießen* ist das am weitesten verbreitete und bedeutendste Verfahren zur Herstellung von Produkten und Bauteilen aus Kunststoff und zählt nach DIN 8580 zu den Urformverfahren (Bonten, 2020; Hopmann et al., 2017). Da sich die verarbeiteten Kunststoffe in der Regel in einem Arbeitsgang in ein fertiges *Spritzgussprodukt* (*Formteil*) umwandeln lassen, eignet es sich insbesondere zur Herstellung von Massenartikeln. Weiterhin zeichnet sich das Spritzgießen dadurch aus, dass Formteile mit hoher Qualität und hoher Reproduzierbarkeit mit keinem oder nur geringem Nacharbeitsaufwand voll automatisierbar hergestellt werden können (Hopmann, Greif & Wolters, 2021, S. 117).

Aus fertigungstechnischer Sicht stellen die produzierten *Formteile* physische *Produkte* des Fertigungsprozesses dar. Weitere geläufige Bezeichnungen sind auch „Bauteil“, „Spritzling“ oder „Spritzgussprodukt“. Der Begriff *Produkt* wird jedoch, insbesondere im Kontext der Produktentwicklung, eher mit käuflichen Waren und Dienstleistungen assoziiert. So bezeichnet der Begriff „Produkt“ nach der VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1 ein „Erzeugnis oder [eine] Leistung materieller wie immaterieller Art, das oder die allein oder als System angeboten wird, um den Bedarf am Markt sowie die Bedürfnisse von Nutzern zielgruppengerecht zu befriedigen“ (VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 8). Nach dieser Beschreibung stellt ein Produkt etwas vermarktbare und somit „Fertiges“ dar. Dabei können Produkte auch aus mehreren Elementen bestehen, welche häufig als Bauteile bezeichnet werden. Ein *Bauteil* ist nach DIN EN ISO/ASTM 52900 ein „verbundener Werkstoff, der ein Funktionselement bildet, das ein gesamtes oder einen Abschnitt eines vorgesehenen Produkts darstellen kann“ (DIN EN ISO/ASTM 52900, S. 18). Um ein einheitliches Verständnis der genannten Begriffe für den Rahmen dieser Arbeit zu schaffen, werden die folgenden Definitionen eingeführt:

#### **Definition 4: Formteil und AT-Prototyp**

- Der Begriff „*Formteil*“ wird in dieser Arbeit synonym zum Begriff „*Spritzgussprodukt*“ verwendet. *Formteile* können sowohl *Produkte* (nach VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1) als auch *Bauteile* (nach DIN EN ISO/ASTM 52900) innerhalb von Produkten darstellen.
- Mittels *AT-Werkzeugen* hergestellte *Formteile* werden in dieser Arbeit als *AT-Prototyp* bezeichnet, wenn diese der Validierung dienen.
- Gemäß dem Modell der SGE stellen *Formteile* und *AT-Prototypen* immer *Systeme* dar.

Entsprechend kann ein einzelnes *Formteil* bereits ein *vermarktbare Produkt* (z.B. Kunststoffklammer, Dübel, Eiskratzer) oder auch nur ein *Bauteil* (z.B. Zahnräder, Gehäuseteile etc.) darstellen. Ob es sich bei Formteilen um *Bauteile* oder *Produkte* handelt, hängt dabei sicherlich auch von der Sicht des Anbieters bzw. Nutzers ab. Ein Hersteller von Kunststoffzahnrädern wird seine Erzeugnisse als Produkte bezeichnen, wobei für einen Getriebehersteller diese Zahnräder Bauteile innerhalb seines Produktes darstellen.

### **2.2.2 Verfahrensgrundlagen: Spritzgießen**

In den folgenden Abschnitten werden notwendige Grundlagen und die für diese Arbeit wichtigsten Aspekte zu den im Spritzgießen eingesetzten Kunststoffen (siehe Abschnitt 2.2.2.1), dem Spritzgießprozess (siehe Abschnitt 2.2.2.2) und den dabei eingesetzten Werkzeugen (siehe Abschnitt 2.2.2.3) erläutert.

#### **2.2.2.1 Kunststoffe**

Für das Spritzgießen stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe zur Verfügung, deren Eigenschaften und Anwendungsbereiche durch Zugabe von Additiven, wie Farbstoffen, Stabilisatoren oder Weichmachern, noch stärker variiert werden können. Damit Kunststoffe erfolgreich für das Spritzgießen (oder im Additive Manufacturing oder Additive Tooling) eingesetzt werden können, müssen deren besondere Eigenschaften berücksichtigt werden, welche sich aus ihrem Aufbau ergeben. Kunststoffe bestehen aus langen Ketten von Makromolekülen (Polymeren), welche aus einem fließfähigen Zustand heraus verarbeitet werden. Sie werden in die Gruppen der *Thermoplaste*, *Elastomere* und *Duroplaste*<sup>12</sup> eingeteilt, welche sich in ihren Eigenschaften und ihrer Verarbeitbarkeit unterscheiden.

---

<sup>12</sup> Auch als Duromere bezeichnet.

*Thermoplaste* werden durch Zufuhr von Wärme verformbar und behalten ihre Form nach dem Abkühlen bei Raumtemperatur bei. Die Bindung der linearen oder verzweigten Makromoleküle basiert ausschließlich auf Nebenvalenzbindungen<sup>13</sup>, deren Bindungskräfte durch Wärmezufuhr reduziert werden können, wodurch das Aufschmelzen des Kunststoffes erreicht wird (Hopmann et al., 2018, S. 19). *Elastomere* und *Duroplaste* weißen zusätzlich Hauptvalenzbindungen<sup>14</sup> auf, weshalb sie auch als vernetzende Formmassen bezeichnet werden. Die Molekülketten zeigen im Vergleich zu Thermoplasten keine rein fadenförmigen Strukturen auf, sondern bilden untereinander chemische Bindungen, welche auch als Hauptvalenznetzwerk bezeichnet werden (Bonten, 2020, S. 35; siehe Abbildung 2.16).

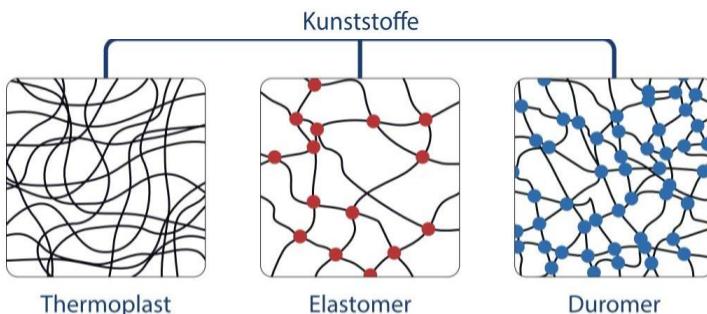


Abbildung 2.16: Unterteilung der Kunststoffe (Bonten, 2020, S. 36)

Duroplaste kennzeichnen sich durch ein engmaschiges dreidimensionales Netz mit vielen Hauptvalenzbindungen, wodurch sie bei Raumtemperatur sehr hart und spröde sind und bei erhöhten Temperaturen praktisch kein Fließen aufweisen (Hopmann et al., 2018, S. 23). Elastomere hingegen besitzen ein sehr weitmaschiges Netz mit meist regellos verteilten Molekülketten oder vereinzelten kristallinen Bereichen, wodurch sie bei Raumtemperatur ein in der Regel voll reversibles Verformungsverhalten aufweisen (Hopmann et al., 2018, S. 23). Vernetzende Formmasse härteten während der Verarbeitung vollständig aus und können wegen der Hauptvalenzbindungen nicht erneut aufgeschmolzen werden (Hopmann et al., 2018, S. 23). Werden vernetzte Kunststoffe mit einer zu hohen Temperatur beaufschlagt, besteht die Gefahr der Zersetzung (Bonten, 2020, S. 322). Zudem besitzen sie im Gegensatz zu den Thermoplasten eine sehr niedrige Viskosität, wodurch sie

<sup>13</sup> Intermolekulare physikalische Bindung. Auch als Sekundärbindung bezeichnet (Bonten (2020, S. 29 ff.)).

<sup>14</sup> Innermolekulare chemische Bindung. Auch als Atombindung, kovalente Bindung oder Elektronenpaarbindung bezeichnet (Bonten (2020, S. 29 ff.)).

auch in feinste Spalte eindringen und beispielsweise zu Gratbildung am Formteil führen können (Bonten, 2020, S. 325; Hopmann et al., 2018, S. 24). Entsprechend werden hier höhere Ansprüche an die Verarbeitungsqualität des Werkzeuges gestellt. Weiterhin gibt es auch Unterschiede in der Spritzgussverarbeitung von vernetzenden Formmassen gegenüber der Verarbeitung von Thermoplasten. So müssen die Werkzeuge zur Verarbeitung von vernetzenden Formmassen beispielsweise bis zu mehrere Minuten auf Temperaturen zwischen 180 °C bis 300 °C beheizt werden um die Vernetzungsreaktion voll abzuschließen (Bonten, 2020, S. 325). Bei der Verarbeitung von Thermoplasten hingegen erfolgt die Verfestigung durch Abkühlen im Werkzeug (Bonten, 2020, S. 290).

Die Thermoplaste bilden die bedeutendste und mengenmäßig größte Gruppe der Kunststoffe in der Spritzgussverarbeitung, welche sich weiterhin in *amorphe* und *teilkristalline* Thermoplaste untergliedern (Bonten, 2020; Hopmann et al., 2017). In *amorphen* Thermoplasten liegen die Makromoleküle aufgrund ihres Aufbaus knäuelartig um- und ineinander verschlungen vor. Bei *teilkristallinen* Thermoplasten entstehen während der Verarbeitung geordnete, kristalline Bereiche, in denen sich die Makromoleküle dicht nebeneinander legen und eine hohe Packungsdichte erzeugen. Dieser, als Kristallisation bezeichnete Vorgang, kann aufgrund der Kettenlänge der Makromoleküle allerdings nicht durchgängig stattfinden, weshalb die Bezeichnung „*teilkristallin*“ für diese Thermoplaste gilt. Diese strukturellen Unterschiede sind mit charakteristischen Besonderheiten in der Verarbeitung und Bauteilauslegung verbunden (Hopmann et al., 2018, S. 10). Die Gefügestrukturen eines Formteils hängen nämlich erheblich von den Temperaturen während des Abkühlens und der Abkühlgeschwindigkeit während der Spritzgussverarbeitung ab (Hopmann et al., 2018, S. 19). Teilkristalline Thermoplaste neigen zu hoher Schwindung und Bauteilverzug, falls die Kristallisation im Werkzeug bis zur Bauteilentformung nicht abgeschlossen ist, weswegen eine hohe Werkzeugtemperatur und eine langsamere Abkühlung des Formteils erforderlich sind (Schötz, 2019, S. 45). Wegen dieser Schwindung ist ebenfalls ein längeres Nachdrücken erforderlich, um die Volumenreduktion auszugleichen (Hopmann et al., 2018, S. 21).

In Abbildung 2.17 sind wichtige und in der Industrie häufig eingesetzte Thermoplaste wie Polystyrol (PS), Polypropylen (PP), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) oder Polyetheretherketon (PEEK) nach ihrer Leistungsklasse dargestellt.

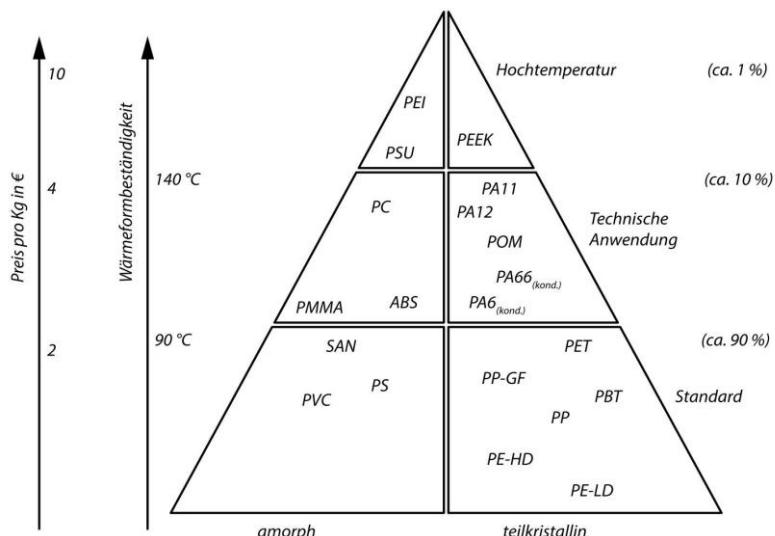


Abbildung 2.17: Übersicht und Einteilung amorpher und teilkristalliner Thermoplaste (Jaroschek, 2018, S. 9)

Wie im Verlauf dieser Arbeit noch näher erläutert wird, spielen die Funktionsweise von Thermoplasten sowie die Unterschiede zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten noch eine bedeutende Rolle, wenn es um die Wiedergabtreue der mittels AT hergestellten Prototypen geht. Dies begründet sich insbesondere in der schlechten Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Photopolymere für die additive Werkzeugfertigung und des damit verbundenen Abkühlverhaltens, als auch in den unter Umständen geringeren Drücken während des Spritzgießprozesses (siehe Abschnitte 2.3.4.2 & 5.2). Ausführlichere Betrachtungen zu Aufbau und Eigenschaften der einzelnen Thermoplaste würden an dieser Stelle stark in die Fachbereiche der Polymerchemie und Kunststofftechnik führen, die sich nur schwerlich auf wenigen Seiten erläutern ließen. Daher sei an dieser Stelle auf einschlägige Fachliteratur wie Bonten (2020) oder Hopmann et al. (2021) verwiesen. Bonten (2020) beschreibt zudem die Auswahl geeigneter Thermoplaste auf Basis eines vierstufigen Auswahlprozesses, nachdem die zur Verfügung stehenden Thermoplaste schrittweise nach thermischen, chemischen, mechanischen und zuletzt den speziellen Bauteilanforderungen eingegrenzt werden (siehe Abbildung 2.18).

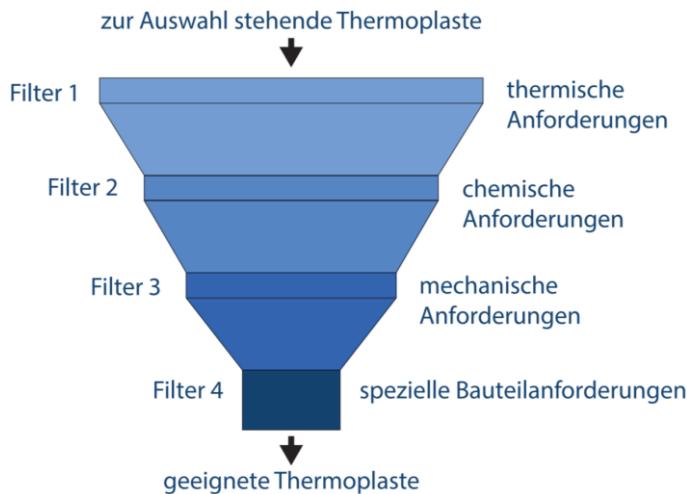


Abbildung 2.18: Schema zur Auswahl geeigneter Thermoplaste (Bonten, 2020, S. 389)

### 2.2.2.2 Spritzgieß- und Abmusterungsprozess

Der Verarbeitungsprozess thermoplastischer Kunststoffe beginnt mit dem Schließen des Werkzeuges und der Zufuhr des Materials in granularer Form über einen Trichter. In einem beheizten Zylinder wird das Material durch Wärmezufuhr und durch über die rotierende Förderschnecke erzeugte Scherwärme aufgeschmolzen. Anschließend wird die Schmelze durch einen Hub der Schnecke unter hohem Druck in den Hohlraum des geschlossenen Werkzeuges (sog. Kavität) eingespritzt. Um ein ungewolltes Öffnen des Werkzeuges und damit ein Einspritzen in die Trennebene zu verhindern, wird das Werkzeug währenddessen mit einer dem Werkzeuginnendruck entgegenwirkenden Schließkraft beaufschlagt. Die Formmasse verbleibt so lange im Werkzeug, bis sie ausreichend abgekühlt ist und entformt werden kann. Die Abkühlung erfolgt dabei ausschließlich über das Werkzeug, welches meist über ein Temperiermedium temperiert bzw. gekühlt wird. Um der Schwindung des Formmaterials entgegenzuwirken, wird während der Nachdruckphase bis zur Erstarrung des Angusses neues Material in die Kavität gedrückt. Während der Restkühlzeit kann bereits neues Material für den nächsten Zyklus plastifiziert werden. Nach ausreichender Erstarrung des Formmaterials wird das Werkzeug geöffnet und das Formteil entformt. Anschließend kann der Zyklus von Neuem beginnen. (Bonten, 2020, S. 290–293; Hopmann et al., 2018, S. 2–3)

Die Zeit zwischen der Herstellung zweier Formteile wird als Zykluszeit bezeichnet, die einen entscheidenden Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens darstellt. Im Wesentlichen hängt die Zykluszeit von der Kühlzeit, also der Abkühlzeit des Formteils und damit wiederum von der Wanddicke des Formteils ab (Hopmann et al., 2021, S. 117). In Abbildung 2.19 werden die wesentlichen Prozessschritte eines Spritzgießzyklus in zeitlicher Reihenfolge dargestellt.

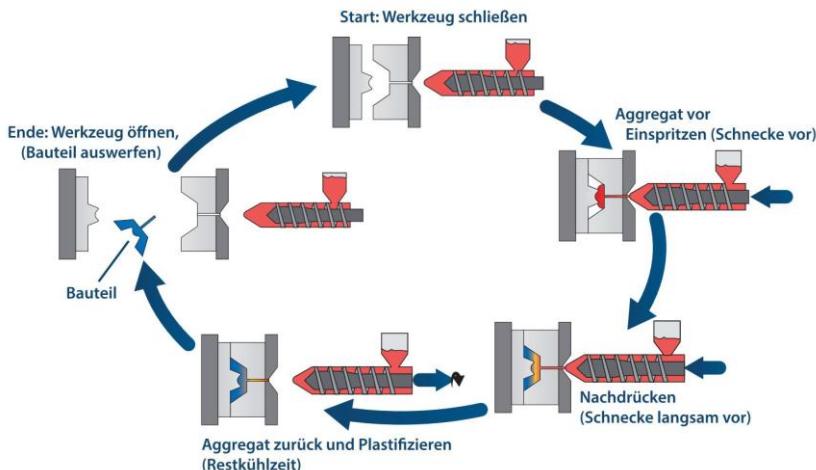


Abbildung 2.19: Wesentliche Abläufe des Spritzgießens (Bonten, 2020, S. 291)

Innerhalb des Spritzgießprozesses spielen unterschiedliche Parameter eine entscheidende Rolle für die späteren Bauteileigenschaften (Bonten, 2020; Hopmann et al., 2017; Jaroschek, 2018). Diese Größen können in direkt beeinflussbare Maschinenparameter (unabhängige Variablen), sowie indirekt beeinflussbare Prozessparameter (abhängige Variablen) unterteilt werden, wobei die Prozessparameter direkt von den Maschinenparametern abhängig sind (Bagalkot, Pons, Clucas & Symons, 2019, S. 1497). Maschinenparameter sind beispielsweise die Einspritzgeschwindigkeit, Zylindertemperatur, Nachdruck und das Schussvolumen. In Abhängigkeit davon ergeben sich Prozessparameter wie die Einspritzzeit, die Schmelze- und Werkzeugtemperatur und der Werkzeuginnendruck. Die Maschinenparameter werden üblicherweise vom Maschinenbediener während des Abmusterungsprozesses eingestellt. Der Abmusterungsprozess stellt den wichtigsten Prozess zur Inbetriebnahme und zum Produktionsbeginn dar, da er sowohl den fehlerfreien, als auch effizienten Betrieb der Spritzgießmaschine und des Spritzgießwerkzeuges sicherstellt (Schötz, 2019, S. 1).

Zwar können durch Berechnung oder eine Spritzgießprozesssimulation bereits initiale Parameter ermittelt werden, die genaue Identifikation und Einstellung der optimalen Parameter erfolgt jedoch während des Abmusterungsprozesses direkt an der Spritzgießmaschine und in der Regel auf Basis der Erfahrung des Maschinenbedieners. Dabei wird häufig nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ oder der statistischen Versuchsplanung<sup>15</sup> vorgegangen (Bagalkot et al., 2019, S. 1494; Schötz, 2019, S. 134 & 177 ff.). In der Regel werden 10 bis 100 Spritzgießzyklen gefahren, ehe Maschine und Werkzeug einen stationären Zustand erreichen (Bagalkot et al., 2019). Nach Bagalkot et al. (2019) beruht die Prozesssteuerung auf den Schlüsselvariablen Druck, Temperatur und Geschwindigkeit.

Schötz (2013) stellt einen mehrstufigen Abmusterungsprozess vor, der mit der Informationsbeschaffung und der Abmusterungsvorbereitung beginnt und im Erfolgsfall in einen Freigabeprozess oder im Misserfolgsfall in eine Nachabmusterung und einen Abmusterungskreislauf führt. Der Abmusterungsprozess dient jedoch nicht nur der Erzielung fehlerfreier und qualitativ hochwertiger Formteile, sondern auch der Sicherstellung eines energieeffizienten und wirtschaftlichen Fertigungsprozesses (Schötz, 2013, S. 6–13). Die verschiedenen Einflussfaktoren können beispielsweise in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) dargestellt und so einer systematischen Bewertung zugänglich gemacht werden (siehe Abbildung 2.20).

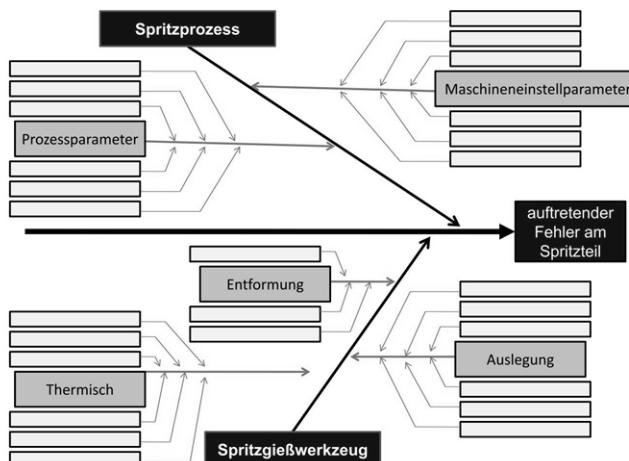


Abbildung 2.20: Fehleranalyse mittels Ursache-Wirkungsdiagramm zur Unterstützung der Abmusterungsphase (Schötz, 2013, S. 165)

<sup>15</sup> Auch bezeichnet als *Design of Experiments* (DoE).

### 2.2.2.3 Spritzgießwerkzeug

Im Mittelpunkt des Spritzgießprozesses steht das *Spritzgießwerkzeug*, dessen Hauptfunktion in der Aufnahme der Kunststoffschmelze sowie der Formgebung, dem Abkühlen und dem Entformen des Spritzgussproduktes besteht. Klassischerweise werden diese Werkzeuge zur Produktion hoher Stückzahlen aus Werkzeugstählen oder für geringere Stückzahlen auch aus Aluminium hergestellt. Das Spritzgießwerkzeug enthält die Negativform des zu produzierenden Formteils, welche als *Kavität* oder *Formnest* bezeichnet wird. Neben dieser Hauptfunktion erfüllt das Werkzeug noch diverse Nebenfunktionen, wie die Aufnahme von Kräften, die Übertragung von Bewegungen und das Führen der Werkzeugteile. Entsprechend diesen Funktionen kann der Aufbau eines Spritzgießwerkzeugs, wie in Abbildung 2.21 dargestellt, in die Funktionselemente Formnest, Angussystem, Temperiersystem, Entformungssystem und Bewegungsübertragung, Maschinen- und Kraftaufnahme, sowie Führung und Zentrierung gegliedert werden.

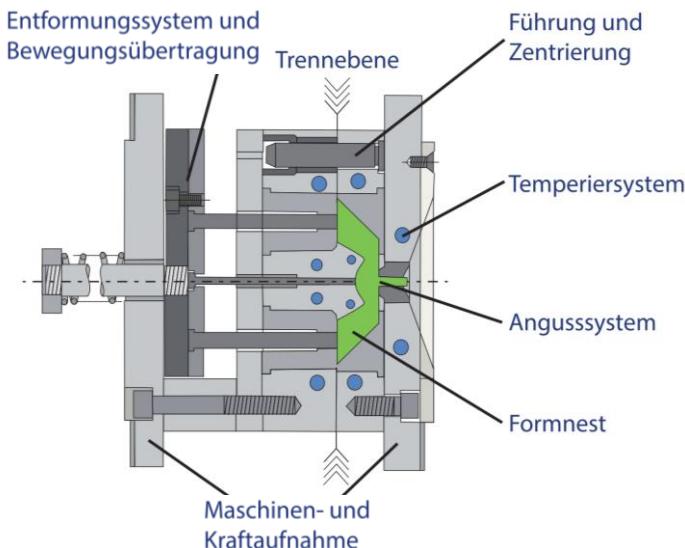


Abbildung 2.21: Funktionselemente eines beispielhaften Normalwerkzeugs (Bonten, 2020, S. 297)

In der Literatur wird zwischen verschiedenen Werkzeugkonzepten und Bauarten, wie zum Beispiel dem Normal-, Schieber-, Abstreifer-, Backen- oder Etagenwerkzeug, sowie zwischen Heiß- und Kaltkanalwerkzeugen unterschieden, wobei sich die Bezeichnung meist an spezifischen Werkzeugbauteilen, Prinzipien oder Anwendungsfällen orientiert (Hopmann et al., 2018, S. 106). Die Wahl des Konzeptes bzw.

der Bauart hängt dabei wesentlich von der Formteilgeometrie ab (Bonten, 2020, S. 297). Ein wichtiger Faktor stellt die Entformbarkeit des Formteils dar. Formteilgeometrien ohne Hinterschneidung können mit einfachen Normal- oder Abstreiferwerkzeugen hergestellt werden. Formteile mit Hinterschneidung müssen entweder zwangsentformt oder beispielsweise in einem Schieber- oder Backenwerkzeug hergestellt werden (Hopmann et al., 2018, S. 97–98). Typischerweise werden Spritzgusswerkzeuge aus Normalien (i.d.R. Zukaufteile, welche nur wenig bearbeitet werden), sowie aus speziell angefertigten Elementen (i.d.R. die formgebenden Bauteile) aufgebaut (Emmerich, 2014, S. 33). Für die konventionelle Fertigung der Werkzeuge kommen unterschiedliche, meist subtraktive Verfahren, wie das Fräsen, Bohren, Drehen, Erodieren, Polieren oder Ätzen zum Einsatz (vgl. Hopmann et al., 2018). Da Spritzgießwerkzeuge in der Regel explizit für ein einziges Formteil angefertigt werden, handelt es sich meist um teure Unikate (Hopmann et al., 2018, S. 12).

### **2.2.3 Entwicklungsablauf der Spritzgussproduktentwicklung**

In den folgenden Abschnitten wird die typische Entwicklungssituation der Spritzgussbranche (Abschnitt 2.2.3.1), die Grundlagen und Phasen der Formteil- und Werkzeugauslegung (Abschnitt 2.2.3.2), sowie die Bedeutung der numerischen Simulation in der Spritzgussproduktentwicklung (Abschnitt 2.2.3.3) erläutert.

#### **2.2.3.1 Typische Entwicklungssituation der Spritzgussbranche**

Nach Meyer und Falke (2013) lässt sich in der Kunststoffverarbeitungsbranche ein Spannungsfeld zwischen den Stakeholdern *Teilebesteller*, *Teilehersteller* und *Werkzeugbauer* beschreiben. Der Teilebesteller bzw. Auftraggeber, ist an der Produktion der Kunststoffteile interessiert, besitzt aber nach Angabe der Autoren nicht zwingend eine Expertise in der Kunststofftechnik. Entsprechend den Vorgaben des Teilebestellers entwickelt und fertigt der Werkzeugbauer das Werkzeug zur Übergabe an einen Teilehersteller an. Dieser muss mit dem zur Verfügung gestellten Werkzeug und unter Einsatz zusätzlicher Ressourcen (Personal, Material usw.) dem Teilebesteller die Teile zur vereinbarten Zeit in der vereinbarten Qualität fertigen. Die Autoren betonen das Konfliktpotenzial, welches sich aus dem Abstimmungsaufwand der Parteien ergibt und dass eine entsprechend klare und fundierte Abstimmung erfolgen muss. Bei den beschriebenen Stakeholdern muss es sich nicht um getrennte Parteien im Sinne unterschiedlicher Unternehmen handeln. In der Praxis sind verschiedene Konstellationen möglich. So kann der Teilebesteller zum Beispiel auch Teilehersteller sein oder einen eigenen Werkzeugbau besitzen. (Meyer & Falke, 2013, S. 120 f.)

Als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktion kommt dem Werkzeugbau eine Schlüsselposition in Bezug auf die Entwicklungszeit, die Produktqualität und die Produktionskosten und infolgedessen dem Erfolg des zu entwickelnden

Produktes zu (Boos, Salmen, Kelzenberg, Lange & Stracke, 2017 zitiert nach Schuh, Salmen, Kelzenberg & de Lange, 2018, S. 2). Die Auftragsabwicklung des Werkzeugbaus beginnt in der Regel jedoch erst, nachdem die Produktentwicklung beim Kunden abgeschlossen ist und alle Produktspezifikationen feststehen, sodass der Werkzeugbauer seine Kompetenzen kaum in den Entwicklungsprozess des Produktes einbringen kann (Schuh, Salmen, Kuhlmann & Wiese, 2017, S. 577). Um diese konventionelle, eher sequenziell geprägte Vorgehensweise abzulösen, schlagen Schuh et al. (2017) und Schuh et al. (2018) einen sowohl integrativen als auch iterativen Entwicklungsprozess zwischen Produktentwickler und Werkzeugbau vor. Aus Sicht des Werkzeugbauers spielen dabei das Frontloading und der Einsatz geeigneter Prototypen eine entscheidende Rolle (Schuh et al., 2017). Durch Frontloading lässt sich das Know-how des Werkzeugbauers frühzeitig in den PEP einbinden, um so fertigungsgerechte Produkte zu gestalten und Anforderungen an die Prototypenphase abzuleiten. Die nachfolgend eingesetzten Prototypen nähern sich im Entwicklungsverlauf in ihrer Wiedergabetreue stetig dem finalen Produkt an und unterstützen dabei nicht nur die Entwicklung des Produktes, sondern auch die des Serienwerkzeugs. Beim sequenziellen Vorgehen stehen seriennahe Prototypen aus einem (Prototypen) Spritzgießwerkzeug also erst zur Verfügung, wenn die Produktentwicklung nahezu abgeschlossen ist. Beim integrativen Ansatz können hingegen schon früh Prototypenwerkzeuge zum Erkenntnisgewinn eingesetzt werden, um die Produktentwicklung zu unterstützen. Da der Werkzeugbauer beim integrativen Ansatz von Beginn an in den Entwicklungsprozess des Kunden eingebunden ist, kann zudem das Werkzeug besser auf die Anforderungen des Kunden hin entwickelt werden und die Herstellzeit des Werkzeuges verkürzt, sowie der Herstellprozess in Teilen parallelisiert werden (Schuh et al., 2017, S. 579). Die Unterschiede zwischen dem klassisch sequenziellen und dem empfohlenen integrativen und iterativen Ansatz werden in Abbildung 2.22 verdeutlicht.

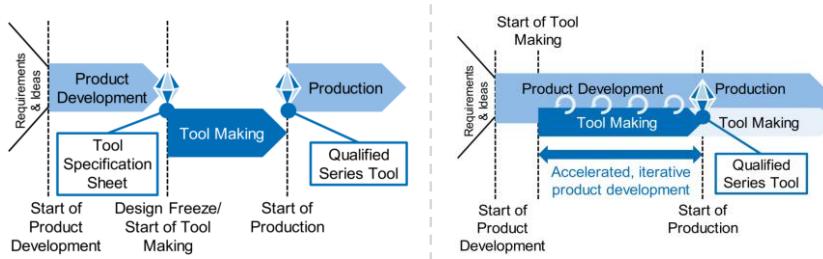


Abbildung 2.22: Klassisch sequenzielles (links) und integratives, iteratives (rechts) Vorgehen zur Entwicklung von Spritzgussprodukten und Spritzgusswerkzeugen (Schuh et al., 2018)

Auch Hopmann et al. (2018) sehen die enge Zusammenarbeit von Produktentwickler und Werkzeugbauer als Voraussetzung für eine kunststoffgerechte Formteil- und Werkzeugkonstruktion. Als Teil dieser integrativen Vorgehensweise schreiben die Autoren unter anderem dem *CAD-Modell* eine tragende Rolle zu. Auf Basis der Anforderungsdefinition und Funktionsfindung kann ein erstes Funktionsmodell erstellt werden, welches die Geometrie des Formteils enthält und die wesentliche Formteilfunktion wiedergibt. Dieses Funktionsmodell kann bereits in einer frühen Phase an den Werkzeugbauer übergeben und zur Durchführung von Simulationen und der Erstellung von Prototypen (z.B. mittels Rapid Prototyping) genutzt werden. Während der Werkzeugbau bereits mit seinen Entwicklungsschritten beginnen kann, wird das Funktionsmodell stetig weiterentwickelt und ein iterativer Kreislauf beginnt, bis die finale Gestalt des Produktes in Form des Endmodells vorliegt, auf dessen Basis das Serienwerkzeug gefertigt wird. (Hopmann et al., 2018, S. 568–569)

In diesem Zusammenhang soll auch der Ansatz des Produkt-Produktions-Co-Design (PPCD) nach Albers et al. (2022) genannt werden. Beim PPCD werden zusätzlich zur integrativen und parallelisierten Vorgehensweise bereits bestehende Produktgenerationen (siehe Modell der SGE, Abschnitt 2.1.2.1) sowie zukünftig mögliche Markt- und Technologieentwicklungen berücksichtigt. Die Autoren definieren PPCD als „die hoch vernetzte und parallelisierte Entstehung, d.h. Planung, Entwicklung und Realisierung von Produkten und dem zugehörigen Produktionssystem bis hin zum effizienten und effektiven Betrieb der Produktion und der Gestaltung zugehöriger Geschäftsmodelle sowie der strukturierten Außerbetriebnahme der Produkte und Produktionssysteme. Die Planung erfolgt dabei zwingend über mehrere Produktgenerationen und die zugehörige Produktionssystemevolution hinweg.“ (Albers et al., 2022, S. 169). Das PPCD bietet somit unter anderem die Möglichkeit zur methodischen Integration bestehenden Wissens für die Entwicklung zukunftsrobuster Produktionssysteme.

### **2.2.3.2 Spritzgussgerechte Formteil- und Werkzeugkonstruktion**

Dieser Abschnitt legt den Fokus auf die theoretischen Aspekte der Formteil- und Werkzeugkonstruktion und verzichtet bewusst darauf, spezifische Gestaltungs- oder Konstruktionsregeln zu behandeln. Ziel ist die Vermittlung eines Überblicks über die verschiedenen Prinzipien und Phasen, die bei der Konstruktion von Bau- teilen und Werkzeugen eine Rolle spielen.

Damit eine kunststoffgerechte Formteilauslegung erfolgen kann, müssen die Besonderheiten des Verarbeitungsverfahrens und die Eigenschaften der eingesetzten Materialien beachtet werden (Hopmann et al., 2017, S. 4). Ebenfalls muss bereits während der Formteilgestaltung die sich damit ergebende Gestalt der Werkzeughälften bedacht werden (Jaroschek, 2018, S. 16). Zahlreiche Gestaltungsrichtlinien und Konstruktionsregeln finden sich in einschlägiger Fachliteratur wie in Meyer und

Falke (2013), Hopmann et al. (2018) oder Jaroschek (2018). Um den besonderen Charakter der fertigungsgerechten Auslegung von Kunststoffformteilen zu verdeutlichen, werden nachfolgend einige der wichtigsten Konstruktionsgrundsätze aus Jaroschek (2018) zusammengefasst:

- Die Entformbarkeit des Formteils muss gegeben sein. Hinterschneidungen sollten möglichst vermieden werden, da diese zu einem höheren Realisierungsaufwand führen. In Abhängigkeit der Formteilgeometrie, der Beschaffenheit der Werkzeugoberfläche und des Schwindungsverhaltens des gewählten Kunststoffs müssen entsprechende Entformschrägen vorgesehen werden.
- Die Trennebene, Trennlinien von Schieberelementen, sowie die Berührfläche der Auswerfer sind meist sichtbar und fühlbar am Formteil abgebildet. Zudem verbleibt die Anspritzstelle bzw. der Anguss als sichtbarer Abrisspunkt. Um dennoch eine möglichst hochwertige Formteilqualität zu erzielen, sollten die Trennung entlang der Formteilkanten erfolgen. Zudem sollten Anspritzpunkt, Schieber und Auswerfer auf unkritische Bereiche oder die nicht sichtbare Seite verlegt werden.
- Das Auftreten von Bindenähten, die mögliche Bildung von Lufteinschlüssen und die Faserorientierung werden durch die Wahl der Angussposition bzw. des Anspritzpunktes beeinflusst.
- Da der eingespritzte Kunststoff schnell an der kalten Werkzeugwand erstarrt, sind die Fließweglängen begrenzt.
- Formteile sollten nach Möglichkeit gleichmäßig dünn ausgelegt werden und keine Masseanhäufungen aufweisen, da dies zu Verzug und Einfallstellen führen kann. Dickwandige Formteile weisen zudem eine längere Kühlzeit auf.
- Großflächige, ebene Formteile können durch Rippen, Sicken und Bombierungen steifer gemacht werden, um Verzug entgegenzuwirken.
- Eckige Geometrien erfordern oft den Einsatz von Kernen im Werkzeug und sollten daher besser verrundet werden.

Beispiele zu und Effekte von guter beziehungsweise schlechter Formteilauslegung veranschaulicht Ritter (2017) mit dem „Polyman“, einem Demonstratorbauteil für das Spritzgießen, das eine konstruktive Gut-, sowie eine Schlecht-Seite aufweist (siehe Abbildung 2.23).

Zwar wird mit diesem Beispiel unter anderem gezeigt, dass durch eine fertigungsgerechte Auslegung die Qualität des Formteils verbessert (z.B. Reduktion von Einfallstellen und Verzug) und die Komplexität des Werkzeuges reduziert werden kann (z.B. durch das Entfallen von Schieberelementen zur Entformung). Andererseits wird ersichtlich, dass dadurch auch filigrane Strukturen erzeugt werden, welche womöglich ungeeignet für das Additive Tooling sind. Wie in Abschnitt 2.3.4.2 noch aufgezeigt wird, sind insbesondere AT-Werkzeuge aus Photopolymeren empfindlich gegenüber den beim Spitzgießen auftretenden Prozessbelastungen. Entsprechend

könnte sich eine für konventionelle Werkzeuge günstige Formteilauslegung ungünstig auf das AT auswirken.

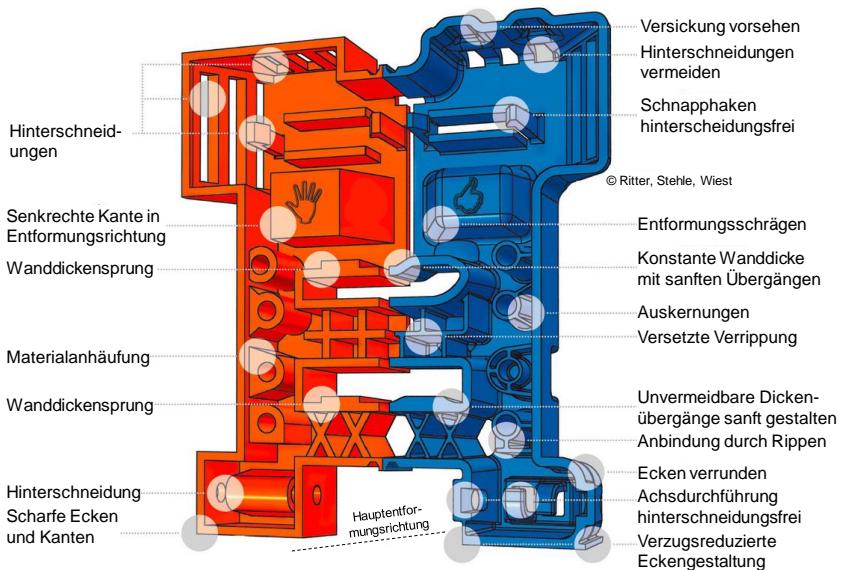


Abbildung 2.23: Wichtige Konstruktionsregeln und -tipps, veranschaulicht am Beispiel des „Polyman“ (Ritter, 2017, zitiert nach VDWF, 2023)

Neben der fertigungsgerechten Auslegung des Formteils muss aber auch eine den Produkt- und Prozessanforderungen entsprechende Auslegung und Konstruktion des Werkzeuges erfolgen. Nach Lichius und Schmidt (1986, zitiert nach Mitterlechner, 2020, S. 27) lassen sich die wesentlichen Phasen der Werkzeugerstellung in die Definitions-, die Dimensionierungs- und die Fertigungsphase untergliedern. In der Definitionsphase werden die Anforderungen an das Werkzeug, wie z.B. die Anzahl zu fertigender Teile, Qualitätsanforderungen und die Art des Werkzeugkonzeptes festgelegt. Darauffolgend findet in der Dimensionierungsphase die mechanische, rheologische und thermische Auslegung des Werkzeuges statt. Eine unsachgemäße Werkzeugauslegung kann beispielsweise zu Beschädigungen des Werkzeuges im Betrieb, zu ungenügender Formteilqualität und zu einem ineffizienten Fertigungsprozess führen. Die Fertigungsphase beinhaltet schließlich die Erstellung von Fertigungsdaten, wie Zeichnungen oder CNC-Programmen, sowie die eigentliche Werkzeugfertigung (siehe Abbildung 2.24). (Hopmann et al., 2018, S. 109)

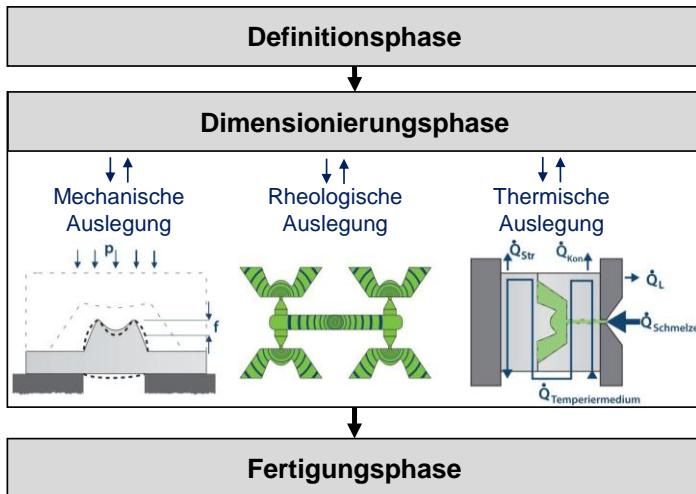


Abbildung 2.24: Phasen der Werkzeugerstellung (in Anlehnung an Lichius & Schmidt, 1986, zitiert nach Mitterlehner, 2020, S. 27, sowie in Anlehnung an Bonten, 2020, S. 298)

Die Verwendung eines Funktionsmodells unterstützt die integrative Formteil- und Werkzeugkonstruktion, so dass Entwicklungsschritte wie Formteilauslegung, Berechnung, Werkzeugauslegung und Werkzeugherstellung bis zu einem gewissen Grad parallelisiert werden können (Hopmann et al., 2018, S. 564 f.). Bei diesem Funktionsmodell handelt es sich um ein CAD-Modell, welches nach der Anforderungsdefinition und Funktionsfindung erstellt wird und welches die wesentliche Geometrie zur Definition der Formteifunktion enthält. Wie Hopmann et al. (2018, S. 99) anhand eines prinzipiellen Konstruktionsalgorithmus aufzeigen, unterliegt die Werkzeugkonstruktion einer hohen Komplexität, da die Werkzeughauptfunktionen diversen, teils wechselwirkenden Bedingungen unterliegen (siehe Abbildung 2.25). Daher betonen sie die Wichtigkeit einer systematischen Vorgehensweise zur Konstruktion.

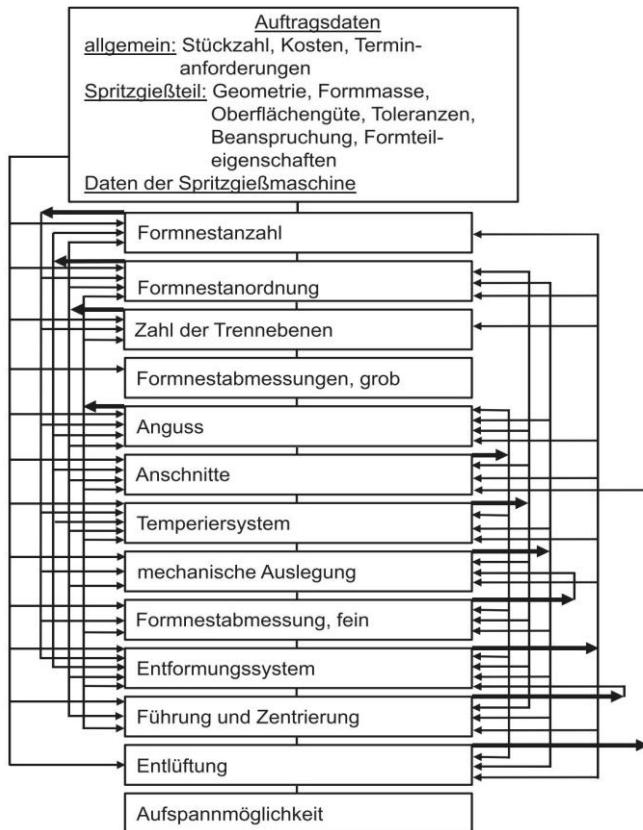


Abbildung 2.25: Zusammenfassende Darstellung eines Konstruktionsalgorithmus für Spritzgusswerkzeuge aus Hopmann et al. (2018, S. 99), der die Wechselwirkungen zwischen Werkzeugfunktionen verdeutlicht.

### 2.2.3.3 Formteil- und Werkzeugauslegung mittels Simulation

Für verschiedene Bereiche der Formteil- oder Werkzeugauslegung können zwar Berechnungen über einschlägige Formeln und Diagramme herangezogen werden, für komplexe Formteilgeometrien ist die Simulation mit entsprechender Software aber mittlerweile Standard (Hopmann et al., 2018, S. 22). Über eine numerische Simulation lässt sich der Füllprozess abbilden und hinsichtlich verschiedener Aspekte analysieren (z.B. Füllbildanalyse, Verzugsanalyse usw.). Es lassen sich zudem verschiedene Parameter wie **Kräfte** (z.B. benötigte Schließkraft), **Drücke** (z.B.

Einspritzdruck, Werkzeuginnendruck, Nachdruck), *Temperaturen* (z.B. Temperaturverteilung und Abkühlverhalten) und *Prozesszeiten* (z.B. Einspritzzeit, Nachdruckzeit, Kühlzeit und Zykluszeit) ermitteln sowie *Qualitätsmerkmale* wie Schwindung, Verzug, Bindenähte und Lufteinschlüsse bewerten. Voraussetzung für die Durchführung einer Simulation ist ein 3D-Modell, welches in der Simulationssoftware hinreichend genau vernetzt werden muss. Da für das AT ohnehin 3D-Modelle benötigt werden, bietet sich eine zusätzliche Nutzung dieser Daten für die Simulation an<sup>16</sup>. Dabei gilt es zu beachten, dass die Simulationsergebnisse von der Güte des zugrunde gelegten Materialmodells abhängen (Jaroschek, 2018, S. 166). Insbesondere bei teilkristallinen Thermoplasten liegt eine höhere Unsicherheit der Simulationsergebnisse vor, da es derzeit keine geeigneten Modelle gibt, welche die Kristallisationskinetik, also die Geschwindigkeit des Kristallisationsvorgangs in Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit, beschreiben können (Jaroschek, 2018, S. 166). Da sich bestimmte Einflussfaktoren, wie fertigungsbedingte Eigenspannungen oder zyklische Aufheiz- und Abkühlvorgänge nur schwer spezifizieren lassen, erfolgt die Auslegung eines Werkzeuges zu einem gewissen Teil auch auf praktischen Erfahrungen des Entwicklers (Meyer & Falke, 2013, S. 113). Dementsprechend ist für die in dieser Arbeit zu entwickelnde Unterstützung davon auszugehen, dass auch die Auslegung von AT-Werkzeugen in Teilen anwendungsfallspezifisches Erfahrungswissen voraussetzt.

## 2.2.4 Zwischenfazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, dass für die Entwicklung von Spritzgussprodukten und das Fertigen mittels Spritzgießen zahlreiche Faktoren zu berücksichtigen sind. Dabei stehen das Formteil, das Spritzgusswerkzeug und der Spritzgussprozess in untrennbarer Verbindung miteinander. Einer der ersten Schritte zu Konstruktionsbeginn liegt in der Festlegung eines geeigneten Formteilmaterials. Dazu wurde schematisch gezeigt, wie anhand verschiedener Filter systematisch geeignete Thermoplaste ermittelt werden können (siehe Abschnitt 2.2.2.1). Weiterhin muss bei der Entwicklung des Formteils auf eine fertigungsgerechte Auslegung geachtet werden, wobei in der Literatur bereits zahlreiche Konstruktionsregeln und -richtlinien für das konventionelle Tooling bestehen (siehe Abschnitt 2.2.3.2). Die Entwicklung eines Spritzgusswerkzeuges erfordert ebenfalls die Beachtung der verfahrensspezifischen Besonderheiten und bedarf einer mechanischen, rheologischen und thermischen Werkzeugauslegung.

---

<sup>16</sup> Auf aktuelle Forschungsarbeiten zur Simulation von AT-Werkzeugen wird in Abschnitt 2.3.4.2 näher eingegangen.

Ein Mittel zur frühen Absicherung der Konstruktion liegt in der Simulation des Formteils und des Werkzeuges im Rahmen einer Prozesssimulation (siehe Abschnitt 2.2.3.3). Dennoch kann eine absolute Sicherheit in der Regel erst während des Abmusterungsprozesses erreicht werden. Hier können initial ermittelte Parameter zudem eine Hilfestellung bieten. Die genaue Identifikation und Einstellung der Parameter findet jedoch meist erst während des Abmusterungsprozesses direkt an der Spritzgussmaschine statt. Während des Spritzgussprozesses müssen zahlreiche Maschinen- und Prozessparameter beachtet werden, welche teilweise untereinander in Wechselwirkung stehen (siehe Abschnitt 2.2.2.2). Diese bestimmen nicht nur maßgeblich die Formteileigenschaften, sondern sind auch für die Lebensdauer des Werkzeuges mitverantwortlich.

In Abschnitt 2.2.3.1 wurde gezeigt, dass dem Werkzeugbau, als Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktion, eine Schlüsselposition in Bezug auf die Entwicklungszeit, die Produktqualität und die Produktionskosten und somit auch auf den Erfolg des zu entwickelnden Produktes zukommt. Nach Schuh et al. (2017, S. 577) findet in der industriellen Praxis jedoch häufig immer noch eine getrennte Entwicklung von Formteil und Werkzeug statt. Zudem handelt es sich bei Spritzgusswerkzeugen meist um teure Unikate. Beide Gründe führen dazu, dass die Werkzeuge und damit die Möglichkeit, seriennahe Prototypen zu validieren, erst spät im Entwicklungsprozess zur Verfügung stehen, d.h. in der Regel erst dann, wenn die meisten Formteileigenschaften bereits konstruktiv festgelegt sind. In der Praxis werden daher einfacher aufgebaute Prototypenwerkzeuge eingesetzt, welche konventionell subtraktiv aus Stahl oder Aluminium hergestellt werden. Eine alternative Fertigungsmöglichkeit bietet das im nächsten Abschnitt vorgestellte *Additive Tooling*.

Mit der Beschreibung der Grundlagen zu Kunststoffen in Abschnitt 2.2.2.1 wurde aufgezeigt, dass vernetzende Formmassen (Elastomere und Duromere) besondere Anforderungen an das Spritzgusswerkzeug stellen (z.B. sehr hohe Fertigungspräzision des Werkzeuges und längere Beaufschlagung mit hohen Temperaturen). Wie im folgenden Abschnitt 2.3 noch erläutert wird, eignen sich Thermoplaste aufgrund geringerer Anforderungen an das Werkzeug eher für das Spritzgießen mit AT-Werkzeugen. Zudem sind Thermoplaste hinsichtlich ihrer Verarbeitungsmenge stärker verbreitet. Aus diesen Gründen wird folgende Eingrenzung vorgenommen:

### **Kunststoffauswahl: Thermoplaste**

Aufgrund der tendenziell geringeren Anforderungen an das Spritzgusswerkzeug und der damit besseren Eignung für das Spritzgießen mit AT-Werkzeugen wird der Fokus dieser Arbeit auf das Spritzgießen von *Thermoplasten* gelegt.

## 2.3 Additive Tooling

In diesem Abschnitt wird zunächst der Begriff des *Additive Tooling (AT)* eingeführt (siehe Abschnitt 2.3.1). Anschließend werden die Grundlagen des *Additive Manufacturing (AM)*, (siehe Abschnitt 2.3.2) und der für das AT häufig genutzten AM-Verfahren (siehe Abschnitt 2.3.3) vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf additiven Verfahren, welche auf dem Prinzip der Photopolymerisation basieren. Anschließend wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich AT unter wirtschaftlicher und technischer Betrachtung mit exemplarischen Anwendungen des AT gegeben (siehe Abschnitt 2.3.4).

### 2.3.1 Definition und Begriffsbestimmung

Der Begriff „Additive Tooling“ wird in der Literatur nicht eindeutig definiert und unterliegt auch keiner Normierung. Zudem werden verschiedene alternative Bezeichnungen verwendet.

Nach DIN EN ISO/ASTM 52900 wird die Anwendung additiver Fertigung für die Produktion von Werkzeugen oder Werkzeugkomponenten mit im Vergleich zum konventionellen Werkzeugbau geringerer Durchlaufzeit als „schnelle Werkzeugherstellung“ oder „*Rapid Tooling*“ definiert. Das Rapid Tooling (RT) kann entweder *direkt* durch den additiven Fertigungsprozess erfolgen (direktes RT) oder *indirekt* durch die Produktion von Mustern, welche dann in einem Sekundärprozess zur Werkzeugherstellung (z.B. durch Abformen) verwendet werden, um die tatsächlichen Werkzeuge herzustellen (indirektes RT). Allerdings weist diese Norm auch darauf hin, dass die Bezeichnung „*Rapid Tooling*“ ebenfalls für die Werkzeugproduktion mit reduzierten Durchlaufzeiten durch subtraktive Fertigungsmethoden, wie CNC-Fräsen usw., gilt.

Gebhardt (2016) unterscheidet zwischen der Technologie- und Anwendungsebene, wonach das Rapid Tooling eine Anwendung basierend auf der Technologie des Additiven Manufacturing darstellt (siehe Abbildung 2.26). Der Zusatz „*Rapid*“ ist nach dieser Kategorisierung bezeichnend für alle Anwendungen der additiven Fertigung, wobei weiterhin zwischen der Anwendung des „*Prototyping*“ und des „*Manufacturing*“ unterschieden wird. Nach GEBHARDT bezeichnet der Begriff Rapid Tooling „die Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen, Lehren und Formen mit Additiven Verfahren. Die Bauteile werden als Werkzeuge bezeichnet. Sie können je nach Anwendung und Verfahren Prototyp- oder Serienwerkzeuge oder deren Elemente sein.“ (Gebhardt, 2016, S. 411).

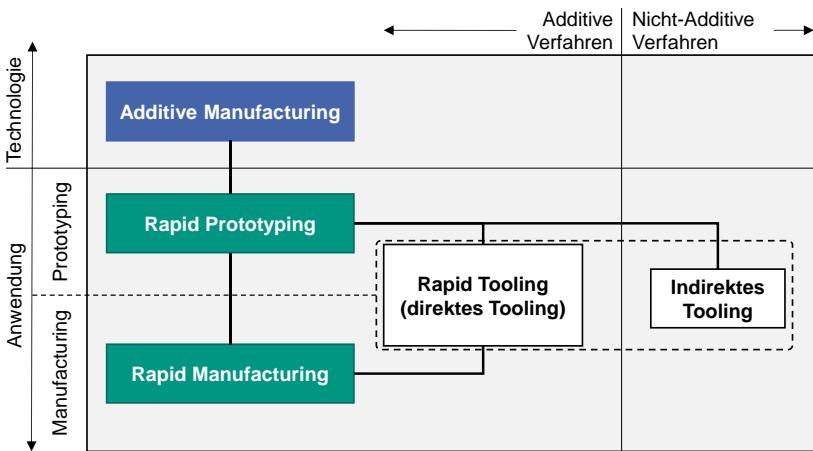


Abbildung 2.26: Klassifizierung verschiedener Anwendungen von AM und Abgrenzung von direktem und indirektem Tooling (in Anlehnung an Gebhardt, Kessler & Thurn, 2019, S. 22)

Für die additive Fertigung von Spritzgussformenätsen finden sich derzeit verschiedene Bezeichnungen. Bagalkot et al. (2019) sprechen von „*Polymer Rapid Tooling (PRT)*“, wobei hier direkt eine Eingrenzung auf polymerbasierte AM-Verfahren stattfindet. Ähnliche Bezeichnungen sind „*polymer additive injection molds*“ (Schuh, Bergweiler, Lukas & Abrams, 2020) oder „*polymer-made additive injection molds (pAIM)*“ (Schuh, Bergweiler, Lukas & Oly, 2020). Insbesondere in neueren Publikationen wird auch der Begriff „*Additive Tooling*“ verwendet (vgl. Kampker, Triebs, Kawollek & Ayvaz, 2018; Schuh, Bergweiler, Lukas & Oly, 2020). Kampker, Triebs, Kawollek und Ayvaz (2018) schlagen die Bezeichnung „*Direct Polymer Additive Tooling (DPAT)*“ vor, da sofort die Art der Werkzeugherstellung (additiv und direkt), sowie das eingesetzte Material (Polymer) ersichtlich wird. Unter *DPAT* fallen somit die Gesamtheit aller additiven Verfahren, welche die direkte Herstellung von Werkzeugen aus Polymeren ermöglichen (Kampker, Triebs, Kawollek & Ayvaz, 2018, S. 48).

#### **Definition 5: Additive Tooling (AT) & konventionelles Tooling (KT)**

In dieser Arbeit wird die Kurzform „*Additive Tooling (AT)*“ als Bezeichnung für die direkte, additive Fertigung photopolymerbasierter Spritzgusswerkzeuge verwendet. Demgegenüber steht das *konventionelle Tooling (KT)*, also die subtraktive Werkzeugfertigung.

Abbildung 2.27 zeigt beispielhaft eine einfache Systemanordnung für das AT mit Photopolymeren. Eine genaue Eingrenzung der in dieser Arbeit fokussierten AM-Verfahren erfolgt in Abschnitt 2.3.3.

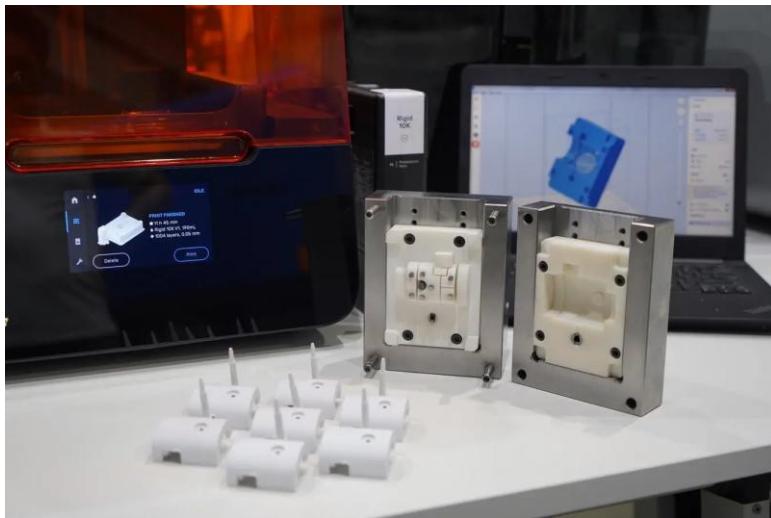


Abbildung 2.27: Beispielhafte Systemanordnung bestehend aus 3D-Druck-Software, 3D-Drucker und Stammwerkzeug mit AT-Formeinsätzen zur Herstellung von AT-Prototypen (formlabs, 2023)

### 2.3.2 Verfahrensgrundlagen: Additive Manufacturing

Zu *Additive Manufacturing* (AM, dt. *additive Fertigung* oder auch „3D-Druck“) zählen Fertigungsverfahren, welche Bauteile durch das Aneinanderfügen mehrerer Schichten erstellen (DIN EN ISO/ASTM 52900). In der Regel erfolgt dazu zunächst die Formgebung in der X-Y-Ebene (horizontale). Durch stufenweise Wiederholung dieses Vorgangs entlang der Z-Achse (vertikale) entsteht schließlich Schicht für Schicht ein dreidimensionales Bauteil. Während die so gefertigten Bauteile in der X-Y-Ebene in der Regel geometrisch recht genau gefertigt werden, entsteht entlang der Z-Ebene aufgrund der Schichtbauweise eine stufige Oberfläche (sog. „Treppenstufeneffekt“). Je niedriger die Höhe einer Schicht gefertigt werden kann, desto geringer fällt der Treppenstufeneffekt aus. Allerdings kann er bei additiven Verfahren nie ganz beseitigt werden. Gebhardt (2016, S. 22) bezeichnet den Treppenstufeneffekt deshalb als ein Charakteristikum der additiven Fertigungsverfahren. Üblicherweise erhöht sich mit sinkender Schichtstärke die Bauzeit, da dadurch die Anzahl zu fertigender Schichten erhöht wird.

Je nach Verfahren und Material kann der schichtweise Aufbau zudem zu anisotropen Bauteileigenschaften führen (Gebhardt, 2016, S. 98). Der Orientierung des additiv zu fertigenden Bauteils im Bauraum kommt daher eine besondere Bedeutung zu (siehe Abbildung 2.28).

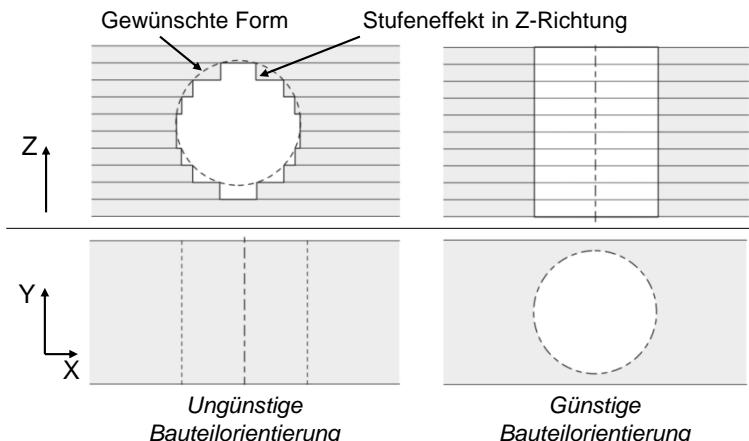


Abbildung 2.28: Einfluss der Bauteilorientierung auf die Form am Beispiel einer Bohrung (in Anlehnung an Gebhardt, 2016, S. 23)

Auf Basis des Schichtbauprinzips additiver Verfahren ist die Herstellung komplexer Geometrien möglich, die mit anderen Fertigungsverfahren nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand realisierbar sind (Gebhardt, 2016, S. 25). Der Einsatz von additiven Verfahren ist besonders vorteilhaft, wenn Bauteile eine hohe Komplexität aufweisen, in geringen Stückzahlen benötigt werden und eine schnelle Herstellung erforderlich ist (Gebhardt, 2016, S. 331 f.). Im Kontext der Fertigung von Spritzgusswerkzeugen ermöglicht dies zum Beispiel die direkte Integration von konturnahen Kühlkanälen in einer Art und Weise, wie diese konventionell nicht herstellbar sind (Gebhardt, Kessler & Thurn, 2019, S. 15). Weiterhin können solche werkzeuginternen Kanäle auch genutzt werden, um konventionelle Auswerfer durch Druckluftauswerfer zu ersetzen (Gebhardt, Kessler & Schwarz, 2019, S. 43). Wie Burggräf, Bergweiler, Abrams und Dunst (2022) zeigen, ist auch die direkte Fertigung von Oberflächentexturen möglich, welche im konventionellen Tooling in zusätzlichen Arbeitsprozessen (z.B. Lasern oder Ätzen) stattfinden würde.

Die Erstellung von 3D-Daten für die additive Fertigung kann über verschiedene Methoden wie das Reverse Engineering oder die Konstruktion erfolgen. Ausgangsba-

sis für die Übergabe in den AM-Prozess stellen immer Flächen- oder Volumenmodelle dar, welche in AM-typischen Polygon-Datensätzen wie STL, VRML oder AMF exportiert werden. Während alle AM-Maschinen mit einem STL-Datensatz betrieben werden können, benötigen die meisten CNC-Programme hingegen eine maschinen-spezifische Programmierung (Gebhardt, Kessler & Thurn, 2019, S. 164). Der AM-Prozess an sich wird in die Prozessschritte *Pre-Process* (Druckvorbereitung), *In-Process* (Bauprozess) und *Post-Process* (Nachbearbeitung) unterteilt. Datenfluss und Prozessschritte der additiven Fertigung nach der VDI-Richtlinie 3405 sind in Abbildung 2.29 dargestellt.

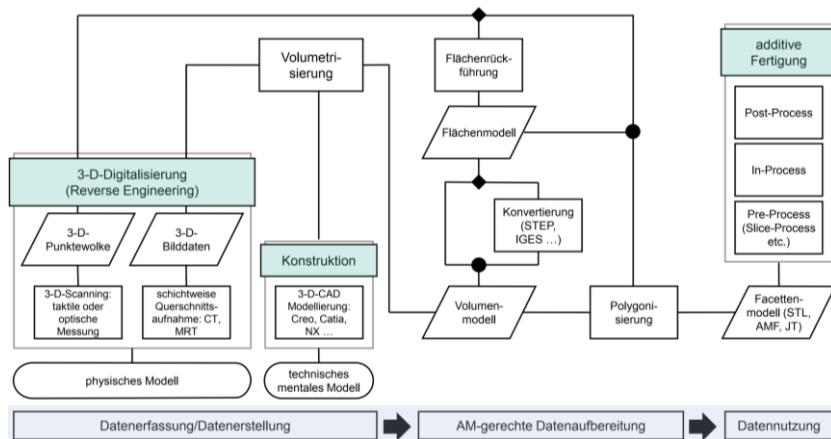


Abbildung 2.29: Datenfluss und Prozessschritte der additiven Fertigung (VDI-Richtlinie 3405, S. 24)

### 2.3.3 AM-Verfahren und AM-Materialien für Additive Tooling

Für das Additive Tooling von Spritzgusswerkzeugen kommen prinzipiell verschiedene AM-Verfahren in Frage, welche sich teils grundlegend in ihrem Verarbeitungsprinzip und den einsetzbaren Materialien unterscheiden (Equbal, Sood & Shamim, 2015). Da diese Unterschiede sich gravierend auf die Einsatzmöglichkeiten, die Prozessketten der Konstruktion, Fertigung und Anwendung, sowie eine mögliche Anwenderunterstützung auswirken, erfolgt in dieser Arbeit eine Eingrenzung auf Verfahren, welche nach dem Prinzip des lichtreaktiven Photopolymer-Aushärtens, auch als Photopolymerisation bezeichnet, arbeiten. Als Photopolymerisation<sup>17</sup> wird eine

<sup>17</sup> Auch als Polyreaktion oder Polymerbildungsreaktion bezeichnet, für weitere Informationen siehe Gebhardt 2016, S.48ff. & S. 107ff.

Kettenreaktion bezeichnet, bei der die „selektive Verfestigung eines flüssigen monomeren Harzes (des Epoxid-, Acryl- oder Vinylether-Typs) mittels ultravioletter (UV-)Strahlung“ stattfindet (Gebhardt, Kessler & Schwarz, 2019, S. 53).

Das Prinzip der (Photo)-Polymerisation wird bei allen AM-Verfahren angewendet, die auf der Verfestigung von flüssigen Monomeren beruhen. Hierbei werden zäh-flüssige oder schwach vernetzte Monomere mit Photo-Inhibitoren kombiniert. Wenn diese Monomer-Mischungen ultraviolettem Licht ausgesetzt werden, findet eine spontane Polymerisation statt, wodurch das flüssige Monomer zu einem festen Polymer (Duroplast) reagiert (Gebhardt, 2016, S. 48). In additiven Fertigungsanlagen werden so durch gezielt lokale Vernetzung schichtweise dreidimensionale, feste Objekte erzeugt. Je nach Quelle lassen sich die einzelnen AM-Verfahren in verschiedene Verfahrensgruppen einteilen. Nach DIN EN ISO/ASTM 52900 werden photopolymerbasierte AM-Verfahren entsprechend der Werkstoffverteilung („Druckkopf“ oder „Wanne“) und Prozesskategorie („Werkstoffauftrag“ oder „wannenbasierte Photopolymerisation“) eingeordnet. Eine genaue Eingrenzung der in dieser Arbeit fokussierten AM-Grundprinzipien wird in Abbildung 2.30 dargestellt.

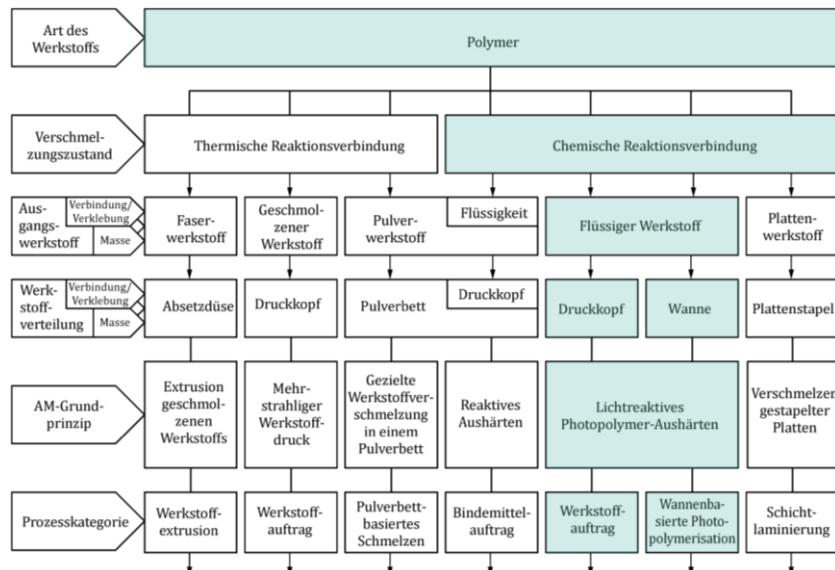


Abbildung 2.30: Eingrenzung dieser Arbeit auf die AM-Grundprinzipien des lichtaktiven Photopolymer-Aushärtens (in Anlehnung an DIN EN ISO/ASTM 52900)

Im Folgenden werden drei bekannte AM-Verfahren aus diesen Kategorien vorgestellt, welche auch meist in den zur Analyse des Standes der Forschung betrachteten Studien zu AT (siehe Abschnitt 2.3.4) eingesetzt wurden. Je nach Hersteller sind allerdings auch verschiedene Eigennamen und Variationen dieser Verfahren im Umlauf.

### 2.3.3.1 Laser-Stereolithographie (SLA)

Die *Stereolithographie (SL)* gehört zu den ältesten und zeitgleich genauesten AM-Verfahren. Oft wird dieses Verfahren auch als *SLA*<sup>18</sup> bezeichnet, wobei es sich dabei streng genommen um eine geschützte Bezeichnung handelt. Da unter der Bezeichnung „Stereolithographie“ in manchen Quellen (vgl. Gebhardt, 2016, S. 48) auch generell alle Verfahren der Photopolymerisation verstanden werden, wird in dieser Arbeit zur Abgrenzung auf die Bezeichnung „SLA“ für die Benennung der *Laser-Stereolithographie* zurückgegriffen. Die Laser-Stereolithographie wird in die Kategorien „wannenbasierte Photopolymerisation“ und „Laser-Scanner-Verfahren“ eingeordnet. Während des Fertigungsprozesses wird das flüssige Photopolymer durch einen feinen Laserstrahl ausgehärtet, welcher die Kontur des jeweiligen Querschnitts auf der Oberfläche des Photopolymerbades erzeugt (DIN EN ISO/ASTM 52900; Gebhardt, 2016, S. 48; siehe Abbildung 2.31). Nach Aushärtung einer Schicht wird die Bauplattform um eine Schichtstärke abgesenkt, bevor ein Beschichter neues Material verteilt und der Vorgang von Neuem beginnt. Während des Bauprozesses wird das Bauteil von sogenannten Stützstrukturen getragen, welche aus demselben Material bestehen und im Zuge des Post-Processing entfernt werden. Zu den weiteren Post-Processing-Schritten zählen das Reinigen und Nachvernetzen/-härten im UV-Ofen (VDI-Richtlinie 3405, S. 8–9).

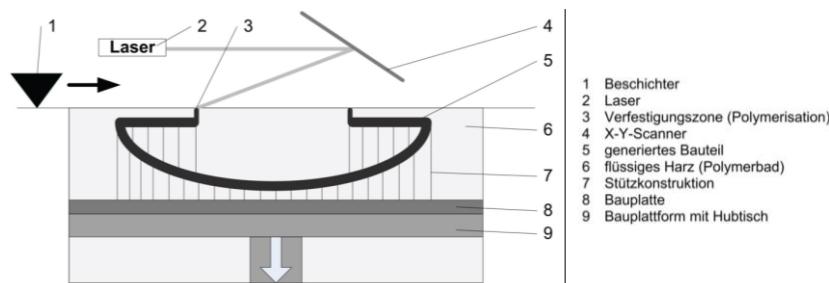


Abbildung 2.31: Prinzip der Laser-Stereolithographie (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3405, S. 8)

---

<sup>18</sup> SLA = **S**tereo **L**ithography **A**pparatus (geschützte Bezeichnung von 3D Systems Inc.).

### 2.3.3.2 Digital Light Processing (DLP)

Das *Digital Light Processing (DLP)* ist ebenfalls ein wattenbasiertes Photopolymerisationsverfahren und ähnelt der Laser-Stereolithographie (VDI-Richtlinie 3405). Allerdings wird DLP den *Maskenverfahren*, im Speziellen den *Projektionsverfahren*, zugeordnet (Gebhardt, 2016, S. 85, S. 117 f.), bei denen ein Projektor die Bauteilkontur über Umlenkspiegel auf die Oberfläche der aktuellen Schicht projiziert und diese so aushärtet. In der Regel werden die Bauteile von unten durch eine Glasscheibe belichtet und Schicht für Schicht aus dem Photopolymerbad „gezogen“ (siehe Abbildung 2.32). Da immer die komplette Bauteilkontur innerhalb der aktuellen Schicht belichtet wird, ist dieses Verfahren zeitlich unabhängig von der Bauplatzformbelegung und in der Regel schneller als SLA (Gebhardt, 2016, S. 118). Wie bei allen wattenbasierten Polymerisationsverfahren werden auch hier Stützstrukturen aus demselben Material eingesetzt. Die Bauteile müssen ebenfalls gereinigt und nachvernetzt werden. Eine ähnliche Funktionsweise besitzen die *Lampe-Maske-Verfahren*, bei denen die Bauteilkontur durch eine transparente Maske mittels starker UV-Lampen abgebildet wird. Dazu gehört beispielsweise das Verfahren *Masked Stereolithographie (MSLA)*, bei dem UV-LEDs zur Belichtung und ein LCD-Display als Maske genutzt wird.

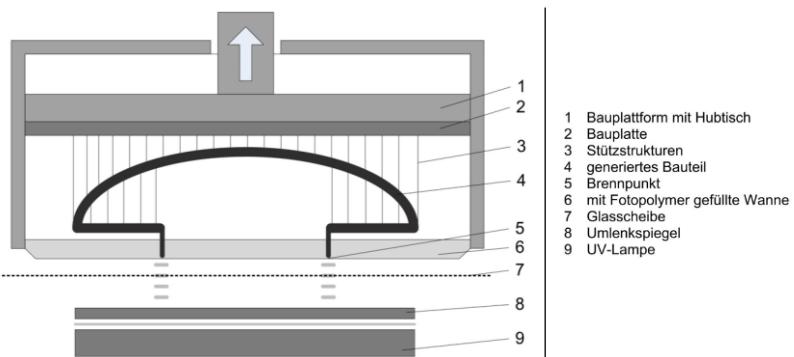


Abbildung 2.32: Prinzip des Digital Light Processing (in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3405, S. 17)

### 2.3.3.3 Poly-Jet Modelling (PJM)

Das *Poly-Jet Modelling (PJM)* ist kein wattenbasiertes Polymerdruckverfahren, sondern arbeitet durch *Werkstoffauftrag*. Es ist dem Druckkopf-Lampe-Verfahren zuzuordnen, da das flüssige Photopolymer durch einen Druckkopf (oder mehrere) entsprechend der Bauteilkontur Schicht für Schicht und in winzigen Tröpfchen Linie für Linie aufgetragen und unmittelbar im Anschluss durch UV-Lampen ausgehärtet wird.

(Gebhardt, 2016, S. 119; siehe Abbildung 2.33). Durch die Verwendung mehrerer Düsenreihen lassen sich unterschiedliche Polymergemische simultan verarbeiten. Zum einen lassen sich so Multi-Material-Bauteile erstellen und zum anderen können durch „Materialmischung“ unterschiedliche Materialeigenschaften erzeugt werden (sog. Digital-Materials). Die Materialtröpfchen werden dazu in einer Art Matrixstruktur auf der Bauplattform abgesetzt. Durch Variation dieser Struktur (z.B. „A-B-A-B-B...“ oder „A-A-B-A-A-...“) entstehen unterschiedliche Materialeigenschaften, wie etwa verschiedene Farbtöne, Shore-Härtegrade oder Festigkeiten. Zudem können Stützmaterialien eingesetzt werden, die sich nach dem Bauprozess mechanisch, mittels Wasserstrahl, chemisch, über Ultraschall oder in temperierten Reinigungsanlagen entfernen lassen (Gebhardt, 2016, S. 119).

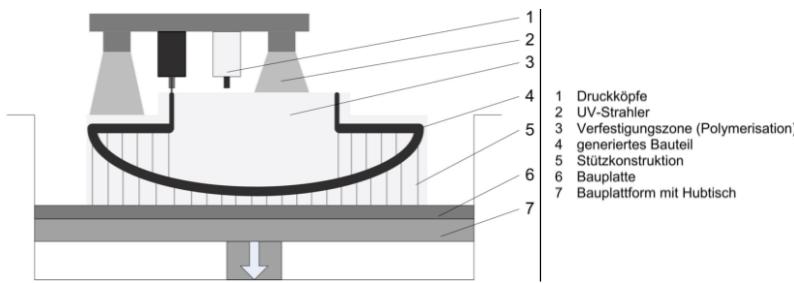


Abbildung 2.33: Prinzip des Poly-Jet Modelling (VDI-Richtlinie 3405, S. 14)

### 2.3.4 Relevante Forschungsergebnisse und Beispiele zu Additivem Tooling

Wie in Kapitel 2.2 aufgezeigt wurde, spielen diverse Faktoren, wie das Formteil- und Werkzeugdesign, das Formteil- und Werkzeugmaterial sowie die Fertigungsparameter eine entscheidende Rolle für die erfolgreiche Herstellung von Formteilen. Es ist daher eine naheliegende Annahme, dass sich die Unterschiede zwischen konventionell und additiv gefertigten Werkzeugen auf die Art ihrer Anwendbarkeit und die resultierenden Produktionsergebnisse auswirken. In verschiedenen Studien, welche diese Annahme bestätigen, wurden bereits AM-Verfahren auf der Grundlage der Photopolymerisation, wie Stereolithographie (SLA), Poly-Jet Modelling (PJM) oder Digital Light Processing (DLP) zur Herstellung von AT-Formeinsätzen untersucht. Nachfolgend wird ein Überblick über bisherige Forschungsarbeiten gegeben und deren Erkenntnisse aus *wirtschaftlicher* (siehe Abschnitt 2.3.4.1), sowie aus *technischer und technologischer* (siehe Abschnitt 2.3.4.2) Sicht betrachtet.

### 2.3.4.1 Wirtschaftliche Betrachtung

Eine Voraussetzung für den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz von AT als Prototyping-Technologie ist, dass AT-Prototypen im Vergleich zu Prototypen aus konventionell gefertigten Werkzeugen zu *angemessenen Kosten* und in *angemessener Zeit* hergestellt werden können. Während mit konventionell gefertigten Stahl- oder Aluminiumwerkzeugen hohe Stückzahlen produziert werden können, kann für eine Prototypenserie oder wenige Prototypen bereits eine deutlich geringere Werkzeugstandzeit<sup>19</sup> ausreichend sein.

Kampker, Triebs, Kawollek und Ayvaz (2018) testeten in einer Anwendungsstudie verschiedene Photopolymere zur Herstellung von AT-Formeinsätzen. Mit einem AT-Formeinsatz aus dem Material *Digital ABS* konnten 250 Formteile ohne mechanisches Versagen hergestellt werden. Ein aus *Rigur* hergestellter AT-Formeinsatz wurde nach 166 Schuss aufgrund von Materialausbrüchen unbrauchbar. Es wird zudem gezeigt, dass die Kosten der Formeinsatzerstellung im betrachteten Fall durch AT um bis zu 39 % gesenkt werden konnten. Aufgrund der längeren Zykluszeiten des AT stiegen jedoch die Kosten der Formteilerstellung um 49 %. In Summe konnten die Gesamtkosten um 15 % gesenkt werden. Die Durchlaufzeit zur Formeinsatzerstellung konnte um 43 % gesenkt werden, während die Durchlaufzeit der Formteilerstellung sich um 60 % erhöhte. Die Gesamtdurchlaufzeit reduzierte sich um 13 %. Um das mögliche wirtschaftliche Potenzial von AT voll auszuschöpfen, sind nach Ansicht der Autoren jedoch umfassende Kenntnisse über das Verhalten von Polymerwerkzeugen während des Spritzgießprozesses und deren Auswirkungen auf die Materialeigenschaften der Formteile erforderlich.

In einer weiteren Studie untersuchten Kampker, Triebs, Alves, Kawollek und Ayvaz (2018) das Potenzial von zehn verschiedenen AM-Materialien für die Anwendung des AT. Wie die Studie zeigt, unterscheiden sich die AM-Materialien hinsichtlich ihres Kosteneinsparungspotenzials sowohl gegenüber dem konventionell gefertigten Referenzwerkzeug aus Stahl als auch untereinander (siehe Abbildung 2.34). Zudem ergeben sich zwischen den verschiedenen AM-Materialien und der Nutzung verschiedener Kunststoffe für das Spritzgießen teils große Unterschiede in den Formeinsatzstandzeiten.

---

<sup>19</sup> Die Werkzeug- oder Formeinsatzstandzeit (kurz: Standzeit) ist der Zeitraum, in dem ein Werkzeug effektiv und wirtschaftlich arbeitet, bevor es gewartet, repariert oder ersetzt werden muss.

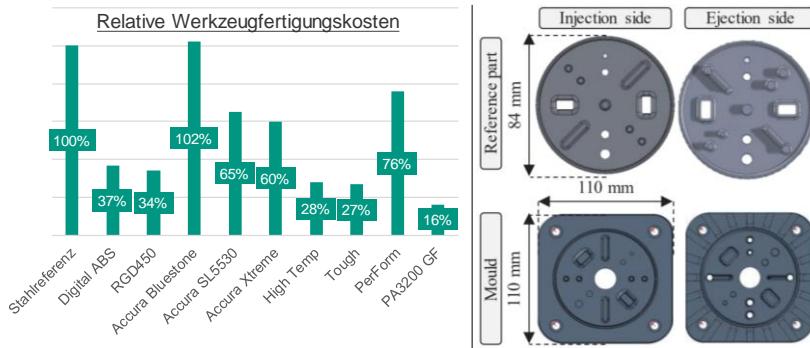


Abbildung 2.34: Kostenpotenzial verschiedener AM-Materialien gegenüber einem Referenzwerkzeug aus Stahl (links) in einem spezifischen Anwendungsfall (rechts) (Kampker, Triebs, Alves et al., 2018, S. 50, S. 52)

Tosello et al. (2019) verglichen die Wirtschaftlichkeit von AM, AT und dem Spritzgießen und stellen ein Modell zur Berechnung der AM- und der Spritzgussgesamtkosten vor. Mit dem Modell lassen sich die Stückkosten auf Basis der Werkzeugkosten, Materialosten und Produktionskosten berechnen. Dazu wurde ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen den Gesamtkosten und Stückkosten einer konventionellen und einer AT-Spritzgussfertigung durchgeführt. Nach ihrer Untersuchung kennzeichnet sich das Spritzgießen durch anfänglich vergleichsweise hohe Investitionskosten. Im Wesentlichen ist dies bedingt durch die hohen Werkzeugkosten, welche sich durch den effizienten Produktionsprozess bei hohen Stückzahlen aber in niedrigen Stückkosten niederschlagen. Während AM mit in der Regel zunächst niedrigen Investitionskosten möglich ist, steigen die Gesamtkosten aufgrund der vergleichsweise langsamem Fertigungsgeschwindigkeit und teuren AM-Materialien rasch an, weswegen sich der Einsatz von AM gegenüber dem Spritzgießen eher für niedrige Stückzahlen eignet (siehe Abbildung 2.35, Break-Even-Punkt A). Eine wirtschaftliche Anwendung von AT findet sich gegenüber der konventionellen Spritzgussfertigung im Bereich kleiner bis mittlerer Stückzahlen (siehe Abbildung 2.35, Break-Even-Punkt B). Zum gleichen Ergebnis gelangten auch Lozano et al. (2022) in ihrer Review-Studie durch die Auswertung verschiedener Forschungsarbeiten in diesem Kontext.

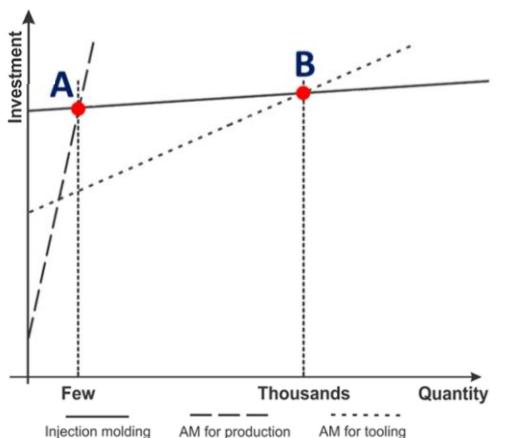


Abbildung 2.35: Wirtschaftlicher Vergleich von Werkzeugalternativen nach Tosello et al., 2019, S. 784

Kampker et al. (2020) entwickelten ebenfalls ein Modell zur Kostenabschätzung von AT, um dessen wirtschaftlichen Einsatzbereich gegenüber der konventionellen Werkzeugfertigung zu prüfen. Auch sie bestätigen die Erkenntnisse von Tosello et al. (2019) weitestgehend. Im Unterschied zum Modell nach Tosello et al. (2019) werden darin zusätzlich sprungfixe Kosten berücksichtigt, da in Abhängigkeit der geforderten Stückzahlen und Formeinsatzstandzeiten gegebenenfalls eine mehrfache Fertigung der AT-Formeinsätze erforderlich ist (siehe Abbildung 2.36). Anhand des entwickelten Modells zeigen die Autoren an sechs Referenzteilen prognostizierte Einsparungen und derzeitige Grenzen von AT auf. Laut der Studie können durch den Einsatz von AT anstelle der CNC-Fertigung die Werkzeugkosten um bis zu 72 % gesenkt werden, während jedoch die Spritzgussprozesskosten bis zu 64 % höher ausfallen. Die Gesamtkostenersparnis betrug in den verglichenen Fällen zwischen 20 % bis 66 % bei Stückzahlen zwischen 30 und 120 Formteilen. Zudem konnte durch das AT die Durchlaufzeit der Werkzeugherstellung um 18 % bis 68 % gesenkt werden, wobei die Durchlaufzeit der Spritzgussfertigung um 71 % bis 120 % anstieg. Dennoch konnte die Gesamtdurchlaufzeit durch AT um bis zu 50 % reduziert werden, wobei jedoch in einem Fall eine 9 % höhere Gesamtdurchlaufzeit ermittelt wurde. Es wurde zudem erkannt, dass der Anteil der Werkzeugbereitstellungszeit an der Gesamtdurchlaufzeit überwiegt und bis zu 94 % bei konventioneller und bis zu 80 % bei additiver Fertigung beträgt. Die Autoren stellen fest, dass das Einsparpotenzial von AT mit zunehmender Stückzahl sinkt und mit zunehmender geometrischer Werkzeugkomplexität steigt. Als Leitlinie zur weiteren Kostenreduktion raten die Autoren zu einer Minimierung des additiv zu fertigenden Volumens.

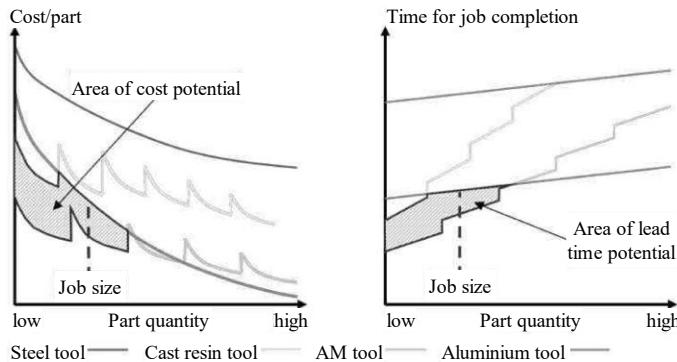


Abbildung 2.36: Wirtschaftlicher Vergleich von Werkzeugalternativen mit Berücksichtigung sprungfixer Kosten nach Kampker et al., 2020, S. 12

Mischkot, Davoudinejad et al. (2017) zeigen, dass mittels SLA Formeinsätze aus keramischen Photopolymer-Verbundwerkstoffen gefertigt werden können, mit denen auch Standzeiten über 10.000 Schuss möglich sind. Allerdings wurde in dieser Studie nur der düsenseitige Formeinsatz additiv gefertigt. Auf der Auswerferseite wurde ein Stahleinsatz verwendet, welcher eine gute Wärmeableitung ermöglichte und so möglicherweise die thermische Alterung reduzierte. Zudem handelt es sich um verhältnismäßig kleine Formteile (5,2 x 2,6 x 1,5 mm) mit geringer Komplexität.

Aufgrund der in der Regel eher kurzen Werkzeugstandzeiten könnte man vermuten, dass die Polymerformeinsätze eine schlechtere Ökobilanz als konventionell hergestellte Werkzeuge aufweisen. Hofstätter et al. (2016) fanden in ihrer Studie jedoch heraus, dass Polymerformeinsätze bei der untersuchten Einsatzgröße von 3 x 20 x 20 mm gegenüber den verglichenen Optionen aus Messing, Aluminium und Stahl bei der Produktion einer geringen Stückzahl, zwischen 100 und 300 Stück, ökologisch vorteilhafter sind. Die Autoren weißen jedoch darauf hin, dass die Entsorgung der Formeinsätze bei der Studie nicht berücksichtigt wurde. Prinzipiell könnten Metallformeinsätze einer Materialrückgewinnung zugeführt werden, wohingegen das Photopolymer nicht wiederverwertet werden kann.

Auf Basis der vorgestellten Studien kann AT aus wirtschaftlicher Sicht weitestgehend als Zwischenlösung zwischen der rein additiven und der Spritzgussfertigung für die Herstellung geringer bis mittlerer Stückzahlen eingeordnet werden. Allerdings bezieht sich diese Betrachtung nur auf die Wirtschaftlichkeit und beinhaltet keine weiteren Überlegungen zur technischen Machbarkeit, zur Fertigungsqualität und Wiedergabebreite oder zu den Auswirkungen auf den Entwicklungsprozess.

### 2.3.4.2 Technische und technologische Betrachtung

Da in den Studien unterschiedliche Kombinationen von Fertigungsverfahren, Formteilgeometrien und Fertigungsparametern untersucht werden, die wiederum in komplexen Wechselwirkungen zueinander stehen, werden die Ergebnisse studienweise nach Forschungsschwerpunkt dargestellt. Die technische Betrachtung wird in die Punkte a) Standzeit und einflussreiche Parameter, b) Auswirkungen von AT auf die Formteileigenschaften, c) Funktionsintegration, d) Simulation und e) Einstell- und Abmusterungsprozess unterteilt.

#### a) Standzeit und einflussreiche Parameter

Aufgrund der besonderen Eigenschaften der verwendeten AM-Materialien unterscheiden sich die daraus hergestellten AT-Formeinsätze deutlich in ihrem Verhalten von konventionell hergestellten Stahl- oder Aluminiumformen. So führt die geringere Wärmeleitfähigkeit von Photopolymeren mit  $\lambda = 0,199\text{--}0,429 \text{ W/mK}$  zu deutlich längeren Zykluszeiten<sup>20</sup> (Mitterlehner, Praherm Bernhard & Steinbichler, 2020). Mendible et al. (2017, S. 346) bestimmten die Wärmeleitfähigkeit von *Digital ABS* nach ASTM E1962-14 mit  $\lambda = 0,3 \text{ W/mK}$  und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit  $300 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ . Zudem ermittelten sie die Zugeigenschaften von *Digital ABS* anhand von in zwei Orientierungen additiv gefertigten Zugproben nach ASTM D638-10 unter Wärmebelastung (siehe Abbildung 2.37). Dabei wurde ein starker Abfall der Zugfestigkeit bei Temperaturen über  $90^\circ\text{C}$  beobachtet (Mendible et al., 2017, S. 346–347). Folglich sollte diese Temperatur nicht überschritten werden, um die Standzeit der Werkzeuge zu verlängern.

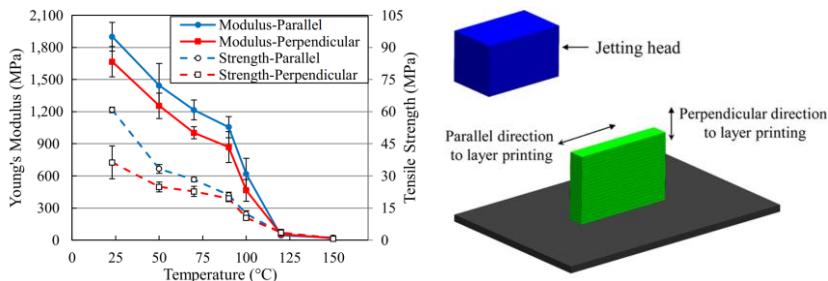


Abbildung 2.37: E-Modul (Youngsches Modul) und Zugfestigkeit von *Digital ABS* in Abhängigkeit der Temperatur parallel und senkrecht zur Schichtebene (Mendible et al., 2017, S. 346–347)

<sup>20</sup> Zum Vergleich dazu weist Stahl eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 17\text{--}50 \text{ W/mK}$  und Aluminium von  $\lambda = 211 \text{ W/mK}$  auf (Hopmann, Greif und Wolters (2021, S. 55))

Weiterhin untersuchten und verglichen Mendible et al. (2017) die Leistung von additiv und konventionell gefertigten Spritzgussformeinsätzen in praktischen Versuchsreihen, mit Fokus auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Werkzeuge, sowie der resultierenden Formteilqualität. Verglichen wurden die AM-Verfahren PolyJet-Modeling (PJM) mit *Digital ABS* und Direct Metal Laser Sintering (DMLS) mit Bronze im Vergleich zur konventionellen Werkzeugfertigung aus Edelstahl. Bei den konventionell bearbeiteten und bei den DMLS-Formeinsätzen wurden ähnliche Ergebnisse in Bezug auf Werkzeugverhalten und Formteilqualität beobachtet. Die PJM-Formeinsätze hingegen führten zu längeren Zykluszeiten (200 s. zu 45 s.) und einer langsameren Abkühlrate, was zu erhöhter Schrumpfung und Kristallinität in den Formteilen führte. Die *Digital ABS*-Formeinsätze konnten schneller und kostengünstiger hergestellt werden, waren aber in Bezug auf Teilequalität und Leistung den anderen beiden Verfahren unterlegen. Nach 80 Zyklen wiesen die *Digital ABS*-Formeinsätze Defekte auf und versagten nach 116 Zyklen komplett (siehe Abbildung 2.38). Das Versagen wird von den Autoren auf eine Kombination aus thermischer Belastung und den wirkenden Entformungskräften zurückgeführt.

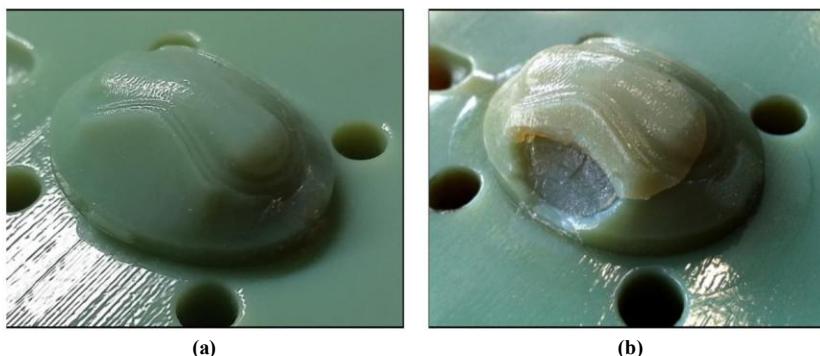


Abbildung 2.38: Oberflächenbeschaffenheit eines PJM-Formeinsatzes (a) und typisches Schadensbild in Form von Ausbrüchen (b) (Mendible et al., 2017, S. 350)

Bogaerts et al. (2018) untersuchten das Versagen von AT-Formeinsätzen im Hinblick auf die mechanische und thermische Belastung. Durch Simulation wurden zunächst Spritzgießparameter ermittelt, welche einen möglichst geringen Einspritzdruck verursachen. In praktischen Versuchsreihen zeigte sich, dass die Ausbruchstellen an den Formeinsätzen mit den durch Simulation ermittelten Stellen des höchsten Einspritzdrucks und den thermischen Hot-Spots im Werkzeug korrelieren. Somit kommt auch dem Design des Formeinsatzes eine hohe Bedeutung zu, da

dieses mitverantwortlich für die Höhe des Einspritzdrucks und die Bildung von Hot-spots ist (Bogaerts et al., 2018, S. 1).

Dempsey, McDonald, Masato und Barry (2020) veröffentlichten eine Untersuchung zur Anwendung von AT für das Mikro-Spritzgießen. Dabei wurde das DLP-Verfahren zur Herstellung kleiner AT-Formeinsätze mit Mikrostrukturen genutzt. An fünf Formeinsätzen wurden verschiedene Prozessparameter und auftretenden Fehler untersucht. Ausgehend vom ersten Werkzeug (36 Schuss) nahm die Standzeit bei zunehmendem Nachdruck und längerer Nachdruckzeit deutlich ab, sodass die Werkzeuge Nummer drei und vier nur noch 16 bzw. 29 Schuss standhielten. Durch Parameteroptimierung konnte die Standzeit für die Werkzeuge vier und fünf auf 60 bzw. 78 Schuss gesteigert werden. Gründe für das Versagen werden im Einfluss der eingebrochenen Temperatur und den induzierten Drücken in Kombination mit der geringen Wärmeformbeständigkeit des eingesetzten Photopolymers gesehen. Es zeigten sich zudem signifikante Einflüsse der niedrigen Wärmeleitfähigkeit, welche mit einer langsamen Abkühlung und erhöhtem Werkzeugverschleiß im Bereich der Mikrostrukturen einherging. Zudem entstand dadurch eine deutlich inhomogenere Temperaturverteilung gegenüber den Formeinsätzen aus Stahl oder Aluminium (Dempsey et al., 2020, S. 16).

Gheisari, Bárto, Goddard und Domingos (2017) untersuchten mittels SLA hergestellte AT-Formeinsätze für das Mikro-Spritzgießen in praktischen Versuchsreihen. Ein Formeinsatzversagen wird in dieser Studie hauptsächlich auf die Wechselwirkung zwischen Einspritzdruck und Temperatur sowie auf übermäßige Biegespannungen und Entformungskräfte während der Füll- bzw. Entformungsphase zurückgeführt. Ein niedrigerer Einspritzdruck begünstigt zwar prinzipiell die Lebensdauer des Formeinsatzes, jedoch muss dieser mit einer höheren Einspritztemperatur kompensiert werden, welche wiederum die Standzeit verringert. Darüber hinaus stellt beispielsweise die Höhe formgebender Elemente innerhalb der Kavität (z.B. ein Zylinder, welcher im Formteil eine „Bohrung“ erzeugt) eine Schwachstelle dar, da diese aufgrund von Biegebeanspruchung durch den Schmelzefluss zerstört werden können. Zudem sollte nicht nur beim Formteil, sondern auch beim AT-Formeinsatz auf eine ausreichend niedrige Entformungstemperatur geachtet werden. Diese sollte allerdings auch nicht zu niedrig gewählt werden, da sonst Werkzeugschäden durch erhöhte Entformungskräfte auftreten können. Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die Verwendung ungeeigneter Photopolymere zu schlechten Druckergebnissen und infolgedessen zu einem frühen Formeinsatzversagen führen kann.

Zhang et al. (2018) präsentieren in ihrem Beitrag eine Prozesskette zur Herstellung von AT-Formeinsätzen mit Mikrooberflächenmerkmalen in Form von Mikrosäulen mit Durchmessern von 200 µm (siehe Abbildung 2.39). Mit den durch DLP generierten AT-Formeinsätzen konnten zwischen 80 und 100 Formteile aus PE hergestellt

werden. Die Untersuchung zeigt, dass komplexe Mikrostrukturen durch AT im Vergleich zur CNC-Fertigung kostengünstiger und schneller herstellbar sind. Jedoch wird die Qualität der Formteile durch das eingesetzte AM-Verfahren begrenzt.

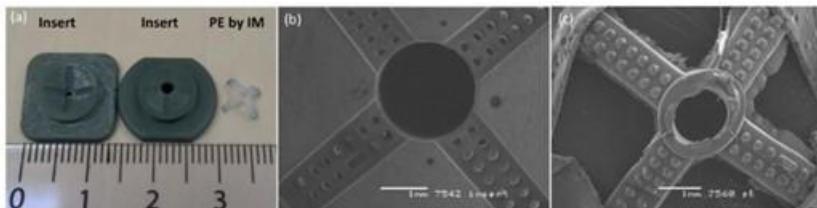


Abbildung 2.39: AT-Formeinsätze zur Herstellung von Mikro-Spritzgussteilen (a) mit Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Formeinsatzoberfläche (b) und Formteilbeschaffenheit (c) (Zhang et al., 2018, S. 5)

Mischkot, Tosello et al. (2017) nutzten DLP als AM-Verfahren zur Herstellung von Polymerformeinsätzen für das Präzisionsspritzgießen. Mittels statistischer Versuchsplanung untersuchten sie den Einfluss der Faktoren Kühltemperatur, Einspritzgeschwindigkeit und Nachdruck auf die Werkzeugstandzeit. Dabei fanden sie heraus, dass der Werkzeugkühlzeit die höchste Bedeutung im Hinblick auf die Standzeit zukommt. In praktischen Versuchen konnten 25 bis 116 Formteile aus Polyethylen niedriger Dichte (LDPE) hergestellt werden. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Polymerformeinsätze ergaben sich eine hohe Kühlzeit von 50 Sekunden und eine hohe Zykluszeit von 300 Sekunden. Die Autoren sehen in AT die deutlich kostengünstigere und schnellere Alternative im Hinblick auf eine Pilotproduktion und heben die Möglichkeit zur schnellen Herstellung von Mikromerkmalen hervor. Jedoch bezeichnen sie den Herstellprozess als weniger zuverlässig mit Bezug auf die Wiederholgenauigkeit im Vergleich zur konventionellen Fräsfertigung.

Hofstätter, Mischkot, Pedersen, Tosello und Hansen untersuchten die Lebensdauer und die Oberflächenverschlechterung von AT-Formeinsätzen, welche durch DLP aus einem mit Kohlenstoffkurzfasern verstärktem Photopolymer hergestellt wurden. In Anwendungsversuchen wurden sowohl verstärkte als auch unverstärkte AT-Formeinsätze zum Spritzgießen von LDPE bis zu deren Versagen eingesetzt. Mit den faserverstärkten AT-Formeinsätzen konnte eine durchschnittliche Schusszahl von 2.580 erreicht werden, was einer Steigerung von 500 % gegenüber den nicht faserverstärkten Einsätzen entspricht. Zudem wurde die Rissausbreitungs geschwindigkeit auf 1,25 % der Ursprungsgeschwindigkeit reduziert.

### b) Auswirkungen von AT auf die Formteileigenschaften

In verschiedenen Studien wurden Einflüsse von AT auf den Fertigungsprozess und die daraus resultierenden Formteileigenschaften untersucht. Die Ergebnisse sind allerdings oft schwer miteinander vergleichbar, da entweder unterschiedliche Werkstoffe für das Formteil oder Werkzeug, sowie abweichende Prozessparameter für die Probenfertigung vorliegen, wie an den folgenden Beispielen verdeutlicht wird.

Volpato, Solis und Costa (2016) untersuchten die Dimensions- und Oberflächenstabilität während des Spritzgussverfahrens sowie den Einfluss des AT auf die Eigenschaften des Formteils. Dazu wurde das PJM-Verfahren zur Herstellung von AT-Formeinsätzen aus *Digital ABS* eingesetzt, mit denen Standardproben aus Polypropylen (PP) gespritzt wurden. Diese wurden mit Proben aus konventionell gefertigten Metallformeinsätzen verglichen. Dabei wurde der Einfluss des verwendeten Werkzeugmaterials auf die Formteileigenschaften durch Zug-, Biege-, Schlag- und Härtetests sowie durch die Messung der Kristallinität der Formteile bewertet. Im Vergleich zu den metallischen Formeinsätzen werden für das AT abweichende Prozessparameter, wie ein niedrigerer Einspritzdruck, eine langsamere Einspritzgeschwindigkeit, sowie ein deutlich längerer Nachdruck und eine längere Kühlzeit beschrieben. Mit den gewählten Parametern konnten 50 Probekörper aus dem AT-Formeinsatz hergestellt werden, ohne dass ein Versagen auftrat. Der AT-Formeinsatz wies die typische, fertigungsbedingte „Rillenstruktur“ auf, welche sich auch auf dem Formteil abbildete (siehe Abbildung 2.40). Das Ergebnis der Zugversuche ergab eine nahezu identische Zugfestigkeit von ca. 23 MPa bei einem etwa 2 % höheren E-Modul der AT-gefertigten Zugproben. Beim Biegeversuch wurde eine 24 % höhere Biegefestigkeit ermittelt. Zudem konnte eine 32 % höhere Schlagzähigkeit gegenüber den Referenzproben gemessen werden. Ein Unterschied im Härtegrad wurde nicht festgestellt.

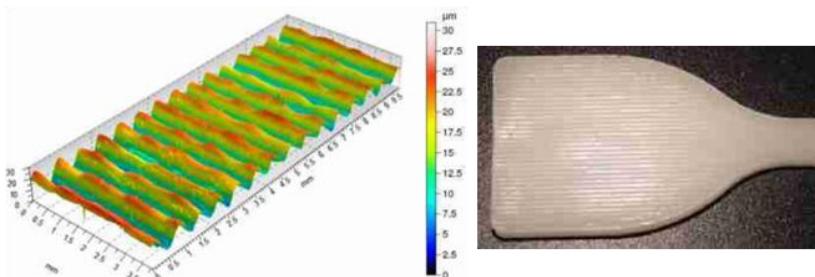


Abbildung 2.40: Oberflächenbeschaffenheit des Formeinsatzes (links) und des Formteils (rechts) (Volpato et al., 2016)

Kampker, Trieps, Kawollek, Ayvaz und Beyer (2019) untersuchten den Einfluss von AT-Formeinsätzen aus *Digital ABS* auf die mechanischen Eigenschaften von Formteilen im Vergleich zu konventionell gefertigten Aluminiumformeinsätzen. Dazu wurden Probekörper aus Polypropylen-Copolymer (PPC) für den Zugversuch nach DIN EN ISO 527 auf Basis der Mehrzweckprobengeometrie 1A nach DIN EN ISO 527-1, sowie Mehrzweckprobekörper für den Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 179-1 gespritzt und hinsichtlich der resultierenden mechanischen Eigenschaften, dem Schwindungsverhalten und der Morphologie verglichen. Abweichende Fertigungsparameter waren ein niedrigerer Einspritzdruck und eine um das über sechsfache längere Kühlzeit für die AT-Formeinsätze. Die mit AT hergestellten Proben weisen je nach Messstelle einen ca. 1 - 4 % höheren Kristallisationsgrad auf. Gegenüber der Studie von Volpato et al. (2016) wurde eine Steigerung des E-Moduls um 19 % bei den AT-gefertigten Zugproben gemessen. Die Zugfestigkeit der AT-Proben lag gegenüber den Referenzproben aus dem Aluminiumwerkzeug um 13 % höher bei einer um 23 % geringeren Bruchdehnung. Die Schlagzähigkeit lag um 19 % niedriger. Die AT-Proben weisen demnach eine höhere Festigkeit und ein spröderes Materialverhalten auf. Die Autoren führen die Unterschiede in den Messergebnissen im wesentlich auf die morphologische Struktur zurück, welche bei den AT-Proben von der geringeren Wärmeleitfähigkeit und der höheren Oberflächenrauheit geprägt ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Mitterlehner et al. (2020), die einen um 8 % höheren E-Modul und eine um 12 % höhere Zugfestigkeit bei PP-Zugstäben aus AT-Formeinsätzen gegenüber jenen aus Stahl- bzw. Aluminiumwerkzeugen ermittelten.

Zong, Ruan, Liu, Sun und Liu (2019) zeigten in ihrem Beitrag, dass auch Hochtemperatur-Kunststoffe wie Polyetheretherketon (PEEK) in Polymerformeinsätzen verarbeitet werden können. Für die Versuche wurden zunächst Probekörper aus den mit SLA gefertigten AT-Formeinsätzen hergestellt. Die Untersuchung ergab, dass die Werte für die Zugfestigkeit (nach ISO 527), Biegefestigkeit (nach ISO 178) und Kerbschlagzähigkeit (nach ISO 180) im Normbereich für PEEK lagen. Es konnte zwar kein direkter Einfluss von AT (z.B. aufgrund der Wärmeleitfähigkeit) auf die Formteileigenschaften festgestellt werden, allerdings wurde gezeigt, dass die Einspritztemperatur, der Einspritzdruck und die Einspritzgeschwindigkeit großen Einfluss auf die Zugeigenschaften eines aus PEEK bestehenden Formteils haben. Durch Variation dieser Parameter variierten auch die durchschnittlichen Zugfestigkeiten zwischen 68,2 MPa und 86,7 MPa (Zong et al., 2019, S. 5).

Simpson et al. (2019) belegen ebenfalls die geringfügig abweichende Formteileigenschaften von Proben aus AT-Formeinsätzen. Dazu verglichen sie unter anderem die mittels PJM verarbeiteten Photopolymere *Digital ABS* und *FullCure 720* gegenüber einem konventionell gefertigten Formeinsatz aus Werkzeugstahl (P20). In

Spritzgussversuchen wurden unter anderem die Thermoplaste PP und POM getestet. Um die Standzeit der AT-Formeinsätze zu verlängern, wurden abweichende Parameter, wie eine niedrigere Werkzeugtemperatur und eine längere Werkzeugöffnungszeit zur Kühlung mit Druckluft gewählt. Zudem wurde langsamer eingespritzt und eine längere Nachdruckzeit eingestellt. Bei den Proben aus dem AT-Formeinsatz wurde eine höhere Schwindung und ein etwas höherer Kristallisationsgrad im Kern der Probe ermittelt (+1,8 % bei PP, +1,7 % bei POM). In einem Dreipunktbiegeversuch wurde eine niedrigere Steifheit, eine ähnliche maximale Dehnung und eine niedrigere Maximalbelastung ermittelt. Die Autoren empfehlen allerdings eine genauere Untersuchung, um den tatsächlichen Ursprung dieser Abweichungen identifizieren zu können. Zudem weisen sie darauf hin, dass eine Vielfalt potenzieller AM-Materialien auf dem Markt verfügbar sei, deren Einfluss auf die Formteileigenschaften bisher nicht untersucht wurde.

Auf Basis der vorgestellten Untersuchungen ist festzustellen, dass die Wiedergabetreue von AT-Prototypen gegenüber Prototypen aus metallischen Werkzeugen von einer Kombination aus verschiedenen Faktoren abhängt. Bei gleichen Drücken, Temperaturen und Geschwindigkeiten reduziert sich die Einschränkung der Wiedergabetreue im Wesentlichen auf die durch das AM-Verfahren gegebene Oberflächenbeschaffenheit und Maßhaltigkeit der Formeinsätze. Da metallische Formeinsätze allerdings in der Regel auf eine schnelle Abkühlung der Formmasse zur Erzielung kurzer Zykluszeiten ausgelegt sind, ist insbesondere bei teilkristallinen Thermoplasten mit einer höheren Abweichung zu rechnen. Die schlechtere Wärmeleitfähigkeit der AT-Formeinsätze führt zu einer langsameren Abkühlrate, was sich unter anderem in einem höheren Kristallisationsgrad, einer höheren Schwindung und Abweichungen hinsichtlich Biegesteifigkeit, Zugfestigkeit und Bruchdehnung der Formteile äußert.

### **c) Funktionsintegration**

Durch die additive Herstellung ermöglichen AT-Formeinsätze die direkte Integration verschiedener Werkzeugfunktionen, wie z.B. eine Schieberfunktion zur Herstellung von Formteilen mit Hinterschneidungen oder die direkte Integration von Oberflächentexturen (Burggräf et al., 2022; Schuh, Bergweiler, Lukas & Abrams, 2020; Vretenen, Stahl, Schilling, Civelek & Zimmermann, 2021).

Schuh, Bergweiler, Lukas und Abrams (2020) zeigen, dass auch die Fertigung komplexer Geometrien mit Hinterschneidung durch die Integration von Schieberelementen möglich ist. In ihrer Studie wurden 122 Formteile einfacher und 94 Formteile komplexer Geometrie aus PP gefertigt. Zur Auflösung der Hinterschneidung wurden schrägbolzengeführte Schieberelemente genutzt, welche, wie der Rest des Formeinsatzes, additiv mittels PJM aus *Rigur* hergestellt wurden (siehe Abbildung 2.41).

Jedoch sehen die Autoren weiteren Forschungsbedarf im Hinblick auf die konstruktive Gestaltung des Formeinsatzes. Als Beispiele werden die Integration von Kühlkanälen und die Dimensionierung des Schrägbolzens zur Aktuierung des Schieberelements genannt. Zudem sollte das Verschleißverhalten des Schrägbolzens näher betrachtet werden, da unpräzise Schieberbewegungen zu Geometrieabweichungen führen.

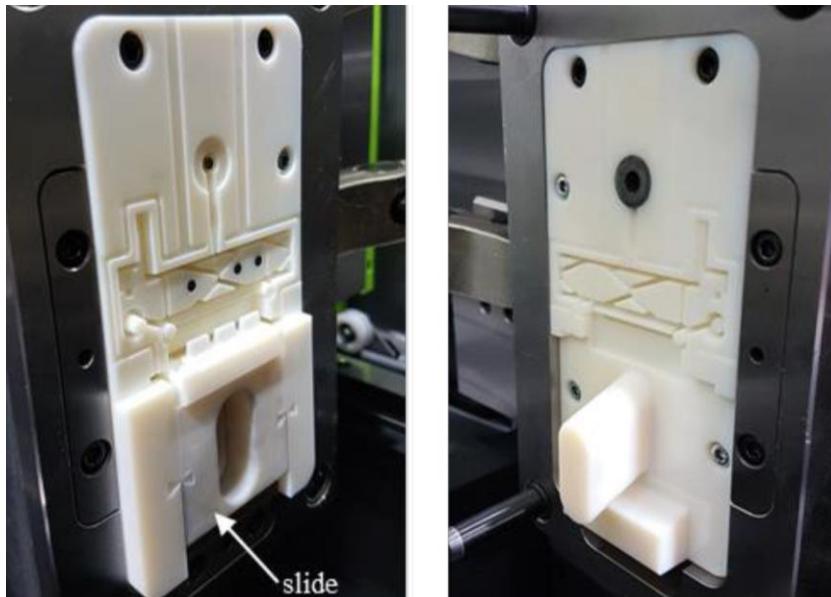


Abbildung 2.41: AT-Formeinsatz mit komplexer Formteilgeometrie und Schieberfunktion zur Auflösung von Hinterschneidungen (Schuh, Bergweiler, Lukas & Abrams, 2020, S. 104)

In einer ähnlichen Studie zeigen Vieten et al. (2021) ebenfalls die Herstellung komplexer Formteile mit Hinterschneidung. Das AT-Werkzeug wurden mittels DLP aus *PLASTCure Rigid 10500*, einer mit kugelförmigen Siliziumdioxidpartikeln gefüllten Mischung von Epoxid- und Acrylatharzen, hergestellt. In den praktischen Versuchen konnten 10 Formteile aus einer PBT-Formulierung (Pocan DP T 7140 LDS) gefertigt werden, bevor erste Schäden am Werkzeug auftraten. Die Zeit für die additive Fertigung betrug 8,5 Stunden. Weitere 3 Stunden werden für das Post-Processing (Schleifen, Bohren usw.) sowie 8 Stunden für die Montage angegeben. Die Autoren schätzen, dass die Fertigungs- und Montagezeit für ein CNC-gefertigtes Stahlwerkzeug hingegen 10–15 Tage gedauert hätte.

Burgräf et al. (2022) zeigen in ihrer Veröffentlichung die erfolgreiche, direkte Integration von vier verschiedenen dreidimensionalen Oberflächentexturen in die Qualität der AT-Formeinsätze (siehe Abbildung 2.42). Üblicherweise findet die Oberflächentexturierung im konventionellen Tooling durch gesonderte Arbeitsschritte und zusätzliche Fertigungsverfahren statt. Für die Formeinsatzherstellung wurde das PJM mit Rigur als AM-Material verwendet. Nach 30 Spritzgießzyklen mit PP wurde kein Verschleiß der Oberflächenstruktur festgestellt. Nach Ansicht der Autoren bieten die Oberflächentexturen zudem die Möglichkeit, die durch den Fertigungsprozess bedingte Rillenstruktur der Werkzeug- und Formteilloberfläche zu kaschieren. (Burgräf et al., 2022)

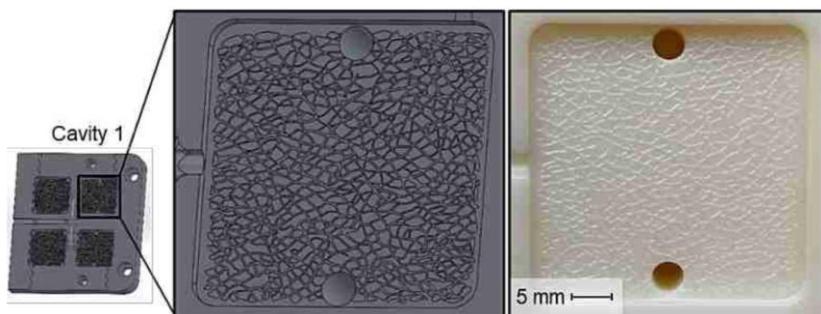


Abbildung 2.42: Direkte Umsetzung der CAD-Daten in die Werkzeugfunktion am Beispiel einer Oberflächentextur (Burgräf et al., 2022, S. 7)

#### d) Simulation

Wie durch die bisherigen Ausführungen gezeigt wurde, spielen die Werkstoffeigenschaften der Photopolymere in Kombination mit den Spritzgießprozessparametern und der Werkzeuggeometrie die entscheidende Rolle hinsichtlich der Werkzeugstandzeit. In Ergänzung zu klassischen Überschlagsrechnungen werden zur mechanischen, rheologischen und thermischen Werkzeugauslegung üblicherweise auch Methoden der Simulation eingesetzt, wobei sich sowohl das Formteil, das Werkzeug als auch der Spritzgussprozess simulieren lassen (vgl. Abschnitte 2.2.3.2 und 2.2.3.3).

Mischkot und Tosello et al. (2017) zeigen in ihrer Studie, dass sich das thermische Verhalten von Photopolymereinsätzen zufriedenstellend simulieren lässt. Mittels der Simulationssoftware Autodesk Moldflow Insight wurde eine Spritzgussprozesssimulation zur thermischen Analyse des Formeinsatzes durchgeführt. Mit 2,4 % Abweichung an der Messstelle zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen simulierter (79,2 °C) und tatsächlich gemessener (77,3 °C) Werkzeugwandtemperatur.

Allerdings musste das Werkzeugmaterialmodell der Simulationssoftware entsprechend angepasst werden. Die Autoren nutzten für ihre Studie eine Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,1836 \text{ W/mK}$  bei  $50^\circ\text{C}$  und eine spezifische Wärmekapazität von  $c_p = 2080 \text{ J/kgK}$  bei  $50^\circ\text{C}$  für das eingesetzte Formeinsatzmaterial HTM140V2.

Davoudinejad et al. (2019) untersuchten AT-Formeinsätze, die mit dem DLP-Verfahren aus einem Methacrylat-Polymer hergestellt wurden. In praktischen Versuchen und über ein dreidimensionales Simulationsmodell wurden die Einflüsse von thermischen und mechanischen Belastungen untersucht. Das entwickelte Simulationsmodell ermöglichte die Vorhersage von Schwachstellen und thermisch induzierten Verformungen in der AT-Form. Somit konnte eine Prognose erstellt werden, wo Fehler auftreten würden. Über eine DoE-Analyse wurde die Werkzeugtemperatur als größter Einfluss auf die Werkzeugstandzeit und geometrische Genauigkeit der Formteile identifiziert. (Davoudinejad et al., 2019, S. 403ff.)

Timofeeva, Andreev und Yablochnikov (2019) zeigen in ihrer Studie ebenfalls den Einsatz der Prozesssimulation in der Anwendung von AT. Dazu wurde eine scheibenförmige Geometrie konstruiert, der Spritzgussprozess simuliert und die Geometrie anschließend mittels AT aus PS hergestellt. Die AT-Formeinsätze wurden mit dem PJM-Verfahren aus Digital ABS gefertigt. Die maximalen Abweichungen der Scheibe lagen bei  $0,02 \text{ mm}$  in der Dicke und  $0,03 \text{ mm}$  im Durchmesser der Scheiben. Unter anderem wurde eine lokale Schwindung der Formteile von  $3\%$  gemessen, was auch dem simulierten Wert entspricht und somit den Nutzen der Simulation zur Prognose des Schwindungsverhaltens bestätigt. Es konnten 50 Formteile hergestellt werden, ohne dass eine Verschlechterung der Formteilgeometrie gemessen werden konnte. Die Autoren betonen weiterhin, dass sie neben der Prozesssimulation auch eine Datensammlung und -speicherung als Voraussetzung für die Integration von AT in die Kleinserienproduktion erachten. (Timofeeva et al., 2019)

Kumar und Singh (2020) untersuchten die volumetrische Schwindung von Spritzgussteilen aus Polypropylen (PP), die mit einem AT-Formeinsatz aus Digital ABS hergestellt wurden, anhand einer Prozesssimulation. Im Fokus der Untersuchung standen zwölf Versuchsgeometrien in Form einfacher geometrischer Körper, welche unter Berücksichtigung der Eigenschaften von Digital ABS als Formeinsatzmaterial simuliert wurden. Als wesentliche Einflussparameter werden die Werkzeugtemperatur, die Einspritztemperatur, die Kühlzeit, der Nachdruck und die Einspritzgeschwindigkeit genannt. Es wird auf Basis der Simulation gezeigt, dass die Schwindung je nach Probekörpergeometrie zwischen  $12,6\%$  und  $18,8\%$  variiert. Der Mehrwert dieser Studie soll darin bestehen, das Schwindungsverhalten komplexer Körper als Zusammenschluss der einfachen Grundkörper bewerten zu können. (Kumar & Singh, 2020, S. 1). Eine praktische Validierung der Grundkörper wurde

jedoch nicht vorgenommen und der Erfolg dieser Vorgehensweise wird in der Veröffentlichung nicht weiter belegt.

#### e) Einstell- und Abmusterungsprozess

Bevor mit der Herstellung einer Prototypenserie begonnen wird, findet in der Regel ein Abmusterungsprozess statt, bei dem Maschinen- und Prozessparameter optimiert werden. Auch wenn in der Fachliteratur systematische Ansätze zur Durchführung von Abmusterungsprozessen vorgestellt werden (vgl. Schötz, 2019), finden diese oft nach „Versuch und Irrtum“ auf Basis der Erfahrungen des Maschinenbedieners statt (Bagalkot et al., 2019). Üblicherweise werden 15–30 Schuss (Spritzgusszyklen) benötigt, um die Spritzgussmaschine einzustellen, was aufgrund der ohnehin begrenzten Standzeit der AT-Formeinsätze eher ungünstig ist (Bagalkot et al., 2019, S. 1494).

Bagalkot et al. (2019) beschreiben daher eine neue Methode zur Einstellung der Spritzgießparameter für Polymer-AT-Formeinsätze. Da die AT-Formeinsätze bei zu hohen Drücken und Temperaturen versagen können, sollte der konventionelle Einstellprozess, wie er für Metall-Formeinsätze genutzt wird, nach Ansicht der Autoren keine Anwendung finden. Der konventionelle Prozess sieht vor, mit der höchsten Einstellung für den Druck zu beginnen und anschließend eine Feinabstimmung zur Optimierung der Prozessparameter durchzuführen. Nach der neuen Methode werden die relevanten Einstellwerte zunächst mittels Simulation ermittelt, woraufhin der Einstellprozess mit einem Sicherheitsabstand zu diesen Werten gestartet werden kann. Die Werte werden dann stufenweise erhöht, bis das Einspritzvolumen vollständig eingespritzt ist. In einer Vergleichsstudie wurde im Abmusterungsprozess nach der klassischen Methode ein Versagen des AT-Formeinsatzes nach 5 Schuss ermittelt, wogegen nach der neuen Methode 54 Teile hergestellt werden konnten. Im Zuge der Untersuchung wurden die Werkzeugtemperatur, der Einspritzdruck, die Einspritzgeschwindigkeit, der Nachdruck und die Kühlzeit als kritische Prozessparameter ermittelt.

### 2.3.5 Zwischenfazit

Im vorangegangenen Abschnitt wurde gezeigt, dass für das Additive Tooling (AT) von Spritzgusswerkzeugen prinzipiell verschiedene AM-Verfahren eingesetzt werden können, welche sich jedoch teils grundlegend in ihrem Verarbeitungsprinzip und den einsetzbaren Materialien unterscheiden. Daher erfolgte eine Eingrenzung auf AM-Verfahren, die auf dem Prinzip des *lichtreaktiven Photopolymer-Aushärtens* basieren. Jedoch gilt es auch bei diesen Verfahren die AM-typischen Fertigungsbesonderheiten, wie den „Treppenstufeneffekt“ und mögliche Anisotropien im Materialaufbau zu berücksichtigen. Zwar ermöglicht die additive Fertigung eine hohe

geometrische Freiheit zur Gestaltung von Bauteilen, allerdings müssen für das AT auch die Regeln und Richtlinien für die fertigungsgerechte Auslegung von Formteilen und Werkzeugen aus Sicht des Spritzgießens beachtet werden. Dennoch ermöglicht die additive Fertigung neue Optionen, wie die Integration konturnaher Kühlkanäle oder die direkte Umsetzung von Oberflächentexturen.

Zudem wurde eine Betrachtung bisheriger Forschungsarbeiten zu AT aus wirtschaftlicher sowie technischer Sicht durchgeführt. In den betrachteten Studien zu AT wurden überwiegend die vorgestellten Verfahren SLA, DLP und PJM (siehe Abschnitt 2.3.3.1 bis 2.3.3.3) zur Herstellung von Formeinsätzen verwendet. Die wirtschaftliche Betrachtung zeigt, dass AT üblicherweise als Zwischenlösung zwischen dem Additive Manufacturing und der Spritzgussfertigung, also zur Herstellung kleiner bis mittlerer Stückzahlen im zwei- bis vierstelligen Bereich, eingeordnet werden kann. Die tatsächlich erreichbaren Stückzahlen hängen jedoch von verschiedenen Faktoren, wie der Komplexität des Formteils und Werkzeuges, sowie den mechanischen und thermischen Belastungen durch den Spritzgussprozess ab. Es wurde auch gezeigt, dass sich aufgrund abweichender Prozessparameter, insbesondere einer längeren Abkühlzeit, je nach eingespritztem Kunststoff, abweichende Formteileigenschaften gegenüber metallischen Werkzeugen ergeben können. Aus Sicht der Validierung ist dieser Umstand als eine Reduktion der Wiedergabetreue von AT-Prototypen zu berücksichtigen.

Die betrachteten Studien lassen den Schluss zu, dass AT zwar wirtschaftliche und technische Vorteile und Potenziale für die Herstellung von Spritzgießwerkzeugen bzw. Formeinsätzen aufweist, aber auch mit Nachteilen und Risiken verbunden ist. Um zu gewährleisten, dass AT für die Validierung zielgerichtet, sicher und effektiv eingesetzt werden kann, wird weiterer Forschungsbedarf gesehen. Eine genauere Erläuterung dazu erfolgt im Abschnitt *Forschungsbedarf* im folgenden Kapitel (siehe Abschnitt 3.1). Eine detaillierte Bewertung des AT erfolgt in der Beschreibung von *Potenzialen und Hürden in der Anwendung von AT* (siehe Abschnitt 5.4).

# 3 Forschungsbedarf und Zielsetzung

In diesem Kapitel werden die Ziele dieser Arbeit erläutert. Dazu wird zunächst der Forschungsbedarf auf Basis des in Kapitel 2 vorgestellten Forschungsstandes beschrieben. Darauf aufbauend wird eine zentrale Forschungsthese formuliert, die durch drei Forschungsfragen operationalisiert wird.

## 3.1 Forschungsbedarf

Die Ermittlung des Forschungsbedarfs ist essentieller Bestandteil des Stadiums „*Klärung des Forschungsgegenstandes*“ der *Design Research Methodology* nach Blessing und Chakrabarti (2009), welche in Kapitel 4.1 umfänglicher erörtert wird. Unter dem Forschungsbedarf soll hier das Vorhandensein einer Forschungslücke sowie die Relevanz für die wissenschaftliche Bearbeitung dieser Lücke verstanden werden.

Als Grundlage zur Herleitung des Forschungsbedarfs wurde in Kapitel 2 der derzeitige Stand der Forschung beschrieben. Daraus geht hervor, dass die Validierung die zentrale Aktivität zur Wissensgenerierung innerhalb der Produktentwicklung darstellt (Albers, 2010, vgl. Abschnitte 2.1.1 & 2.1.3). Um den Analyse-Synthese-Kreislauf der Produktentwicklung zu ermöglichen, muss die Validierung allerdings von Beginn an und kontinuierlich erfolgen (Albers, Behrendt et al., 2016). Zudem führt gemäß der „Rule-of-Ten“ eine späte Fehlerdetektion zu exponentiell erhöhten Änderungskosten und einer Verlängerung der Entwicklungszeit (Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017, S. 168). Wesentliche Voraussetzungen für die Durchführung von Validierungsaktivitäten ist das Vorhandensein einer Validierungsumgebung und geeigneter Prototypen (vgl. Abschnitte 2.1.3 & 2.1.4). Prototypen unterliegen laut ihrer Definition immer gewissen Einschränkungen gegenüber dem zu entwickelnden Original (vgl. Abschnitt 2.1.4.1). Sie sollten jedoch eine situationsadäquate Wiedergabetreue zur Erreichung der Validierungsziele aufweisen (Gebhardt, 2016; Kampker et al., 2016; Lim et al., 2008; Schmidt et al., 2017) und idealerweise schnell und kostengünstig zur Verfügung stehen (Feldhusen & Grote, 2013; Gebhardt, 2016, vgl. Abschnitt 2.1.4.2).

Bei der Entwicklung von Spritzgussprodukten stehen Prototypen mit hoher, seriennaher Wiedergabetreue aber aufgrund der kosten- und zeitintensiven Herstellung der benötigten Werkzeuge in der Regel erst spät im Entwicklungsprozess zur Verfügung (Schuh et al., 2017, vgl. Abschnitt 2.2.3.1). In der Praxis werden daher, je

nach Fragestellung, unterschiedliche Anwendungen wie die Simulation, das Rapid Prototyping (RP) oder vereinfachte Prototypenwerkzeuge eingesetzt. Mittels RP können physische Prototypen zwar meist schnell, günstig und früh hergestellt werden, jedoch weichen ihre Eigenschaften aufgrund der Schichtbauweise und der eingesetzten Materialien oft von denen des zu entwickelnden Produktes ab (Gebhardt, 2016, S. 98). Einige Fehler in der Produkt- oder Werkzeugauslegung können demnach nur während eines zumindest seriennahen Produktionsprozesses erkannt werden. AT ermöglicht hier, physische Prototypen im Zielmaterial und in der Ziel-Fertigungstechnologie herzustellen, so dass im Vergleich zu RP-Modellen eine höhere Wiedergabtreue hinsichtlich der technischen Produkteigenschaften erreicht werden kann (z.B. entfallen die RP-typischen Anisotropien). Aus wirtschaftlicher Sicht und aufgrund der begrenzten Standzeiten bietet sich das AT insbesondere zur Produktion kleiner Stückzahlen an (vgl. Abschnitt 2.3.4). Gegenüber der konventionellen Werkzeugherstellung ist AT hier oft kostengünstiger und auch schneller in Bezug auf die Werkzeugherstellung und die Gesamtdurchlaufzeit (Kampker, Triebs, Alves et al., 2018; Kampker et al., 2020; Tosello et al., 2019, 2.3.4.1).

Die in Abschnitt 2.3.4.2 vorgestellten Studien zeigen allerdings auch, dass AT diverse technische Herausforderungen birgt. Bereits die verfahrenstechnischen Grundlagen des Spritzgießens zeigen, dass es sich bei der Entwicklung von Spritzgussprodukten und den dazugehörigen Werkzeugen um einen komplexen und integrativen Prozess handelt, welcher viele Wechselwirkungen enthält (vgl. Abschnitt 2.2.2). Zudem unterscheiden sich der Herstellprozess und die technischen Eigenschaften von AT-Werkzeugen grundlegend von konventionellen Werkzeugen. Wie gezeigt wurde, führen die als AT-Werkzeugmaterialien eingesetzten Photopolymere zu geringeren Werkzeugstandzeiten, zu teilweise abweichenden Spritzgussparametern und damit unter Umständen auch zu abweichenden Formteil-eigenschaften gegenüber dem konventionellen Tooling (Kampker et al., 2019; Mitterlehner, 2020; Simpson et al., 2019; Volpato et al., 2016; Zong et al., 2019). Die Standzeit und die erreichbare Wiedergabtreue hängen dabei von diversen, wechselwirkenden Faktoren wie der Formteilgeometrie, dem eingespritzten Material, den Maschinen- und Prozessparametern und nicht zuletzt dem Formteil- und Werkzeugdesign ab (ebd.). Insbesondere eine ungeeignete Formteil- und Werkzeugauslegung oder unpassende Maschinen- und Prozessparameter führen zu einem frühen Versagen der AT-Werkzeuge (Bagalkot et al., 2019), sodass das Validierungsziel unter Umständen nicht erreicht werden kann. Dass eine Lücke hinsichtlich dieses Fachwissens besteht, wurde im Rahmen einer Interviewstudie mit Experten ermittelt, welche in Abschnitt 5.3 vorgestellt wird. Das bestehende Konstruktions- und Anwendungswissen muss entsprechend erweitert werden.

Bisherige Forschungsarbeiten zu AT beschäftigten sich zwar bereits mit diversen wirtschaftlichen und technischen Untersuchungsschwerpunkten (vgl. Abschnitt 2.3.4), allerdings handelt es sich dabei aus ganzheitlicher Sicht um eine eher fragmentierte Forschung, deren Ergebnisse meist auf Basis spezifischer Anwendungsfälle oder Experimente beruhen. Jedoch können diese Arbeiten, bzw. aufbereitete Wissenselemente daraus, Elemente eines Referenzsystems im Sinne des Modells der SGE darstellen. Eine Methode<sup>1</sup>, welche Entwickelnde speziell in der Nutzung von AT zur Validierung in der Produktentwicklung durch eine ganzheitliche, systematische Vorgehensweise unterstützt, existiert bisher nicht. Ebenso wird deutlich, dass spezifisches Fachwissen über AT notwendig ist, ohne das eine technisch und wirtschaftlich erfolgreiche und sinnvolle Anwendung von AT schwierig ist. Zudem besteht die Gefahr einer Fehlinterpretation der Validierungsergebnisse aufgrund der möglicherweise abweichenden Formteileigenschaften der AT-Prototypen (z.B. aufgrund abweichender Zugeigenschaften, vgl. Abschnitt 2.3.4.2). Entsprechende Fachliteratur zu AT, insbesondere zur praxisnahen Anwenderunterstützung, oder eine Sammlung von aufbereiteten Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien sind bislang ebenfalls nicht verfügbar. Aus diesem Bedarf leitet sich das nachfolgend beschriebene Forschungsziel ab.

### 3.2 Forschungsziel

Die *kontinuierliche Produktvalidierung* stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor der Produktentwicklung dar. Wie gezeigt wurde, bietet AT das *Potenzial*, die benötigte Zeit und die Kosten für das Prototyping zu reduzieren und somit durch einen effizienteren Prozess zu einer kontinuierlichen Produktdurchlaufprüfung beizutragen<sup>2</sup>.

#### **Definition 6: Erfolgreiches Prototyping mit Additive Tooling**

Als „erfolgreich“ gilt die effiziente Anwendung von AT im Vergleich zu alternativen Prototypingtechnologien, wenn sie zu validierungsgeeigneten Prototypen, validen Testergebnissen und dem Erreichen der Validierungsziele führt.

<sup>1</sup> Der Begriff „Methode“ beschreibt ein „*planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels*“ (in Anlehnung an Ehrlenspiel und Meerkamm (2017), zitiert nach VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 7). Methoden haben einen deskriptiven Charakter, bilden das verallgemeinerte Wissen zu bestimmten Anwendungsfällen ab und der Ausgang ihrer Anwendung ist offen (Oerding (2009)).

<sup>2</sup> Eine ausführlichere Untersuchung und Beurteilung der Potenziale von AT findet im Rahmen der DS-I statt (siehe Abschnitt 5.4).

Das *erfolgreiche Prototyping mit AT* wird in dieser Arbeit als Schlüsselfaktor zur Nutzung der Potenziale des AT gesehen. Wie mit dem Forschungsbedarf dargelegt wurde, besteht allerdings ein Unterstützungsbedarf für die erfolgreiche Anwendung des AT zur Produktvalidierung (vgl. Abschnitt 3.1). Daraus leitet sich das folgende Forschungsziel ab:

**Forschungsziel**

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Unterstützung der erfolgreichen<sup>3</sup> Anwendung von Additive Tooling als Prototypingtechnologie, um die effiziente und kontinuierliche Validierung im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung zu fördern.

Im Fokus der zu entwickelnden Methode steht die praktische, systematische Realisierung und Nutzung von AT-Werkzeugen für das Spritzgießen validierungsgeeigneter AT-Prototypen. Allerdings stellen die AT-Werkzeuge und die damit hergestellten AT-Prototypen nur ein Teilsystem einer Validierungsumgebung dar, die darüber hinaus sämtliche Ressourcen zur Erreichung eines Validierungsziels enthalten muss<sup>4</sup>. Da die Anwendung von Additive Tooling als Prototypingtechnologie in Wechselwirkung mit anderen Teilsystemen der Validierungsumgebung steht, muss auch stets die gesamte Validierungsumgebung in die Planung miteinbezogen werden. Entsprechend muss eine Methode zur Unterstützung der erfolgreichen Anwendung von AT auch an den entsprechenden Schnittstellen zu anderen Systemen innerhalb der Validierungsumgebung unterstützen oder diese zumindest berücksichtigen.

Für die sprachliche Abgrenzung und zur Verdeutlichung des Fokus der Zielstellung wird im Rahmen dieser Arbeit, aufbauend auf Definition 2 „Validierungsumgebung“ (siehe S. 24), die folgende ergänzende Definition eingeführt:

**Definition 7: Validierungsumgebung mit AT-Anwendung**

Im Kontext dieser Arbeit ist eine Validierungsumgebung mit AT-Anwendung eine konkrete Ausprägung des Handlungssystems, welche AT als Prototypingtechnologie zur Erstellung von AT-Prototypen für die Validierung nutzt und darüber hinaus sämtliche Ressourcen zur Erreichung mindestens eines Validierungsziels enthält.

Wenn im weiteren Verlauf dieser Arbeit Aktivitäten wie „Aufbau der *Validierungsumgebung mit AT-Anwendung*“ beschrieben werden, sind damit im Wesentlichen jene

---

<sup>3</sup> Vgl. Definition 6: Erfolgreiches Prototyping mit Additive Tooling, S. 79

<sup>4</sup> Vgl. Definition 2: Validierungsumgebung, S. 24

Aktivitäten gemeint, die unmittelbar mit der Planung, Umsetzung und Anwendung von AT zur Erreichung des Validierungsziels zusammenhängen. Dabei werden aber auch Planung, Realisierung und Anwendung weiterer Teilsysteme berücksichtigt, da diese in der Regel in Wechselwirkung mit dem AT stehen. Das Ziel der zu entwickelnden Methode liegt somit primär im Aufbau und in der Anwendung von AT-Werkzeugen sowie in der Validierung von AT-Prototypen. Gleichzeitig soll jedoch zumindest eine Schnittstelle für ergänzende Aktivitäten zur Planung und Umsetzung des übrigen Validierungssystems („Rest-Validierungssystem“) vorgesehen werden – auch wenn für diese keine explizite methodische Unterstützung bereitgestellt wird.

Zur weiteren Unterstützung in der Anwendung des AT sollen zudem notwendige oder nützliche Hilfsmittel, sowie Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien zur Verfügung gestellt werden. Überdies sollen durch Anwendungsstudien Referenzen geschaffen werden, die als Elemente eines Referenzsystems im Modell der SGE (vgl. Abschnitt 2.1.2.1) dienen können und die durch gezielte Variation auf Folgegenerationen oder weitere Entwicklungsprojekte übertragbar sind.

Eine Visualisierung der Zielstellung wird mit Abbildung 3.1 in Form eines vereinfachten, initialen Zielmodells - in Anlehnung an das *Initial Impact Model* nach Blessing und Chakrabarti (2009) - gegeben. Eine Konkretisierung des Zielsystems und eine Weiterentwicklung des Zielmodells erfolgt zu Beginn der PS auf Basis der Ergebnisse der DS-I (siehe Abschnitt 6.1).

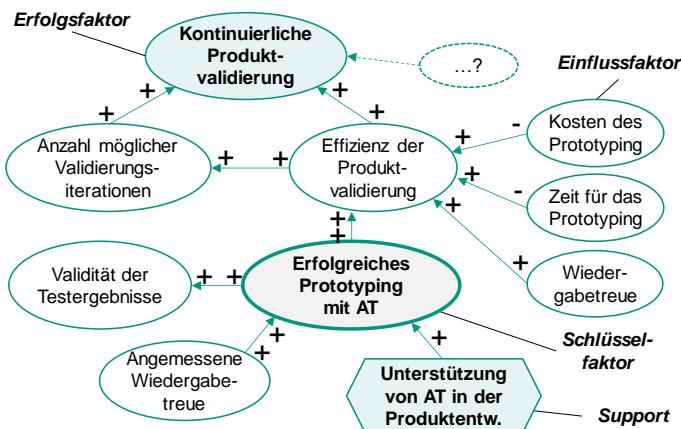


Abbildung 3.1: Initiales Zielmodell an die zu entwickelnde Unterstützung in Anlehnung an das *Initial Impact Model* nach Blessing und Chakrabarti (2009) zur Beschreibung des Forschungsziels

### 3.3 Forschungsthese und Forschungsfragen

Dem Forschungsziel wird die nachfolgende Forschungsthese zugrunde gelegt, welche in dieser Arbeit verifiziert oder falsifiziert werden soll.

#### **Zentrale Forschungsthese**

Die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten *AT-Systematik* unterstützt den Einsatz von Additive Tooling (AT) als Prototypingtechnologie in der Entwicklung von Spritzgussprodukten und fördert so die effiziente und kontinuierliche Validierung im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung.

Auf Basis des identifizierten Forschungsbedarfs und der formulierten Forschungsthese werden drei zentrale Forschungsfragen gestellt, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden.

#### **Forschungsfrage 1**

Welche Potenziale besitzt Additive Tooling im Hinblick auf eine effiziente Validierung physischer Prototypen im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung und welchen Herausforderungen in Bezug auf dessen Anwendung stehen Entwickelnde gegenüber?

#### **Forschungsfrage 2**

Wie ist eine Methode zu gestalten, mit der Entwickelnde das Potenzial des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung heben können?

#### **Forschungsfrage 3**

Welchen Beitrag leistet die erarbeitete Methode zur Nutzung der Potenziale des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung?

## 4 Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird die wissenschaftliche Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen erläutert. Der Aufbau dieser Arbeit und das Forschungsvorgehen orientieren sich dabei an der *Design Research Methodology (DRM)* nach Blessing und Chakrabarti (2009), welche im Folgenden näher erläutert wird (siehe Abschnitt 4.1) Anschließend werden die in dieser Arbeit angewandten empirischen Methoden (siehe Abschnitt 4.2) und die genutzte Forschungsumgebung (siehe Abschnitt 4.3) vorgestellt.

### 4.1 Einordnung in die Design Research Methodology

Die *Design Research Methodology (DRM)* nach Blessing und Chakrabarti stellt eine systematische, allgemeingültige und etablierte Struktur für Forschungsvorhaben zur Verfügung, welche auf die Methodenforschung in der Produktentwicklung ausgelegt ist. Ziel der Designforschung nach der DRM ist es, die Designpraxis effektiver und effizienter zu machen, um erfolgreichere Produkte entwickeln zu können. Dazu liegt der Fokus der DRM auf den Hauptbereichen *Verständnisentwicklung* (Formulierung und Validierung von Modellen, Phänomenen und Theorien über das Design) und *Unterstützungsentwicklung* (Unterstützungsmaßnahmen auf der Grundlage dieser Modelle und Theorien) (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 5). Kernstück der DRM ist ein Vorgehensmodell, das den Forschungsprozess in vier Stadien unterteilt. Je nach Art des Forschungsvorhabens können diese Stadien in unterschiedlicher Ausprägung durchlaufen werden. Die Durchführung der einzelnen Stadien wird nach DRM in *literaturbasiert*, *initial* und *umfassend* eingeteilt, womit sich verschiedene Konstellationen für ein mögliches Forschungsdesign ergeben (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18).

Die Evaluation der entwickelten Unterstützung orientiert sich an den drei von Blessing und Chakrabarti (2009, S. 184 f.) definierten Evaluationsarten *Support*-, *Application*- und *Success-Evaluation*. Dabei dient die *Support-Evaluation* (Unterstützungsevaluation) dem Testen der technischen Funktionalität sowie der Prüfung auf Widerspruchs- und Fehlerfreiheit und stellt somit die Durchführbarkeit des entwickelten Vorgehensmodells sicher. Anschließend erfolgt die *Application-Evaluation* (Anwendungsevaluation), welche die Anwendbarkeit und Nutzbarkeit der Unterstützung prüft. Die *Success-Evaluation* (Erfolgsevaluation) dient der Messung des Erfolgsbeitrags der Unterstützung.

Nachfolgend wird die Adaption der vier DRM-Stadien auf das Vorgehen in dieser Arbeit genauer beschrieben:

Mit der **Klärung des Forschungsgegenstandes** (Research Clarification, RC) wird die erste Phase im Vorgehensmodell der DRM umgesetzt. Sie dient der grundlegenden Bestimmung des Forschungsthemas. Die Einordnung in den Stand der Forschung sowie die Ableitung von Forschungszielen und Forschungsfragen wurden literaturbasiert durchgeführt (siehe Kapitel 3). Der Forschungsgegenstand dieser Arbeit besteht in der Entwicklung einer methodischen Unterstützung für die Anwendung von Additive Tooling zur Validierung in der Produktentwicklung.

Im Rahmen der **deskriptiven Studie I** (DS-I) wird ein spezifisches Verständnis für das Forschungsthema und das Forschungsziel gebildet (siehe Kapitel 5). In einer Markt- und Beschaffungsstudie werden aktuelle Preise und Lieferzeiten, sowie Kostentreiber des AT identifiziert und mit denen des konventionellen Tooling verglichen. Zudem wird eine Forschungsumgebung mit der Möglichkeit zur praktischen Anwendung des AT in Versuchen, Experimenten und Fallstudien aufgebaut. So können insbesondere eigene Konstruktionsrichtlinien erarbeitet und die entwickelte Unterstützung anhand praxisnaher Anwendungsfälle getestet werden. Aus technischer Sicht müssen dafür jedoch zunächst die additive Fertigung von AT-Formeinsätzen und deren Anwendung auf einer Spritzgussmaschine realisiert und selbstständig beherrscht werden. Neben der praktischen Identifikation von Problemen und Hürden werden im Rahmen einer Interviewstudie der Unterstützungsbedarf aus Anwendersicht und Anforderungen an eine Unterstützung ermittelt. Abschließend werden in einer Potenzialanalyse die wirtschaftlichen und technischen Potenziale und Risiken des AT im Kontext der Produktvalidierung zusammenfassend beleuchtet.

In der **präskriptiven Studie** (PS) wird anschließend die in der Zielsetzung angestrebte Unterstützung entwickelt (Kapitel 6). Dazu werden die Erkenntnisse aus der Literatur und den durchgeführten Studien zur Herleitung eines systematischen Vorgehensmodells für die Anwendung von AT in der Produktentwicklung genutzt. Zudem werden etablierte Methoden und Tools in das Vorgehensmodell integriert, sowie eigene, AT-spezifische Hilfsmittel entwickelt. Die Entwicklung der Unterstützung wird dabei soweit umgesetzt, dass ihre Kernfunktionalität hinsichtlich ihrer Eignung und Zweckerfüllung evaluiert werden kann (Support-Evaluation), womit es sich nach DRM um eine umfassende PS handelt. Dies entspricht insofern dem empfohlenen Vorgehen nach DRM, als dass die Support-Evaluation auch an Prototypen und Demonstratoren anstelle eines vollständig entwickelten Systems durchgeführt werden kann (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 144).

In der **deskriptiven Studie II** (DS-II) folgt die Evaluation der entwickelten Unterstützung (Kapitel 7). Für eine umfassende DS-II müsste der entwickelte Support in mehreren Feldstudien mit verschiedenen Unternehmen und Experten in realen Entwicklungsprojekten hinsichtlich Anwendbarkeit und Erfolgsbeitrag getestet und evaluiert werden. Da dies aufgrund des hohen Aufwandes in diesem Forschungsvorhaben zeitlich nicht realisiert werden kann, wird eine initiale DS-II durchgeführt. Diese enthält zwar die gleichen Schritte einer umfassenden DS-II, allerdings in einem gerin-geren Umfang (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 195). Dazu wird die Anwendbarkeit der *AT-Systematik* in praktischen, studentischen Fallstudien mit Unternehmensbe-teiligung nachgewiesen und die Unterstützung von den Anwendern (Studierenden) bewertet. Weiterhin werden die Ergebnisse der Fallstudien mit Experten diskutiert, welche zudem in semi-strukturierten Einzelinterviews die Anwendbarkeit und den möglichen Erfolgsbeitrag der Unterstützung beurteilen.

Die vier Stadien der DRM werden allerdings nicht sequenziell, sondern teilweise parallel und iterativ durchlaufen. So wird der Umfang der DS-I bei Bedarf weiter ausgedehnt, insofern die Unterstützungsentwicklung in der PS dies erfordert. Zu-dem beginnt die Unterstützungsevaluation, als Teil der DS-II, bereits parallel zur PS, um frühzeitig die Anwendbarkeit sicherzustellen und Verbesserungspotenziale er-schließen zu können.

Eine weitere Unterstützung für die Methodenentwicklung bietet Marxen (2014) mit dem *integrated Design Support Development Modell* (*iDSDM*). Dabei handelt es sich um einen Ansatz zur Modellierung von Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Methoden der Konstruktionsunterstützung auf Basis des iPeM<sup>1</sup>. Entsprechend legt MARXEN der Methodenentwicklung im *iDSDM* das ZHO-Modell zugrunde. Somit kann die Entwicklung von Methoden ebenso wie die Entwicklung von Produkten als eine iterative Überführung eines Zielsystems über ein Handlungssystem in ein Ob-jecktsystem beschrieben werden. Basierend auf diesem Verständnis wird in dieser Arbeit von einem Zielsystem für die Unterstützung gesprochen, das kontinuierlich erweitert und spezifiziert wird.

In Anlehnung an die DRM wird das Forschungsvorhaben wie in Abbildung 4.1 dar-gestellt strukturiert.

---

<sup>1</sup> Siehe Abschnitt 2.1.2.2.

DRM-Stadium	Fokus	Ergebnisse	Methoden	Kapitel
<b>Klärung des Forschungsgegenstandes (literaturbasiert)</b>	Forschungsgegenstand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forschungsbedarf</li> <li>• Forschungsfragen</li> <li>• Forschungsdesign</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Literaturanalyse</li> </ul>	3
↓				
<b>Deskriptive Studie I (umfassend)</b>	Verständnis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zielsystem an eine Unterstützung aus Zielen und Anforderungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Literaturanalyse</li> <li>• Markstudie</li> <li>• Techn. Versuche</li> <li>• Experteninterview</li> </ul>	5
⟳				
<b>Präskriptive Studie (umfassend)</b>	Unterstützung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konkretisierung des Zielsystems</li> <li>• Entwicklung der Methode zur Unterstützung des AT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Synthese)</li> </ul>	6
⟳				
<b>Deskriptive Studie II (initial)</b>	Evaluation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beitrag der Unterstützung</li> <li>• Identifikation von Verbesserungspotentialen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fallstudie</li> <li>• Live-Lab</li> <li>• Fragebogen</li> <li>• Experteninterview</li> </ul>	7

Abbildung 4.1: Forschungsvorgehen in dieser Arbeit in Anlehnung an die DRM nach Blessing und Chakrabarti (2009)

Das hier gewählte Vorgehen entspricht in seinem Umfang Typ 5 nach der DRM (vgl. Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Typen von Forschungsprojekten nach der DRM (in Anlehnung an Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 18)

Typ	Klärung des Forschungsgegenstandes (RC)	Deskriptive Studie I (DS-I)	Präskriptive Studie (PS)	Deskriptive Studie II (DS-II)
1	literaturbasiert	→ umfassend		
2	literaturbasiert	→ umfassend	→ initial	
3	literaturbasiert	→ literaturbasiert	→ umfassend	
4	literaturbasiert	→ literaturbasiert	→ literaturbasiert initial / umfassend	→ umfassend ←
5	<b>literaturbasiert</b>	<b>→ umfassend</b>	<b>→ umfassend</b>	<b>→ initial</b>
6	literaturbasiert	→ literaturbasiert ↑	→ umfassend ↑	→ umfassend ↓
7	literaturbasiert	→ umfassend ↑	→ umfassend ↑	→ umfassend ↓

## 4.2 Angewandte empirische Methoden

Die DRM nach Blessing und Chakrabarti (2009) stellt den strukturellen und systematischen Rahmen des Forschungsvorgehens und dieser Arbeit dar. Für die empirische Forschung werden allerdings zusätzlich empirische Methoden benötigt. Zur Auswahl passender Methoden beschreibt und kategorisiert Marxen (2014) verschiedene Forschungsmethoden. Mit Hilfe der von MARXEN entwickelten und von Bursac (2016) angepassten Methodensteckbriefe werden nachfolgend die in dieser Arbeit angewandten empirischen Methoden vorgestellt. Die praktische Anwendung erfolgt dabei meist in Kombination verschiedener Methoden, wie dem Live-Lab mit teilnehmender Beobachtung und anschließender Fragebogenstudie oder der Fallstudie mit anschließendem Interview.

### 4.2.1 Interview

Interviews können nach Art der Interview-Technik und ihrer Durchführung in zahlreiche Typen untergliedert werden, von denen sich viele jedoch überschneiden (Marxen, 2014, S. 105–108). Eine eindeutige Zuordnung zu einem bestimmten Interview-Typ ist daher schwierig. Die in dieser Arbeit angewandten Interview-Techniken entsprechen der Beschreibung nach MARXEN den Typen strukturiertes Interview, semi-strukturiertes Interview, begleitetes Interview und episodisches Interview. In Abbildung 4.2 sind die Anwendungsbereiche sowie die Vor- und Nachteile im Überblick dargestellt.

Interview	
<b>Anwendungsfeld:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen</li> <li>• Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen</li> <li>• Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen</li> <li>• Felder der Entwicklungsmethodik, in der die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist</li> </ul>	
<b>Vorteile:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Nachfragen zur Präzisierung der Antworten sind möglich</li> <li>• Missinterpretationen können vermieden werden</li> <li>• Forscher kann eingreifen</li> <li>• Direkte Datenerfassung</li> </ul>	<b>Nachteile:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufwändige Analyse bzw. Transkription der Interviews</li> <li>• Erschwerter Zugang zu großen Auswahlgruppen, da Interviews mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden sind</li> </ul>

Abbildung 4.2: Methodensteckbrief „Interview“ (nach Marxen, 2014, S. 108)

Insgesamt wurden zwei Interviewrunden geführt. Während der DS-I zur Ermittlung des Unterstützungsbedarfs aus Expertensicht (siehe Abschnitt 5.3) und während der DS-II zur Application- und Success-Evaluation (siehe Kapitel 7).

#### 4.2.2 Fragebogen

Fragebögen werden innerhalb der DS II zur Evaluation der Unterstützung eingesetzt. In dieser Arbeit werden ausschließlich Online-Fragebögen verwendet. Die Erstellung der Fragebögen basiert auf den Erfahrungen aus der DS-I. Für die Evaluation der Unterstützung findet zudem teilweise auch eine Kombination von Interview und Fragebogen statt, um sowohl qualitative Daten (z.B. in Form von Feedback) und quantitative Daten zu erheben. Eine Übersicht zur Methode gibt Abbildung 4.3.

<b>Fragebogen</b>	
<b>Anwendungsfeld:</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen</li><li>• Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen</li><li>• Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungs-Unterstützung in realen Prozessen</li><li>• Felder der Entwicklungsmethodik, in die die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist</li></ul>	<b>Vorteile:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Direkte Datenerfassung</li><li>• Einfacher Zugang zu großen Auswahlgruppen, vor allem mit online Umfragen</li><li>• Es steht eine große Anzahl von Online-Umfrage-Tools zur Verfügung</li></ul> <b>Nachteile:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Forscher kann nicht eingreifen</li><li>• Präzise Fragen müssen formuliert werden. Missverständnisse durch die Teilnehmer können die komplette Studie ruinieren</li></ul>

Abbildung 4.3: Methodensteckbrief „Fragebogen“ (nach Marxen, 2014, S. 110)

#### 4.2.3 Fallstudie

Die Fallstudie bietet für die Methodenforschung eine Möglichkeit, um Beobachtungen im Umfeld realer Entwicklungsprozesse durchzuführen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 268; Marxen, 2014, S. 100). Sie kann als Beobachtungsstudie zur explorativen Forschung oder zur Vorprüfung von Forschungsthesen beschrieben werden, bei der nur ein oder sehr wenige Fälle untersucht werden (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 268). Das Anwendungsfeld der Fallstudie sowie die Vor- und Nachteile werden in Abbildung 4.4 näher beschrieben.

Im Zuge dieser Arbeit wird die Fallstudie in Kombination mit weiteren empirischen Methoden zur Evaluation der entwickelten Unterstützung eingesetzt. Dazu werden möglichst realistische Entwicklungsfälle erstellt, welche von Probanden unter Zuhilfenahme der entwickelten Unterstützung bearbeitet werden sollen. Dadurch wird sowohl die qualitative Datenerhebung (z.B. durch teilnehmende Beobachtung), als auch die quantitative Datenerhebung (z.B. durch Messung in einem Experiment, Umfrage, Interview usw.) ermöglicht. Insgesamt wurden fünf Fallstudien (A bis E) mit Unternehmensbeteiligung durchgeführt, davon drei in Form einer *Live-Lab* Studie (Erläuterung siehe 4.2.4). Fallstudie A dient der Support-Evaluation (siehe Abschnitt 6.4). Zur Application- und Success-Evaluation dienen die Fallstudien B bis D im *Live-Lab*-Format (siehe Abschnitt 7.2) sowie die Fallstudie E (siehe Abschnitt 7.3). Die genaue Vorgehensweise und die Ergebnisse werden in den jeweiligen Kapiteln vorgestellt.

Fallstudie	
<b>Anwendungsfeld:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Explorative Forschung mit dem Ziel, Forschungsfragen zu identifizieren</li> <li>Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen</li> <li>Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen</li> <li>Untersuchung von komplexen Situationen, wenn das Ziel ein ganzheitliches Bild ist</li> <li>Identifikation von Hypothesen und Falsifizierung von Theorien</li> <li>Zeigt Anwendbarkeit / Nutzen einer Entwicklungsunterstützung</li> </ul>	
<b>Vorteile:</b>	<b>Nachteile:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ganzheitlicher Ansatz</li> <li>Funktioniert auch in komplexen Situationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Andauernde Diskussion, ob es eine gültige Forschungsmethode ist oder nicht</li> <li>Aufwand, durch die notwendige Anwendung von verschiedenen Forschungsmethoden</li> </ul>

Abbildung 4.4: Methodensteckbrief „Fallstudie“ (nach Marxen, 2014, S. 102)

#### 4.2.4 Live-Lab Studie

Die von Albers, Walter, Wilmsen und Bursac (2018) beschriebene *Live-Lab* Studie stellt eine spezielle Form der Fallstudie dar. Das Methodenprofil kann dem in Abbildung 4.5 dargestellten Steckbrief entnommen werden. Insbesondere zeichnet sich die *Live-Lab* Studie durch ihren realen Projektcharakter aus. Die Studienteilnehmer sollen sich während der Untersuchung primär in der Rolle als Produktentwickler und weniger als Probanden in einer empirischen Studie wahrnehmen, wodurch ein realitätsnahes Verhalten der Teilnehmer erzielt werden kann (Walter, Albers, Benesch & Bursac, 2017). Im Rahmen der Methodenentwicklung biete das *Live-Lab* daher

eine Möglichkeit zur Untersuchung von Designprozessen, -methoden und -werkzeugen unter realistischen Bedingungen bei gleichzeitig hoher Kontrollierbarkeit der Randbedingungen (Albers, Walter et al., 2018). Im Gegensatz zu reinen Laborstudien oder reinen Feldstudien ergibt sich somit ein guter Kompromiss zwischen interner und externer Validität.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurde ein Live-Lab im Format eines studentischen Workshops mit Unternehmensbeteiligung konzipiert und durchgeführt (siehe Abschnitt 7.2). Das Live-Lab Design und Workshopkonzept wird in Abschnitt 7.2.1 näher erläutert.

<b>Live-Lab Studie</b>	
<b>Anwendungsfeld:</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Empirische Forschung, Analyse von Entwicklungsprozessen</li><li>• Experimentelle Studien, Evaluation in kontrollierten Umgebungen</li><li>• Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realitätsnahen Prozessen</li><li>• Felder der Entwicklungsmethodik, in der die Wahrnehmung der Menschen bzgl. einer Situation oder einem Prozess von Interesse ist</li></ul>	
<b>Vorteile:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Bildung von Vergleichsgruppen</li><li>• Aktives Eingreifen möglich</li><li>• Guter Kompromiss zwischen interner und externer Validität</li><li>• Realitätsnahes Verhalten der Probanden</li></ul>	<b>Nachteile:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Durchführung ist an den Semester-Turnus gebunden</li></ul>

Abbildung 4.5: Methodensteckbrief „Live-Lab Studie“ (nach Albers, Walter et al., 2018)

#### 4.2.5 Teilnehmende Beobachtung

Die Beobachtung wird in die drei Kategorien „unstrukturierte Beobachtung“, „Beobachtung“ und „teilnehmende Beobachtung“ gegliedert (Marxen, 2014, S. 91–94). In dieser Arbeit finden die *Beobachtung* und *teilnehmende Beobachtung* während der Durchführung von Abschlussarbeiten, Fallstudien und Live-Lab-Studien in der Rolle des Co-Betreuers und „Beraters“ statt. Dies ermöglicht die Erhebung qualitativer Daten. Das Methodenprofil ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

(Teilnehmende) Beobachtung	
<p><b>Anwendungsfeld:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Empirische Forschung, Analyse von realen Entwicklungsprozessen</li> <li>• Anwendungsstudien, Einsatz von Entwicklungsunterstützung in realen Prozessen</li> <li>• Langzeitprojekte, welche Einblicke in Entwicklungsaktivitäten und Prozesse ermöglichen, indem die Datenquelle eine soziale Gruppe ist, in der der Forscher Mitglied wird</li> </ul>	
<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Datensammlung, da der Beobachter ein Teil der Datenquelle ist</li> </ul>	<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beobachtung kann die Entwickler von den Aktivitäten ablenken, die natürlichen Abläufe innerhalb des Teams werden gestört</li> <li>• Gefahr der Unerhlichkeit, um sich in einem guten Licht darzustellen, wenn den Team-Mitgliedern bewusst ist, dass der Forscher unter ihnen ist</li> </ul>

Abbildung 4.6: Methodensteckbrief „(Teilnehmende) Beobachtung“ (nach Marxen, 2014, S. 85, 94)

### 4.3 Forschungsumgebung

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines kooperativen Promotionsverfahrens zwischen dem *Institut für Produktentwicklung (IPEK)* am *KIT - Karlsruher Institut für Technologie* und der *Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg (HS Offenburg)*. Zu Beginn des Bearbeitungszeitraumes dieser Arbeit war der Verfasser für die technische Leitung des Labors Rapid Prototyping an der HS Offenburg verantwortlich. Für den praktischen Teil der Forschungsarbeit konnte daher auf Anlagen, Maschinen und Werkzeuge verschiedener Labore der HS Offenburg zurückgegriffen werden. Dazu zählen der für die praktischen Versuche eingesetzte 3D-Drucker „J750“ (Hersteller: Stratasys Ltd.) des Labors Rapid Prototyping, sowie ein Stammwerkzeug des Labors für Kunststofftechnik (siehe Anhang B).

Vom 01.03.2020 bis 31.12.2022 bestand ein Forschungsprojekt zwischen der HS Offenburg und der Braunform GmbH, welches vom Verfasser dieser Arbeit geführt und bearbeitet wurde. Dieses Projekt ermöglichte die praktische Erprobung von AT-Formeinsätzen und unterstützte damit die Entwicklung der AT-Systematik und deren Hilfsmitteln.

Zudem flossen in diese Forschungsarbeit auch Ergebnisse aus Abschlussarbeiten ein, die vom Verfasser mitbetreut wurden. Die Evaluation der AT-Systematik erfolgte in fünf Fallstudien (A - E), wovon zwei im Rahmen von Abschlussarbeiten mit Unternehmensbeteiligung (siehe Abschnitte 6.4 & 7.3, Fallstudien A & E) und drei in

Form von Live-Lab Studien an der HS Offenburg, mit der Braunform GmbH als industriellem Partner (siehe Abschnitt 7.2, Fallstudien B, C & D), durchgeführt wurden. Das Konzept und der Aufbau des Live-Labs in Form des „Workshop Additive Tooling“ wird in Abschnitt 7.2.1 genauer beschrieben. Im Rahmen dieser Workshops war der Verfasser nicht nur als Forscher, sondern auch als Betreuer und Dozent tätig.

## 5 Vertiefende Untersuchung und Bewertung von Additive Tooling

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der deskriptiven Studie I (DS-I) und derer Teilstudien vorgestellt. Weiterhin erfolgt damit die Beantwortung der Forschungsfrage 1 (FF1):

FF1: Welche Potenziale besitzt Additive Tooling im Hinblick auf eine effiziente Validierung physischer Prototypen im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung und welchen Herausforderungen in Bezug auf dessen Anwendung stehen Entwickelnde gegenüber?

Eine erste Einordnung des Potenzials von AT im Kontext der Produktentwicklung erfolgte bereits auf Basis des Forschungsstandes (siehe Kapitel 2) und in der Darlegung des Forschungsbedarfs (siehe Abschnitt 3.1). Innerhalb der DS-I soll neben der Klärung der übergeordneten Forschungsfrage 1 vorwiegend eine Vertiefung der bis hierhin vorgestellten Wissensbasis als Grundlage für die Entwicklung einer adäquaten Unterstützung von AT geschaffen werden. Dazu wurden drei unterschiedliche Studien durchgeführt. Da bestehende Studien zur Wirtschaftlichkeit des AT nur die Kalkulation von Formeinsätzen im Rahmen eigener Herstellung, nicht jedoch die Beschaffungssituation über Dritte untersuchten, erfolgte eine *Markt- und Beschaffungsstudie* (siehe Abschnitt 5.1). Weiterhin wird eine *technische Vorstudie* vorgestellt, bei der das AT zur Herstellung eines Spritzgussformeinsatzes für die Produktion von Zugproben genutzt wurde (siehe Abschnitt 5.2). Ziel dieser Vorstudie ist es, eigene fundierte Kenntnisse über den Einsatz von AT zu erlangen und eine geeignete Versuchsumgebung für Fallstudien zur Evaluierung der entwickelten Unterstützung aufzubauen. Zudem werden mit der Vorstudie notwendige Kernaktivitäten zur Nutzung von AT identifiziert. Das entwickelte Zugprobenwerkzeug und die generierten Daten dienen zudem als Teil des in den Evaluationsstudien zur Verfügung gestellten Referenzsystems. In einer *Interviewstudie* mit Experten aus dem Bereich des Spritzgießens und der Werkzeugentwicklung wurde der Status quo zum Vorgehen in der Entwicklung von Spritzgussprodukten und deren Werkzeuge ermittelt (siehe Abschnitt 5.3). Zudem wurden der Wissenstand der Experten im Bereich AT und ihre Anforderungen an eine Unterstützung erfragt.

Basierend auf den oben genannten Studien und dem Stand der Forschung werden anschließend die Potenziale des AT für die Validierung in der Produktentwicklung und die Hürden bei seiner Anwendung beschrieben (siehe Abschnitt 5.4). Ebenfalls

erfolgt auf dieser Grundlage die Konkretisierung des Unterstützungsbedarfs und des Zielsystems zur Entwicklung der Unterstützung (siehe Abschnitt 6.1). In Abbildung 5.1 wird das beschriebene Vorgehen visualisiert.

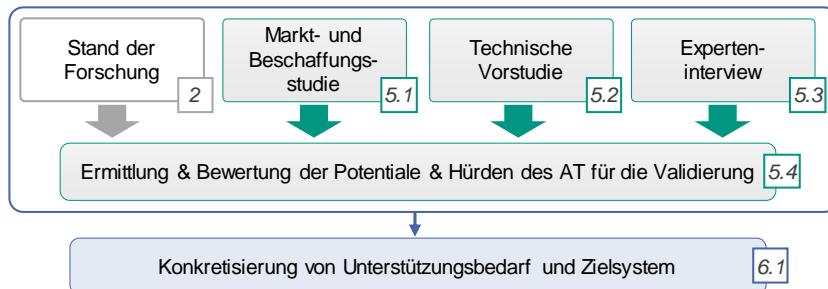


Abbildung 5.1: Übersicht zu den in Kapitel 5 durchgeföhrten Studien als Grundlage zur Potenzialbewertung und Ermittlung des in Kapitel 6 beschriebenen Unterstützungsbedarfs und Zielsystems.

## 5.1 Markt- und Beschaffungsstudie

Wie im Stand der Forschung beschrieben, werden Spritzgusswerkzeuge in der Regel durch einen Formteilentwickler (Produktentwickler) von einem Werkzeugbauer (Dienstleister) beschafft (vgl. Abschnitt 2.2.3.1). In dieser Beschaffungssituation verfügt der Werkzeugbauer über die notwendigen Kompetenzen und Ressourcen für die - bisher üblicherweise konventionelle - Werkzeugherstellung. Wie die in Abschnitt 5.3 beschriebene Interviewstudie zeigt, kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass entsprechendes AT-spezifisches Fertigungsfachwissen und die notwendigen AM-Anlagen für das AT im konventionellen Werkzeugbau zur Verfügung stehen. Es ist daher wahrscheinlich, dass AT-Formeinsätze, zumindest derzeit, bei einem AM-Dienstleister beschafft werden müssen.

Zwar zeigen die im Stand der Forschung beschriebenen Beispiele und Kostenmodelle, dass das AT ein Potenzial zur schnelleren und kostengünstigeren Herstellung von Formeinsätzen besitzt (vgl. Abschnitt 2.3.4.1), jedoch kann aus diesen Studien nicht ableitet werden, zu welchen Konditionen AT-Formeinsätze tatsächlich am Markt verfügbar sind und ob die beschriebenen Potenziale bei einer Fremdfertigung der Formeinsätze bestehen bleiben. In der Praxis spielen bei der Angebotserstellung zusätzlich zur reinen Fertigungskostenkalkulation auch Angebotspauschalene, Mengeneffekte, Rabatte oder die Beziehung zum Dienstleister eine Rolle.

Da zur Beschaffungssituation von AT-Formeinsätzen bisher keine Daten aus der Forschung bekannt sind, wurde eine Markt- und Beschaffungsstudie durchgeführt. Ziel der Studie ist es, einen Überblick über die Verfügbarkeit, sowie zu Preisen und Lieferzeiten von additiv hergestellten Spritzgussformeinsätzen zu erlangen und einen Vergleich zu konventionell hergestellten Formeinsätzen zu ermöglichen. Die Studie wurde in zwei Teilen durchgeführt und dabei insbesondere in den Phasen der Studienvorbereitung und der Datenerhebung durch die studentischen Abschlussarbeiten von Chang (2020)<sup>1</sup> und Kaltenbach (2021)<sup>2</sup> unterstützt, welche beide vom Verfasser co-betreut wurden. Die Dateninterpretation zur Potenzialanalyse von AT und Teile der Datenauswertung erfolgte anschließend vom Verfasser dieser Dissertationsschrift. Der erste Teil der Studie wurde bereits in Schrock, Chang, Junk und Albers (2020) veröffentlicht. Im Folgenden werden das Vorgehen und die Kernergebnisse beider Studienteile vorgestellt.

### 5.1.1 Studiendesign

Im ersten Teil der Studie wurden die klassische CNC-Werkzeugfertigung in Stahl, die HSC-Fertigung<sup>3</sup> in Aluminium, sowie das AT mit Photopolymeren (mit Fokus auf das PJM-Verfahren, vgl. Abschnitt 2.3.3.3), verglichen. Ziel der Studie war es, einen ersten Überblick über Preise und Lieferzeiten zu erhalten. Außerdem sollte der Einfluss verschiedener geometrischer Merkmale wie Größe und Komplexität (z.B. durch Kühlkanäle) untersucht werden. Dazu wurden verschiedene Formeinsätze (FE-1 bis FE-3) in den Größen

- Gr.1 = 100 x 70 x 20 mm,
- Gr.2 = 200 x 140 x 40 mm,
- Gr.3 = 300 x 210 x 60 mm

pro Formhälfte konstruiert (siehe Abbildung 5.2). Der Formeinsatz FE-2 „Zugprobe“ wurde darüber hinaus in einer Variante mit und in einer Variante ohne Kühlkanäle ausgeführt. FE-3 ist ein Formeinsatzpaar aus den Formhälften „Formnest“ und „Kern“. In Summe lagen somit 15 Formeinsatzpaare für die Angebotsanfrage vor.

Die Anfrage erfolgte entweder per Mail oder durch direkte Online-Kalkulation. Dafür wurden die CAD-Daten der Formeinsätze, sowie zusätzlich zur Anfrage per Mail auch noch technische Zeichnungen genutzt. Die Formeinsatzkonstruktion, die Recherche geeigneter Dienstleister, die Angebotsanfrage sowie die Angebotsaufbereitung erfolgte im Rahmen der Abschlussarbeit von Chang (2020)<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>3</sup> HSC: High Speed Cutting.

<sup>4</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

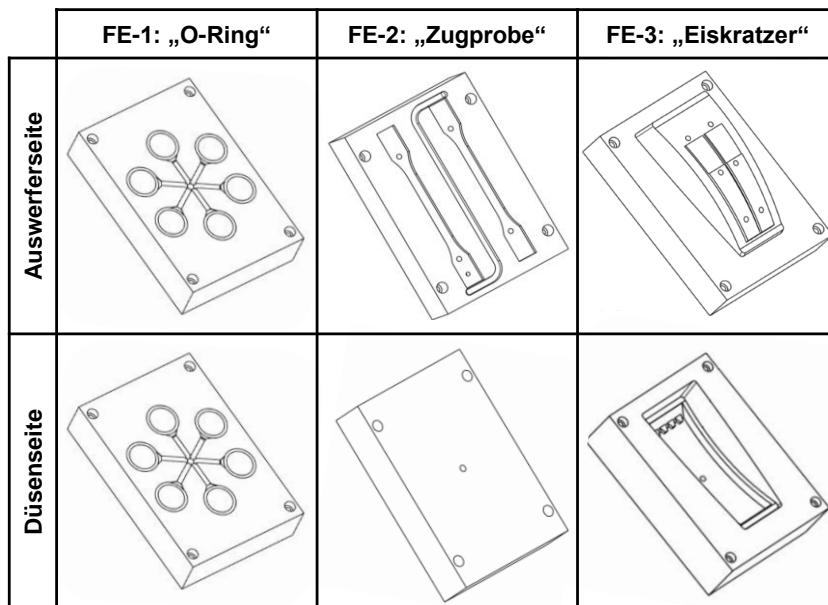


Abbildung 5.2: Übersicht zu den Formeinsätzen FE-1 bis FE-3 des ersten Studienteils (in Anlehnung an Chang (2020))

Der zweite Studienteil wurde nach gleichem Vorgehen durchgeführt. Allerdings wurde nun ein stärkerer Fokus darauf gelegt, den Einfluss von Komplexität und Funktionalität auf den Angebotspreis und die Lieferzeit zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden die Formeinsätze FE-4 bis FE-6 konstruiert, deren Größe sich an der kleinsten Größe aus Studienteil eins (Gr.1) orientiert, da diese sich als wirtschaftlich geeignet bzw. konkurrenzfähig zur konventionellen Werkzeugfertigung erwies (die Darstellung der Formeinsätze FE-4 bis FE-6 ist in Abbildung 5.4 auf S. 100 enthalten). Ein unterscheidendes Merkmal ist das im Fall der konventionellen Fertigung zu zerspanende bzw. im Fall der additiven Fertigung zu generierende Volumen. Weiterhin unterscheiden sich die Formeinsatzvarianten in ihrem Fertigungsaufwand. Während es sich bei FE-4 um ein „einfaches Auf-Zu-Werkzeug“ mit simpler Geometrie handelt, ermöglicht FE-5 bereits die manuelle Entformung von Formteilen mit Hinterschneidungen. FE-6 besitzt die komplexeste Geometrie und ermöglicht die automatische Entformung von Formteilen mit Hinterschneidungen durch Schieberlemente. Die Basisdaten der Formeinsätze können Anhang C entnommen werden. Wie im ersten Studienteil wurden CAD-Daten und technische Zeichnungen zur Angebotsanfrage per Mail oder Online-Kalkulation genutzt. Die Formeinsatzkonstruktion, die Recherche geeigneter Dienstleister, die Angebotsanfrage sowie die

Angebotsaufbereitung erfolgte im Rahmen der Abschlussarbeit von Kaltenbach (2021)<sup>5</sup>.

### 5.1.2 Studienergebnisse

Im **ersten Studienteil** wurden 63 Dienstleister ermittelt, von denen 38 aus der konventionellen und 25 aus der additiven Fertigung stammen. Bei der Art der Anfrage kann grundlegend zwischen der persönlichen Anfrage per E-Mail bzw. Kontaktformular und der sofortigen, aber unpersonlichen Angebotserstellung durch ein Online-Tool unterschieden werden. Von den 38 Dienstleistern der konventionellen Fertigung boten 30 % eine sofortige Online-Kalkulation auf Basis des CAD-Modells an. Bei den restlichen 70 % wurden Angebote per Mail angefordert. Von den 25 Dienstleistern der AM-Branche boten mit 46 % fast die Hälfte eine sofortige Online-Preisermittlung. Dies ist insofern interessant, als die durchschnittliche Angebotszeit<sup>6</sup> bei E-Mail-Anfragen für die CNC-Fertigung bei 8,3 Arbeitstagen lag. Die durchschnittliche Angebotszeit für die AT-Fertigung lag dagegen bei nur 3 Arbeitstagen. Die Online-Kalkulation führte immer zu einer sofortigen Angebotsauskunft. Zudem lag die Angebotsquote<sup>7</sup> per Mail bei der konventionellen Fertigung bei nur 20 %. Bei der AM-Fertigung konnte dagegen mit 37 % eine höhere Angebotsquote festgestellt werden. Ein möglicher Grund für die schnellere Angebotserstellung und höhere Angebotsquote könnte in der potenziell einfacheren Angebotserstellung für AM-Teile liegen. Gängige AM-Software berechnet auf Basis des CAD-Modells und der Fertigungsparameter direkt die benötigte Fertigungszeit und den Materialverbrauch. Auf dieser Grundlage lässt sich ohne größeren Aufwand ein Angebot erstellen. Aus Sicht der Schnelligkeit ist die Online-Preisauskunft daher zu bevorzugen. Eine persönliche Beratung oder Prüfung der Daten durch einen Experten entfällt bei dieser Option jedoch zunächst. Hinzu kommt, dass sich bei der additiven Fertigung auch die Vorlaufzeiten verkürzen, da nur noch CAD-Daten benötigt werden und somit die Erstellung einer technischen Fertigungszeichnung entfallen kann.

Insgesamt wurden im ersten Studienteil 155 Einzelpreise für die CNC-Fertigung, 123 Einzelpreise für die HSC-Fertigung und 81 Einzelpreise für die additive Fertigung eingeholt und ausgewertet. Für den Erhalt der CNC- und HSC-gefertigten Formeinsätze, wurde eine Gesamtzeit<sup>8</sup> von durchschnittlich ca. 19 bzw. 18 Arbeitstage ermittelt. Für die additive Fertigung wurde eine durchschnittliche Gesamtzeit von 11 Arbeitstagen ermittelt (Schrock et al., 2020, S. 265). Im Vergleich zur CNC-Fertigung besteht somit ein Potenzial, die Zeit von der Anfrage bis zum Erhalt der

---

<sup>5</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>6</sup> Angebotszeit: Dauer ab der Anfrage bis zum Erhalt eines Angebotes.

<sup>7</sup> Angebotsquote: Verhältnis von erhaltenen Angeboten zu gestellten Anfragen.

<sup>8</sup> Gesamtzeit: Summe aus Angebotszeit und im Angebot angegebener Lieferzeit.

Formeinsätze um durchschnittlich 43 % zu verkürzen (siehe Abbildung 5.3). Jedoch bieten viele Dienstleister auch die Option einer Express-Lieferung an, die allerdings mit einem Aufpreis verbunden ist. Um den Vergleich nicht zu verfälschen, wurde diese Option in der Studie nicht berücksichtigt. Auf den Zusammenhang zwischen Preis und Lieferzeit wird in den Ergebnissen des zweiten Studienteils eingegangen.

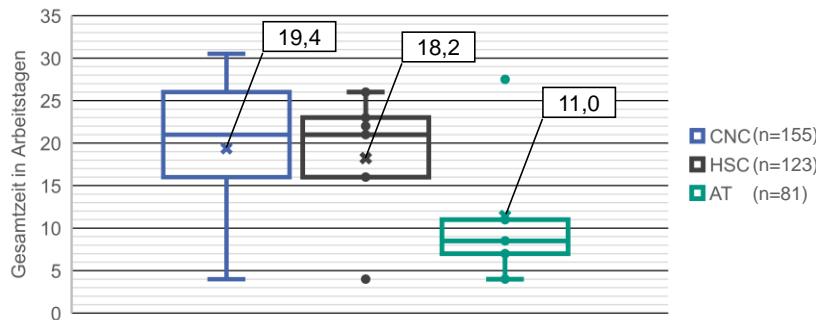


Abbildung 5.3: Durchschnittliche Beschaffungszeit ( $\bar{x}$ ) von Angebotsanfrage bis prognostizierter Lieferung für die Formeinsatzvarianten FE1-FE3 (Schrock et al., 2020, S. 265)

Die von Chang (2020)<sup>9</sup> erfassten Angebotspreise können in zusammengefasster Form aus Anhang C entnommen werden. Daraus wird ersichtlich, dass die Preise selbst innerhalb einer Fertigungstechnologie eine hohe Streuung aufzeigen und in der Regel ein Vielfaches zwischen dem günstigsten und teuersten Dienstleister liegt. Für die Formeinsatzgröße Gr.1 (100 x 70 x 20 mm) besteht, bis auf eine Ausnahme, über alle Varianten hinweg sowohl das günstigste Einzelangebot, als auch der niedrigste Mittelwert stets bei der additiven Fertigung. Bei der Ausnahme handelt es sich um die Düsenseite von FE-2, welche den geringsten Zerspanungsaufwand aufweist. Wie ebenfalls ersichtlich wird, sind die Angebote zur additiven Fertigung der Formeinsätze in den Größen Gr.2 (200 x 140 x 40 mm) und Gr.3 (300 x 210 x 60 mm) wirtschaftlich meist nicht mehr konkurrenzfähig gegenüber den Vergleichsangeboten der konventionellen Fertigung. Lediglich im Fall des FE-2 in Größe Gr.2 mit Kühlkanal liegen einige Angebote für die additive Fertigung nur knapp über denen der CNC-Fertigung. In der Gruppe der CNC- bzw. HSC-Fertigung wird die Variante mit Kühlkanal teurer angeboten als ohne Kühlkanal, wie aufgrund des höheren Bearbeitungsaufwandes auch erwartet wurde. In der Gruppe der additiven Fertigung hingegen bestehen kaum Preisunterschiede zwischen den Varianten mit bzw. ohne Kühlkanal. Dies dürfte sich mit der hohen Geometriefreiheit der

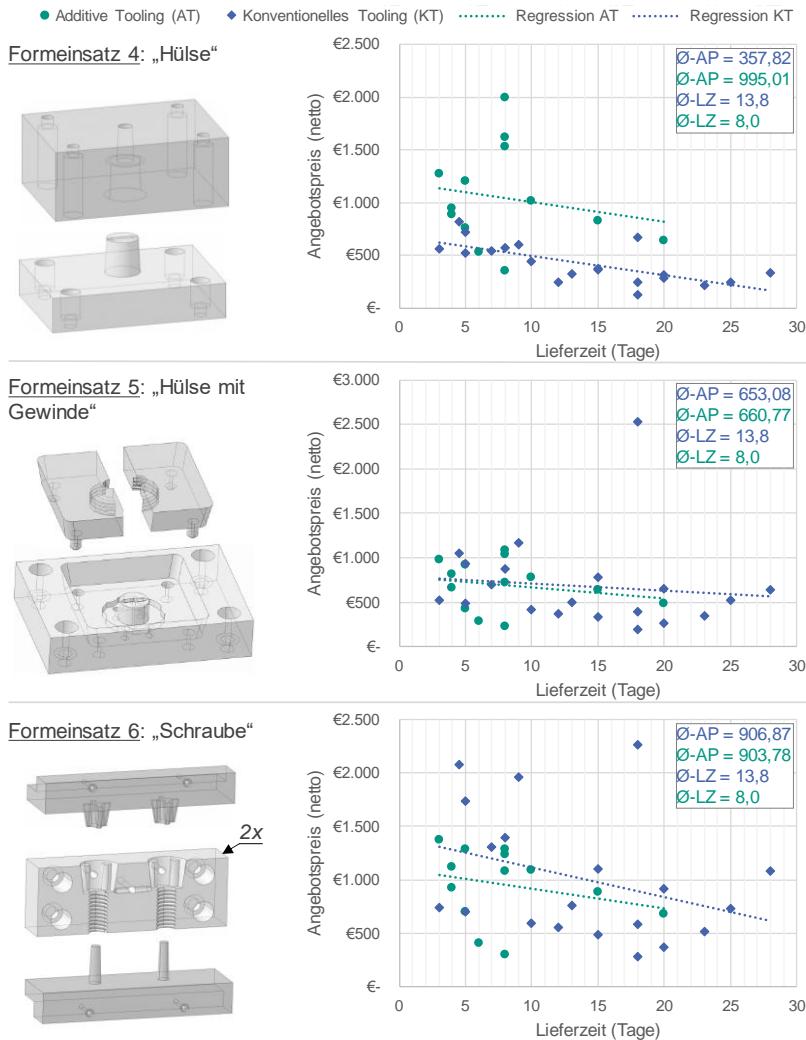
<sup>9</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

additiven Fertigung begründen, für die eine Realisierung von Kanälen keinen Zusatzaufwand darstellt.

Die im **zweiten Studienteil** ausgewerteten Angebote zeigen ebenfalls eine hohe Streuung hinsichtlich Preisen und Lieferzeiten (vgl. Abbildung 5.4). Insbesondere die Angebote für die konventionelle Fertigung von FE-4 zeigen zudem mit einem Korrelationskoeffizienten (nach Pearson) von  $r = -0,71$  eine negative Korrelation zwischen Preis und Lieferzeit. Das bedeutet, dass der Preis mit zunehmender Lieferzeit abnimmt bzw. mit sinkender Lieferzeit steigt. Aufgrund der allgemein hohen Streuung lässt sich eine Korrelation statistisch jedoch nicht weiter bestätigen. Einige Dienstleister bieten niedrige Preise in Verbindung mit kurzen Lieferzeiten an, andere bieten hohe Preise in Verbindung mit langen Lieferzeiten an. Es lässt sich dennoch ein Trend zu abnehmenden Preisen bei höheren Lieferzeiten erkennen, wie durch die Regressionsgeraden in Abbildung 5.4 dargestellt wird.

Eine weitere Beobachtung betrifft den Einfluss der Bauteilkomplexität und des Bauteilvolumens auf die Angebotspreise. Es ist zu erkennen, dass die Angebotspreise für das AT für den vergleichsweise großvolumigen und einfach zu fertigenden FE-4 im Schnitt deutlich über denen des konventionellen Tooling liegen. Bei FE-5, welcher ein geringeres Volumen und eine höhere Komplexität besitzt, nähern sich die Preise von AT und konventionellem Tooling an. FE-6 weist die geometrisch höchste Komplexität auf und liegt mit seinem Volumen zwischen FE-4 und FE-5. Hier liegen die Angebotspreise von AT im Schnitt unter denen des konventionellen Tooling.

Basierend auf diesen Daten zeigen sich die *geometrische Komplexität* und das *Formeinsatzvolumen* als wesentliche Kostentreiber. Bei der CNC-Fertigung steigen die Fertigungskosten und -zeiten mit zunehmender Komplexität der zu bearbeitenden Geometrie. Gründe hierfür können z.B. ein erhöhter Fertigungsaufwand bei größerem Zerspanungsvolumen, zusätzliche Fertigungsschritte, häufigeres Umspannen, erhöhter Rüstaufwand oder der Bedarf an teureren Maschinen und Werkzeugen sein. Bei der additiven Fertigung hingegen fällt die Komplexität aufgrund der hohen Geometriefreiheit des AM weniger stark ins Gewicht. Dafür hängen die Fertigungszeiten und -kosten der additiven Fertigung stark vom zu generierenden Volumen ab, da die eingesetzten AM-Materialien vergleichsweise teuer sind und die Fertigungszeit mit dem Bauteilvolumen, insbesondere der Höhe (z-Achse), überproportional ansteigt. Dieser Zusammenhang lässt sich anhand der jeweils verfahrenstypischen Arbeitsweise auch wie folgt ausdrücken: Bei der subtraktiven Fertigung verursacht jedes zu entfernende Volumen einen Aufwand, während bei der additiven Fertigung jedes zu erzeugende Volumen einen Aufwand verursacht. Je höher die Komplexität des Formeinsatzes ist und je geringer das zu generierende Volumen ausfällt, desto höher ist das wirtschaftliche Potenzial von AT.



(Durchschnittswerte sind auf Basis des arithm. Mittels berechnet)

Abbildung 5.4: Preis- und Lieferzeitvergleich der Formeinsatzvarianten FE4 (niedrigste Komplexität) bis FE6 (höchste Komplexität) (in Anlehnung an Kaltenbach, 2021<sup>10</sup>)

<sup>10</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

### 5.1.3 Zwischenfazit

Wie mit der vorliegenden Markt- und Beschaffungsstudie gezeigt wurde, hängt die wirtschaftliche Eignung von AT gegenüber dem konventionellen Tooling von verschiedenen Faktoren, wie der geometrischen Komplexität oder dem Volumen der Formeinsätze ab. Für einfache Geometrien oder großvolumige Formeinsätze liegen die Beschaffungskosten bei AT höher als beim KT. Für kleinere Volumina und komplexere Formeinsatzgeometrien wurden für AT hingegen tendenziell günstigere Preise gegenüber dem KT ermittelt. Konventionell aufwändig zu fertigende Geometrien, wie Kühlkanäle, stellen bei additiver Fertigung keinen zusätzlichen Aufwand dar und führen entsprechend zu keinen Preissteigerungen. Weiterhin konnten für AT-Formeinsätze, unabhängig von Größe und Komplexität, tendenziell niedrigere Beschaffungszeiten ermittelt werden.

Die Studienergebnisse zeigen somit, dass AT gegenüber KT, im Falle der Beschaffung von Formeinsätzen über Dritte, ein hohes Potenzial zur Verkürzung der Beschaffungszeit bietet. Zusätzlich besteht bei niedrigvolumigen, geometrisch komplexen Formeinsätzen das Potenzial der Kostenreduktion. Die Ergebnisse lassen jedoch keine Rückschlüsse auf den Anteil der Fertigungskosten und -zeiten an den Gesamtkosten und -zeiten zu, da eine entsprechende Aufschlüsselung nicht aus den eingeholten Angeboten hervorgeht. So kann z.B. von einer kurzen Beschaffungszeit nicht auf eine kurze Fertigungszeit oder von hohen Angebotskosten nicht direkt auf hohe Fertigungskosten geschlossen werden. Allerdings sprechen die in Abschnitt 2.3.4 vorgestellten Studien dafür, dass AT in vielen Fällen die kostengünstigere und schnellere Fertigungstechnologie darstellen kann.

Da zwischen den angefragten Anbietern zum Teil erhebliche Preis- und Lieferzeitunterschiede festgestellt wurden, sollte bei einer Beschaffung über Dritte ein Anbietervergleich durchgeführt werden. Als Einschränkung dieser Studie ist anzumerken, dass vor der Angebotsanfrage keine Beziehung zu den Dienstleistern bestand, was in der Praxis jedoch häufig der Fall ist. Eine Beziehung zwischen Auftraggeber und Dienstleister könnte zu anderen Preisen und Lieferzeiten führen, als in der Studie ermittelt.

## 5.2 Technische Vorstudie: „Zugprobenwerkzeug“

Ziel der technischen Vorstudie ist der Aufbau eigenen Erfahrungswissens und eines tieferen Verständnisses für die technischen Besonderheiten des AT, wie AT-gerechtes Design, geeignete Prozessparameter und potenzielle Fehlerquellen. Dabei wurden drei wesentliche Teilziele verfolgt:

1. Es soll ein geeignetes Vorgehen zur Auslegung und Anwendung der AT-Formeinsätze entwickelt werden. Dazu sollen AT-Formeinsätze konstruiert, hergestellt und zur Fertigung von Spritzgussformteilen verwendet werden.
2. Es soll eine Versuchsumgebung aufgebaut werden, in der praktische Anwendungsversuche durchgeführt werden können und die als Teil der Methodenevaluation genutzt werden kann.
3. Die gewonnenen Daten sollen innerhalb der zu entwickelnden Unterstützung als Referenzsystemelemente zur Verfügung stehen und somit bei der Bewertung des Einflusses von AT und abweichenden Prozessparametern auf die Wiederabetreue von AT-Prototypen helfen. Zudem sollen die erzeugten Objekte, wie CAD-Daten, Zeichnungen, Messwerte, Formeinsätze und Spritzgussteile als Referenzsystemelemente innerhalb der Evaluationsstudien dienen.

Teilergebnisse der Vorstudie wurden bereits in Schrock, Proksch, Rapp, Junk und Albers (2021) veröffentlicht. Im Folgenden wird daher nur auf die Kernergebnisse und auf noch nicht veröffentlichte Ergebnisse eingegangen.

### 5.2.1 Studiendesign & Versuchsaufbau

Zunächst wurde ein AT-Formeinsatz nach gängigen Methoden und Berechnungsformeln aus Lehrbüchern für die konventionelle Werkzeugfertigung, sowie auf Basis eigener Erfahrungen im Bereich AM ausgelegt und zum Spritzgießen von Zugproben eingesetzt. In Ermangelung eines AT-spezifischen Ansatzes war die Suche nach einer funktionierenden Lösung also ein iterativer Prozess des Ausprobierens, des Scheiterns und des Lernens.

Die Auslegung und Konstruktion der AT-Formeinsätze sowie die Ermittlung initialer Prozessparameter erfolgte im Rahmen der studentischen Seminararbeit von Proksch (2020b)<sup>11</sup>. Als Grundlage diente die Vorarbeit von Müller (2017)<sup>12</sup>, in welcher bereits Teile der Auslegung von Stammwerkzeug und Stahlformeinsatz stattfanden. Die Fertigung der AT-Formeinsätze wurde vom Autor dieser Arbeit vorgenommen. Dazu wurde der 3D-Drucker *J750* und das Material *Digital ABSplus (RGD515 & RGD531)* verwendet (siehe Anhang B1). Ein Überblick über den Werkzeugaufbau wird in Abbildung 5.5 gegeben (Details siehe Anhang B2).

Die Durchführung der Spritzgussversuche erfolgte im Labor für Kunststofftechnik der Hochschule Offenburg und bei einem Partnerunternehmen. Die Einstellungen und Parameter für die additive Fertigung und das Spritzgießen sowie der skizzierte Versuchsaufbau können den Anhängen D1 und D2 entnommen werden. Beide

---

<sup>11</sup> Unveröffentlichte Seminararbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>12</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit.

Formeinsatzhälften wurden nach jedem Schuss mittels Druckluft auf ca. 35 °C gekühlt, um die Standzeit zu erhöhen. Die Überprüfung der Temperatur wurde mit einer Thermographiekamera durchgeführt, sodass auch unzureichend gekühlte Bereiche und Hotspots identifiziert werden konnten. Im Anschluss an den ersten Versuchsdurchlauf wurde das Vorgehen in einem Ablaufdiagramm beschrieben und ausgewertet (vgl. Schrock, Junk & Albers, 2022, S. 5). Auf Basis aufgetretener Fehler und Probleme wurde anschließend, parallel zur konstruktiven Überarbeitung des AT-Formeinsatzes, ein optimiertes Vorgehensmodell entwickelt und getestet.

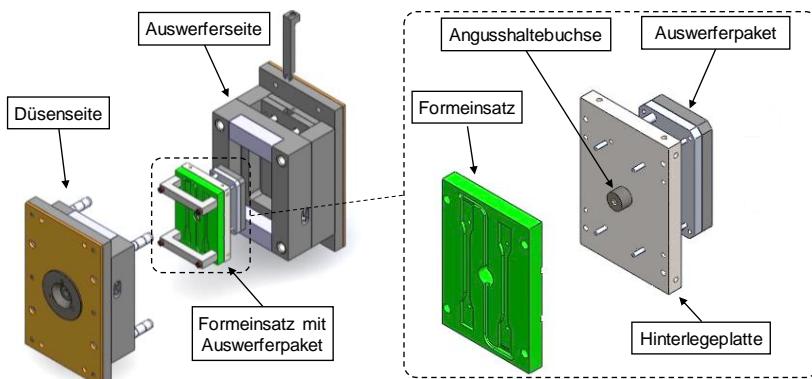


Abbildung 5.5: Aufbau des Schnellwechselwerkzeugs mit Auswerferpaket und Zugproben-Formeinsatz (in Anlehnung an Proksch, 2020a, S. 34)

Um die Auswirkungen des AT auf die Formteileigenschaften amorpher und teilkristalliner Thermoplaste näher zu bestimmen und quantifizierte Erkenntnisse als Wissens- bzw. Referenzsystemelemente zur Verfügung stellen zu können, wurden in Kooperation mit einem Forschungspartner Zugproben nach DIN EN ISO 527-1/-2 vom Typ 1A hergestellt und im Zugversuch nach dieser Norm geprüft.

Auf Basis der theoretischen Grundlagen zur Kunststoffverarbeitung (siehe Abschnitte 2.2.2.1 & 2.2.2.2) und der Forschungsarbeiten von Volpato et al. (2016), Kampker et al. (2019), Simpson et al. (2019) und Mitterlehner et al. (2020) wird vermutet, dass die längere Abkühlzeit bei Verwendung von AT-Formeinsätzen insbesondere bei teilkristallinen Thermoplasten einen Einfluss auf die technischen Eigenschaften der Formteile hat (vgl. Abschnitt 2.3.4.2 b). Für den Vergleich wurden Zugproben aus *Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS, amorph)*, *Polypropylen (PP, teilkristallin)* und *Polybutylenterephthalat (PBT, teilkristallin)* sowohl mit einem AT-Formeinsatz, als auch mit einem Referenzformeinsatz aus Stahl hergestellt und geprüft.

## 5.2.2 Studienergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die Erfahrungen und Ergebnisse hinsichtlich Auslegung, Bau und Anwendung der gefertigten Formeinsätze geschildert (siehe Abschnitt 5.2.2.1). Anschließend werden die Ergebnisse der Zugversuche im Hinblick auf die Wiedergabeteufe von AT-Prototypen bewertet (siehe Abschnitt 5.2.2.2).

### 5.2.2.1 Auslegung, Bau und Anwendung des AT-Formeinsatzes

Wie in Schrock et al. (2022) gezeigt wird, endete der erste Versuchsdurchlauf mit dem Versagen des AT-Formeinsatzes während des Abmusterungsprozesses, so dass keine Prototypenserie produziert werden konnte. Das Versagen des Formeinsatzes trat in einem schmalen Kantenbereich des Formeinsatzes auf (siehe Abbildung 5.6, li.). Im Sinne eines schnellen, iterativen Vorgehens wurde für die Auslegung der Formeinsätze keine Prozess- oder Werkzeugsimulation durchgeführt. Wie die nachträgliche Untersuchung im Rahmen der co-betreuten Abschlussarbeit von Proksch (2020a, S. 32f.)<sup>13</sup> jedoch zeigt, wäre auf Basis der Ergebnisse einer strukturmechanischen Simulation<sup>14</sup> ersichtlich gewesen, dass der AT-Formeinsatz im versagenden Bereich nicht ausreichend stabil ausgelegt war und überarbeitet werden muss (siehe Abbildung 5.6, re.).

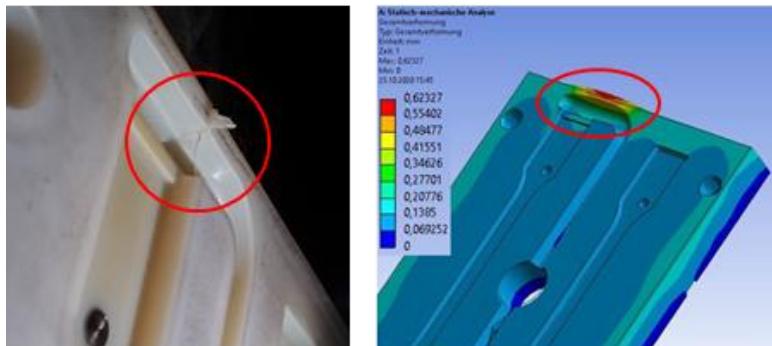


Abbildung 5.6: Beschädigter Formeinsatz (li.) und Simulationsergebnis (re.) (in Anlehnung an Proksch, 2020a<sup>15</sup>, zitiert nach Schrock et al., 2022)

Zudem zeigen die während des Versuchs aufgenommenen Wärmebildaufnahmen, dass in diesem Bereich ein Hotspot<sup>16</sup> vorliegt (siehe Anhang D, Abbildung D3.1).

<sup>13</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>14</sup> Simuliert wurde die auf den Formeinsatz wirkende Werkzeugschließkraft  $F_z$ .

<sup>15</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>16</sup> Hotspot: Bereich höchster Wärmeintensität.

Auf Basis der Daten von Mendible et al. (2017, S. 346–347), zu sich verschlechtern den Materialeigenschaften von *Digital ABS* unter Wärmeeinwirkung, wird das Werkzeugversagen auf eine Kombination aus mechanischer und thermischer Belastung zurückgeführt (vgl. Abschnitt 2.3.4.2 a). Als Indiz für eine Materialschädigung im Bereich des Hotspots wurde eine zunehmende lokale Gelbfärbung des Formeinsatzes beobachtet (siehe Abbildung 5.6 & Anhang D, Abbildung D3.4). Neben dieser Vergilbung bildete sich nach einigen Zyklen zunehmend ein Abdruck des Formnestes der Auswerferseite auf der ebenen Formeinsatzfläche der Düsenseite ab (siehe Anhang D, Abbildung D3.4). Die thermomechanische Belastung führt also auch zu einer plastischen Deformation der AT-Formeinsätze. Wie auch die mechanische Belastung hätten Lage und Temperatur des Hotspots bereits vorab durch eine Prozesssimulation ermittelt werden können. Dass in Bezug auf AT hinreichend genaue Simulationsergebnisse erzielt werden können, zeigen die Untersuchungen von Mischkot und Tosello et al. (2017), Bogaerts et al. (2018) und Timofeeva et al. (2019) (vgl. Abschnitt 2.3.4.2 d).

Da von der Werkzeug- bzw. Formeinsatzüberarbeitung ein formgebender Bereich betroffen war, erforderte dies auch eine Überarbeitung des Formteils. Mit dem überarbeiteten Formeinsatz konnten schließlich 80 Formteile aus PP hergestellt werden. Da nur leichte Verschleißerscheinungen sichtbar waren, hätten wahrscheinlich weitere Formteile hergestellt werden können. Aufgrund der langen Zykluszeit von ca. vier Minuten wurde die Versuchsreihe allerdings vorzeitig abgebrochen. Die wesentlichen Prozessschritte und die daraus resultierenden Objekte des Referenzsystems sind in Abbildung 5.7 aufgeführt.

- 1) Produktdesign
- 2) Werkzeugauslegung
- 3) Prozesssimulation
- 4) Werkzeugsimulation
- 5) Additive Fertigung
- 6) Post-Processing
- 7) Rüsten und Abmustern
- 8) Prototypen im Spritzguss herstellen

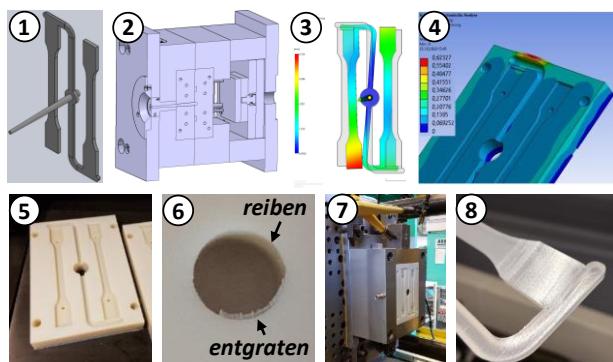


Abbildung 5.7: Darstellung wichtiger Referenzprozessschritte und erzeugter Objekte für das Referenzsystem (Schrock et al., 2022, S. 6).

In Abbildung 5.8 ist das optimierte Vorgehensmodell mit den Kernaktivitäten zur erfolgreichen Durchführung des zweiten Versuchsdurchlaufs dargestellt. Durch die farbliche Kennzeichnung wird verdeutlicht, aus welchem Layer des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM, vgl. Abschnitt 2.1.2.2) maßgeblich Informationen zur Durchführung der Aktivität benötigt werden (Schrock et al., 2022).

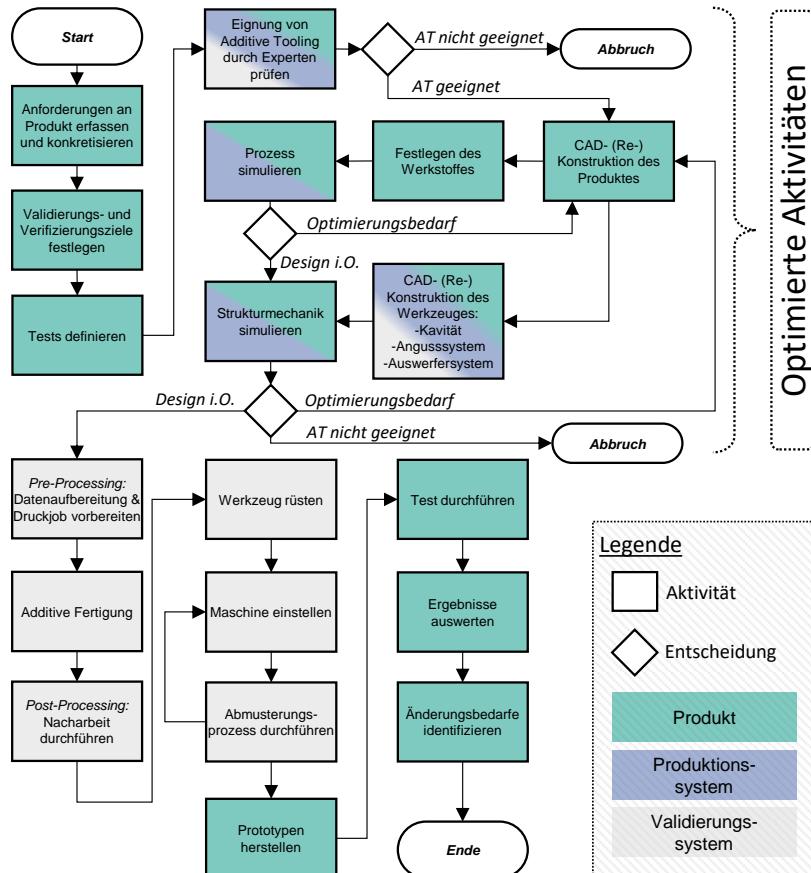


Abbildung 5.8: Optimiertes Vorgehensmodell der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (Schrock et al., 2022, S. 7)

Zwar könnte argumentiert werden, dass mit dem ersten Versuchsdurchlauf fallspezifisches Erfahrungswissen aufgebaut und dadurch notwendige Verbesserungspo-

tenziale erkannt wurden, die den Erfolg des zweiten Durchlaufs ermöglichten. Jedoch wurden nicht nur technische Verbesserungen des Formeinsatzes und Anpassungen des Fertigungsprozesses vorgenommen, sondern vielmehr Prozessschritte in das beschriebene Vorgehensmodell implementiert, die den AT-spezifischen Besonderheiten Rechnung tragen und die durch gezielte Absicherung eine Identifikation ungeeigneter Werkzeugauslegung in Abhängigkeit der Anforderungen ermöglicht. Neben entsprechenden Kontroll- und Optimierungsschleifen vor der Fertigung der Formeinsätze wurde auch die initiale Eignungsabschätzung durch Experten, bzw. Personen mit Erfahrung im Bereich AT hinzugefügt. Auf Basis der Validierungsziele und der definierten Tests soll eine frühe Eignungsabschätzung erfolgen, um nicht geeignete Anwendungsfälle auszuschließen.

Neben wichtigem Prozesswissen wurden in der Vorstudie Best-Practice-Beispiele identifiziert, welche in die Ausarbeitung von Hilfsmitteln zur Anwenderunterstützung eingeflossen sind (siehe Abschnitt 6.3). Dazu gehören Konstruktionsrichtlinien, wie die Beachtung von Aufmaßen zur Bearbeitung von Funktionsflächen oder die geeignete Ausrichtung der Formeinsätze im Bauraum für die additive Fertigung. So wurde in einer Messreihe die durch die Werkzeugschließkraft induzierte Stauchung des Formeinsatzes gemessen. Aufgrund des hohen Bestimmtheitsmaßes von  $R^2 = 0,994$  der Messpunkte kann die Formeinsatzstauchung annähernd linear berechnet werden. Diese Erkenntnis ist wichtig für die geometrisch präzise Auslegung der Formeinsätze (siehe Anhang D3, Abbildung D3.5).

### 5.2.2.2 Bewertung der Wiedergabetreue anhand der Zugeigenschaften

Wie erwartet (vgl. Abschnitt 2.3.4.2 b), zeigen die AT-gefertigten Zugproben aus den beiden teilkristallinen Kunststoffen einen Anstieg der Festigkeitswerte (siehe Tabelle 5.1). Als wahrscheinliche Ursache hierfür wird ein höherer Kristallisationsgrad wegen längerer Abkühlzeit angenommen (vgl. Kampker et al., 2019), welcher in dieser Versuchsreihe jedoch nicht bestimmt wurde. Bei beiden Formeinsatzvarianten liegen die Zugstäbe aus ABS hinsichtlich Zugspannung ( $\sigma_M$ ) und E-Modul ( $E$ ) nahe beieinander. Auch bei PP sind die Zugspannungen beider Proben-Varianten nahezu gleich, jedoch ist bei den Zugproben aus dem AT-Formeinsatz ein deutlich höherer E-Modul festzustellen. Für das PBT ist sowohl beim E-Modul als auch bei der Zugspannung ein höherer Wert bei den Zugproben aus dem AT-Formeinsatz festzustellen. Die Prüfprotokolle können den Anhängen D5-D10 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Zusammengefasste Ergebnisse der Zugversuche nach DIN EN ISO 527

	ABS (HG 0760 GP)		PP (EA648P)		PBT (Celanex 2401 MT)	
	amorph		teilkristallin			
	$\sigma_M$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\sigma_M$ (MPa)	$E$ (MPa)	$\sigma_M$ (MPa)	$E$ (MPa)
<b>Stahlform-einsatz</b>	41,1	2360	27,9	1760	56,3	2600
<b>AT-Form-einsatz</b>	38,9	2380	28,1	2110	60,3	2830
<b>Differenz</b>	-5,35 %	+0,85 %	+0,72 %	+19,89 %	+7,10 %	+8,85 %

Neben der längeren Abkühlzeit lagen bei den Spritzgussprozessen mit Stahl- bzw. AT-Formeinsatz allerdings weitere abweichende Prozessparameter vor. So wurde in den AT-Formeinsatz langsamer und mit geringerem Druck eingespritzt und die Nachdruckphase war länger bei geringerem Nachdruck (siehe Anhang D1, Tabelle D1.2). Dies äußerte sich z.B. in einem geringeren Gewicht der AT-Zugproben. Eine Aussage über den spezifischen Einfluss einzelner Prozessvariablen, wie der Kühlzeit, ist folglich nicht möglich. Die Oberflächenqualität der Formteile entspricht der Oberflächenqualität der Formeinsätze und weist die durch das PJM-Verfahren fertigungsbedingt typische „Rillen“-Struktur auf (siehe Anhang D3, Abbildung D3.6).

### 5.2.3 Zwischenfazit

Mit der technischen Vorstudie wurde unter anderem gezeigt, dass AT-Formeinsätze leicht beschädigt oder zerstört werden können, falls die AT-spezifischen Besonderheiten ihrer Auslegung und Anwendung nicht berücksichtigt werden. In diesem Fall können keine validierungsgeeigneten AT-Prototypen erzeugt werden. Jedoch wurde auch gezeigt, dass ein zielgerichtetes Vorgehen, welches die Schwächen und Besonderheiten des AT berücksichtigt, zu einer erfolgreichen Anwendung des AT führen kann. Dazu wurde ein optimiertes Vorgehensmodell präsentiert, welches unter anderem die technische Eignung von AT bereits vor der Herstellung der AT-Formeinsätze absichert. Zentrale Bestandteile dieser Absicherung sind dabei Simulationsmethoden, wie die Prozesssimulation und die strukturmechanische Simulation.

Wie mit den Zugversuchen gezeigt wurde, führen die abweichenden Prozessparameter zwischen AT und konventionellem Tooling, je nach verwendetem Kunststoff, zu sich unterscheidenden Formeigenschaften, was die Validität der mittels AT

erzielbaren Testergebnisse maßgeblich beeinflussen kann. Dies ist bei der Interpretation der Validierungsergebnisse zu berücksichtigen. Die mögliche Wiedergabentreue von AT-Prototypen und Abweichungen zwischen Prototyping- und Serienprozess sollten entsprechend vorab möglichst präzise bewertet oder abgeschätzt werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Um den tatsächlichen Einfluss aller Prozessvariablen bestimmen zu können, ist es jedoch notwendig, umfangreichere experimentelle Untersuchungen durchzuführen.

Weiterhin wurde mit der Vorstudie eine praktisch nutzbare Versuchsumgebung aufgebaut, in der Anwendungsversuche durchgeführt werden können und die somit auch als Teil der Methodenevaluation (siehe Kapitel 7) genutzt werden kann. Zusätzlich konnten relevantes Prozesswissen, Referenzwerte und Best Practices identifiziert werden, welche in die Ausarbeitung der Hilfsmittel innerhalb der AT-Systematik einfließen (vgl. Abschnitt 6.3). Im Modell der SGE dienen die generierten Objekte und das dokumentierte Wissen als mögliche Elemente eines Referenzsystems (siehe Abschnitt 6.2).

## **5.3 Interviewstudie 1 – Status quo und Unterstützungsbedarf**

Ziel der ersten Interviewstudie ist die Erfassung des Status quo und die Identifikation des Unterstützungsbedarfs aus Sicht von Experten, d.h. von berufserfahrenen Personen aus der Branche der Spritzgussproduktentwicklung, Werkzeug- und Formenbau, sowie Kunststoffverarbeitung. Zudem soll eine frühe Bewertung der eigenen Ideen zur Anwenderunterstützung erfolgen. Weiterhin sollen Erkenntnisse von den praxisnahen Experten erlangt werden, welche aus der Literatur nicht ersichtlich sind.

### **5.3.1 Interviewdesign**

Die Interviewstudie fand zwischen dem 26.06.2021 und dem 28.04.2022 per Online-Video-Meeting statt und wurde in Form von semi-strukturierten Experteninterviews durchgeführt. Die Befragung erfolgte anhand des Interviewleitfadens in Anhang E1. Neben Fragen zur Person enthält der Leitfaden 23 Fragen zu den Themen *Produktentwicklung*, *AT* und *methodische Unterstützung des AT*. Während der Interviews wurden auch Beispiele zu AT, sowie eine frühe Version der zu entwickelnden Unterstützung und möglicher Hilfsmittel vorgestellt. Einen Überblick über das aus fünf Experten bestehende Expertenpanel gibt Tabelle 5.2. Die Interviews wurden in Form einer Videoaufnahme, sowie eines vereinfachten Transkripts dokumentiert.

Tabelle 5.2: Expertenpanel der ersten Interviewstudie

Nr.	Branche	Expertise / Aktuelle Position	Berufs- erfahrung (Jahre)	Interview- dauer (h:min)
I1	Dienstleister Spritzgussproduktent- wicklung	Geschäftsführer, Projektleiter und techn. Vertrieb, Fachbereich Kunststofftechnik	30	0:52
I2	Bildung und Forschung	Ehemals Entwickler im Fachbe- reich Kunststoffforschung und - technik, später Professur für Kunststofftechnik	38	0:58
I3	Werkzeug- & Formenbau	Abgeschlossenes Studium (Master Maschinenbau) <sup>17</sup>	1	1:31
I4	Werkzeug- & Formenbau	Fertigungsleiter	15	1:18
I5	Werkzeug- & Formenbau	Leiter Prozesstechnik und stellv. techn. Leiter Formenbau, ausge- bildeter Werkzeugmacher	30	1:10

### 5.3.2 Studienergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Kernaussagen und Erkenntnisse in den nachstehenden Kategorien zusammengefasst:

- a) Beschreibung der IST-Situation
- b) Vor- und Nachteile, Chancen und Risiken, sowie Probleme und Hürden beim Einsatz von AT in der Produktentwicklung aus Expertensicht
- c) Wissen über AT und Wissenslücken
- d) Anforderungen an eine Unterstützung und Vorschläge

Im Text wird zudem kenntlich gemacht, auf welche Experten die Aussagen bzw. die Zusammenfassung von Aussagen zurückgehen. So können Einzelaussagen von Mehrfachnennungen bzw. Konsens unterschieden werden.

#### a) Beschreibung der IST-Situation

Zu Beginn der Interviews wurden Fragen zu bestehenden Produktentwicklungs- und Prototypingprozessen in den Unternehmen der Befragten gestellt, sodass ein Einblick in die gängige Praxis (IST-Situation) gewonnen werden konnte. Nach Angaben von I1, I2, I4 und I5 erfolgt in der Entwicklung von Spritzgussprodukten derzeit meist

---

<sup>17</sup> I3 weist zwar geringe Berufserfahrung auf, hat aber in seiner Masterarbeit an der Entwicklung eines Spritzgusswerkzeuges mitgearbeitet, Prototypen entwickelt und weitreichende Einblicke in den Entwicklungsprozess des betreuenden Unternehmens erhalten.

eine Trennung zwischen der Produkt- und der Werkzeugentwicklung, d.h. die Produktentwicklung findet bei einem Formteilbesteller statt, die Produktionssystementwicklung bei einem Werkzeugbauer<sup>18</sup>. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit dem in Abschnitt 2.2.3.1 beschriebenen typischen Entwicklungsprozess. Die Werkzeugbauer treten dabei als Dienstleister zur Entwicklung und Herstellung der Spritzgusswerkzeuge auf (I1, I2, I4, I5). Der Formteilbesteller trägt meist schon konkrete Anforderungen und CAD-Daten an den Werkzeugbauer heran (I1, I4, I5). In diesem Fall existiert schon eine genaue Vorstellung vom Produkt oder dieses ist bereits entwickelt (I1, I5). Die Entwicklungsleistung des Werkzeugbauers bezieht sich dann hauptsächlich auf die Entwicklung des Spritzgusswerkzeuges (I1, I4, I5). Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass beim Kunden nur eine Produktidee besteht, welche durch den Werkzeugbauer weiter ausgearbeitet werden soll (I1, I5) oder der Werkzeugbauer sogar ein neues Fertigungsprinzip zur Realisierung des Produktes entwickeln soll (I5). In der Regel wird eine Machbarkeitsanalyse vor der Auftragsvergabe vom Kunden vorausgesetzt (I4, I5). Im Unternehmen von I4 wird dies in Form einer Erstellung von 3D-Druck-Modellen und Simulationen als Service angeboten, wobei der Werkzeugbauer dabei auf eigenes Risiko in Vorleistung geht. Der Werkzeugbauer hat in der Regel lediglich den Kontakt zu seinem Kunden (Formteilbesteller), aber nicht zum Endkunden (Nutzer, Verbraucher) (I1). I5 unterteilt seinen PEP grob in die Phasen: Initiierung, Prozessanalyse, Simulation, Werkzeuganalyse, Werkzeugkonzept, Konstruktion, Werkzeugfertigung, Spritzgussprozess einstellen und Abmusterung, sowie gegebenenfalls Iterationen (I5).

Da die Formteile oft engen Toleranzen unterliegen und hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen müssen, spielen die Validierung und Verifizierung eine sehr große Rolle (I2). Allerdings führt der Werkzeugbauer in der Regel keine Validierung, sondern eher eine Verifizierung durch (I1). Die Validierung wird entweder schon vor der Auftragsvergabe an den Werkzeugbauer (I1) oder gemeinschaftlich mit dem Kunden erarbeitet und durchgeführt (I5). Für einfache Handmuster zur „groben“ Funktionsprüfung werden RP-Modelle oder auch gefräste Prototypen eingesetzt (I1, I4). Dieser Entwicklungsabschnitt wird als A-Muster-Phase bezeichnet, bei der die Anforderungen an die Muster (Prototypen) noch nicht so hoch wie in der B-Muster-Phase sind, in der die Muster bereits Serieneigenschaften besitzen müssen (I4). In der A-Muster-Phase kommt es weniger auf die „Perfektion“ an, sondern eher auf ein schnelles Testen und Ändern (I4, I5). I5 beschreibt, dass am Markt häufig A-Muster hinter „Piloten“ bzw. „Pilotwerkzeugen“ (gemeint sind B-/C-Muster) zurückstehen, obwohl sie aus Sicht von I5 sehr wichtig sind. Bei I3 finden RP-Prototypen eher keine Anwendung. RP kann die Eigenschaften des Serienbauteils nur unzureichend

---

<sup>18</sup> Der Formteilbesteller ist Kunde des Werkzeugbauers und kann ggf. auch Formteilhersteller sein. Hier sind verschiedene Kombinationen möglich (siehe Abschnitt 2.2.3.1).

abbilden (z.B. aufgrund anderer techn. Eigenschaften), womit nur die Geometrie eine Ähnlichkeit zum Serienbauteil aufweist (I2). Demnach sind die klassischen RP-Verfahren hier wenig sinnvoll (I2). I2 sieht AT als „richtigen Weg“ [Anm.: für das Prototyping]. I3 gibt an, dass viel Zeit in virtuelles Prototyping auf Basis des CAD-Modells und numerischer Simulation investiert wird.

Seriennahe Spritzgussprototypen werden oft über [Anm.: einfacher zu fertigende] Aluminiumwerkzeuge erstellt (I1). Diese Prototypenwerkzeuge werden eingesetzt, um den größten Teil an Änderungen abzufangen, bevor das Serienwerkzeug gebaut wird (I1). I1 kann sich dennoch kaum an keinen Fall erinnern, bei dem keine Änderungen am Serienwerkzeug nötig waren. Änderungen können in jeder Phase auftreten, auch während der Fertigung des Serienwerkzeugs, z. B. weil der Kunde die abschließende Validierung erst während der Werkzeugfertigung vornimmt (I4). Sind die Änderungen dann zu umfangreich, kann das Serienwerkzeug nicht mehr angepasst werden und eine Neufertigung wird nötig (I1, I2), was jedoch selten vorkommt (I1). Laut I2 durchlaufen die Prototypenwerkzeuge über mehrere Wochen Iterationen (I2). Die Werkzeugfertigung durch einen Dienstleister (Outsourcing) verlängert diese Zeit (I2). I3 beschreibt, dass besonders bei Weiterentwicklung bestehender Produkte mit bekannten Referenzprozessen die Entwicklungssicherheit oft überschätzt wird, was zu unvorhergesehenen Iterationen und einer Verfehlung des Zeit- und Kostenplans führt (I3). Diese Iterationen finden über mehrere Abteilungen, wie Konstruktion und Fertigung, statt (I3). Die Vorlaufzeit [Anm.: von Entwicklung & Konstruktion] bis in die Werkzeugfertigung beträgt im Unternehmen von I1 vier bis sechs Wochen. In dieser Zeit wird die Spritzgussprozesssimulation zur Erstellung von Fließsimulationen, Verzugsanalysen usw. genutzt (I1). I5 gibt eine Werkzeugfertigungszeit von bis zu sieben Monaten inkl. Validierung an. Zu den klassischen, die Entwicklung unterstützenden Methoden, zählen die Prozess- und Konstruktions-FMEA (I1), die FEM-Analyse und die Spritzgussprozesssimulation (I1, I3, I4).

**b) Vor- und Nachteile, Probleme und Hürden, sowie Chancen und Risiken von AT in der Produktentwicklung aus Expertensicht**

Nach Meinung von I1 bietet AT gegenüber konventionellem Tooling keinen Vorteil, wenn nur „grobe Formen“ abbildungbar sind. Aufgrund des hohen Risikos, bedingt durch die unzureichend bekannte Anwendung von AT, besteht bei I1 und I3 aktuell nur eine geringe Bereitschaft AT in die Produktentwicklung einzubinden. Zudem sehen I1 und I3 die vorherige Zustimmung des Kunden als eine Voraussetzung für den Einsatz von AT. I3 berichtet von einem kürzlich durchgeföhrten Entwicklungsprojekt, bei dem ein AT-Modell entgegen den Vorurteilen des Projektteams positiv überraschte: Durch die Verbesserung der Kommunikation zwischen dem Entwicklungsteam und dem Werkzeugbau konnte das Modell zur frühzeitigen Erkennung von

Fehlern und zur Identifizierung von Bereichen eingesetzt werden, die für die Fertigung ungeeignet sind. Der weitere Einsatz von AT wurde jedoch nicht weiter verfolgt, da, entgegen der Meinung von I3, zu wenig Vertrauen in die erzielbaren Ergebnisse bestand. Dennoch werden Chancen für eine bessere Kundeneinbindung und verbesserte Kommunikation durch AT-Prototypen, im Vergleich zu Zeichnungen und CAD-Daten, gesehen (I3, I5).

I4 und I5 betonen die Wichtigkeit früh verfügbarer Prototypen für eine frühe Validierung. Eine Fertigung von Prototypen über Dritte sieht I5 als Nachteil an, da so nur wenig oder nichts über den Herstellprozess bekannt ist. I5 benennt in diesem Zusammenhang, dass Formteilhersteller immer öfter den Einsatz sogenannter „Quick-Tools“ [Anm.: einfache Prototypenwerkzeuge] fordern, um schneller Prototypen zu erhalten. Laut I1 wird jedoch aufgrund von Zeit- und Kostendruck zu selten in Prototypenwerkzeuge investiert. Hier werden zeitliche Vorteile von AT gesehen (I1, I4, I5). I4 bezeichnet AT als „reizvoll“ für die frühe Phase der PE, da AT als „Türöffner“ zum Kunden dienen kann (I4, I5). Die Vorteile von AT werden insbesondere in der schnellen Erstellung von Prototypen in A-Muster-Qualität für ein schnelles Testen und Ändern gesehen (I4, I5). Dabei wächst der zeitliche Vorteil von AT mit der Anzahl der notwendigen Iterationen (I4). I2 sieht im Potenzial zu verkürzten Entwicklungszeiten einen Erfolgsfaktor, um in Europa langfristig wirtschaftlich zu bleiben. Durch AT könnten auch Varianten schneller erzeugt und ausprobiert werden, was zusätzliche Sicherheit schafft, bevor das Serienwerkzeug gefertigt wird (I5).

Ein Hindernis wird darin gesehen, dass die AT-Prototypen nur geringe Einschränkungen oder Abweichungen aufweisen dürfen (I1, I2). Laut I1 hat ein physischer Prototyp nur dann Vorteile, wenn er unter den gleichen Produktionsbedingungen wie das Serienteil hergestellt wird (I1). I4 weist darauf hin, dass aber auch die häufig verwendeten und konventionell gefertigten Prototypenwerkzeuge aus Aluminium zu abweichenden Formteileigenschaften führen können. Weiterhin werden bereits in der Verwendung des Originalwerkstoffes in der A-Muster-Phase Vorteile gesehen, auch wenn die Formteileigenschaften abweichen können (I4, I5). I5 hält AT-Prototypen trotz Einschränkungen für relevant, betont jedoch die Wichtigkeit den AT-Prozess auch selbst durchzuführen, damit Abweichungen erkannt werden können. Nur so könnten die Einschränkungen richtig interpretiert und gegenüber dem Kunden kommuniziert werden (I5).

### **c) Wissen über AT und Wissenslücken**

Bei I1 und I4 findet AT aktuell keine Anwendung. I1, I5 geben an, mangelndes Wissen über AT zu besitzen. Jedoch ist I1 bekannt, dass andere Unternehmen AT bereits mit einfachen Geometrien getestet haben. Nach den Erfahrungen von I3 wird AT in der Branche noch als „Zukunftsmusik“ betrachtet und der Aufwand für die

additive Fertigung eines AT-Formeinsatzes überschätzt. Weiterhin gibt I3 auf Basis eigener Erfahrungen aus einem von AT unterstützten Projekt an, dass die Teammitglieder die Belastbarkeit von AT-Formeinsätzen falsch eingeschätzt haben. So wurde vermutet, dass AT-Formeinsätze Prozessbelastungen von 250 bar Einspritzdruck und Temperaturen von 300 °C nicht standhalten können (I3). Die im Stand der Forschung beschriebenen Studien zeigen jedoch, dass dies möglich ist. I2 ist sich bewusst, dass AT nur innerhalb spezifischer Prozessparametergrenzen eingesetzt werden kann. I2 und I4 vermuten [Anm.: richtigerweise] abweichende Formteil-eigenschaften aufgrund der deutlich niedrigeren Wärmeleitfähigkeit von AT-Werkzeugen. Bei I1 bestehen offene Fragen hinsichtlich der Abbildbarkeit feiner Geometrien oder der Standzeit von AT-Werkzeugen.

Nach I2 und I4 bestehen Wissenslücken hinsichtlich des Vorgehens zur Entscheidungsfindung und ob AT sich im konkreten Fall eignet. Zudem besteht ein Unterstützungsbedarf in der Umsetzung und Anwendung von AT (I2, I4). I2, I3, I4 sind sich bewusst, dass für AT konstruktive Besonderheiten gelten. I3 ist sich im Klaren darüber, dass das Wissen aus der konventionellen Werkzeugentwicklung nicht direkt auf AT übertragbar ist und stimmt zu, dass Entwickler für die Anwendung von AT sowohl Kenntnisse der subtraktiven als auch der additiven Fertigung benötigen.

#### **d) Anregungen und Vorschläge für eine Unterstützung**

Nach I1 sollte der Einsatz von AT nach einem methodischen Vorgehen stattfinden, da ansonsten zu viele Fehlerquellen bestehen. Die Methode sollte einfach gehalten werden und ein schrittweises Vorgehen ermöglichen (I1). I4 erachtet die frühzeitige Eignungsabschätzung von AT für hilfreich. Damit AT in der Praxis eine Akzeptanz findet, muss dem Anwender direkt umsetzbares Wissen zur Verfügung gestellt werden, z.B. durch Bereitstellen eines Leitfadens und einer Wissensdatenbank (I4). I2 und I4 sehen jedoch ein Problem in der Gestaltung von AT-Konstruktionsregeln, da diese aufgrund technischer Neuerungen im AM-Bereich schnell veralten könnten. Eine Unterstützung von AT sollte zudem Referenzen und einen Referenzprozess zur Verfügung stellen (I1, I2, I3, I4, I5). Dies könnte weiterhin dazu beitragen, die Bereitschaft für die Anwendung von AT zu erhöhen (I3). Nach I2 sollte dabei die praktische Anwendung des AT im Vordergrund stehen.

I1, I2, I3 sehen in der Modellierung der Parameter mit Hilfe der vorgestellten Design Structure Matrix (DSM) die Möglichkeit einer transparenten Darstellung des Gesamtprozesses. Die Zusammenhänge in der DSM müssten jedoch von Experten verschiedener Fachabteilungen beurteilt werden (I2, I3). Zudem bietet die DSM eine sinnvolle Grundlage für Schulungen (I1, I2) und um AT neu in Unternehmen zu etablieren (I1). Die DSM könnte „für die Praxis“ allerdings zu abstrakt (I3) oder zu aufwendig sein (I4) und deshalb keine Anwendung finden (I3, I4). Methoden und Tools

müssten so ausgelegt sein, dass der Zeitvorteil von AT erhalten bleibt (I4). I2 schlägt vor, das AT mit einer Modulbauweise des Werkzeugs zu verbinden, sodass nur die formgebenden Elemente additiv hergestellt werden müssen (I2). Die Präsentation eines frühen Vorschlags für ein methodisches Vorgehen (vgl. Anhang E1, Punkt B) 23.) erhielt die Zustimmung von I1 und I5.

### 5.3.3 Zwischenfazit

Die Interviewstudie bestätigt die im Stand der Forschung beschriebene Trennung von Produkt- und Produktionssystementwicklung als branchenüblich. Teile des Produktionssystems, zumindest das Spritzgießwerkzeug, werden in der Regel von externen Dienstleistern im Auftrag des Produktentwicklers entwickelt und gefertigt. Eine Unterstützung von AT in der Produktentwicklung sollte dementsprechend sowohl den Produktentwickler als auch den Produktionssystementwickler adressieren, wobei eine frühe Einbindung des Produktionssystementwicklers angestrebt werden sollte.

Darüber hinaus wird festgestellt, dass alle befragten Personen zwar schon von der Möglichkeit des AT gehört haben, jedoch weder über weitreichende Erfahrungen mit AT noch über umfassendes und spezifisches Fachwissen im Bereich des AT verfügen. Die Bereitschaft der Befragten zum „Ausprobieren“ von AT ist relativ gering, da zu wenig Vertrauen in die Anwendung von AT vorhanden ist, obwohl das Potenzial um die zeitlichen Vorteile von AT bekannt ist.

Weiterhin wurden Anregungen und Vorschläge für eine Unterstützung identifiziert, welche in Tabelle 5.3 zusammengefasst werden (die vollständige Beschreibung des Zielsystems an die zu entwickelnde Unterstützung erfolgt in Abschnitt 6.1.).

Tabelle 5.3: Anregungen an eine Unterstützung des AT aus Interviewstudie 1

Anregung	Nennungen
Innerhalb der Unterstützung sollten Referenzen und Referenzprozesse zur Verfügung gestellt werden.	I1 – I5
Zur transparenten Darstellung des Gesamtprozesses kann die Modellierung von Parametern mittels Design-Structure-Matrix (DSM) erfolgen, falls deren Anwendung nicht zu abstrakt oder aufwendig ausfällt.	I1, I2, I3, I4
Die Methode sollte die notwendigen Aktivitäten schrittweise und möglichst schlank unterstützen, sodass Fehlerquellen reduziert aber die zeitlichen Vorteile von AT dennoch erhalten bleiben.	I1, I4
Das systematische Vorgehen innerhalb der Unterstützung kann nach dem vorgestellten Modell erfolgen (vgl. Anhang E1, Punkt B) 23.).	I1, I5
Das notwendige Wissen sollte praxisnah und anwendergerecht zur Verfügung gestellt werden.	I2, I4
Es sollte berücksichtigt werden, dass Konstruktionsrichtlinien aufgrund technischer Neuerungen im AM-Bereich rasch veralten könnten.	I2, I4
Die Methode sollte eine frühzeitige Einschätzung über die Anwendbarkeit von AT unterstützen.	I4

## 5.4 Potenziale und Hürden in der Anwendung von AT in der Produktentwicklung

In den folgenden Abschnitten werden die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und den durchgeführten Studien der DS-I hinsichtlich identifizierbarer Potenziale und Hürden in der Anwendung von AT in der Produktentwicklung zusammengefasst und qualitativ bewertet. Für eine differenzierte Betrachtung werden zunächst die identifizierten Vor- und Nachteile zusammengefasst und sich daraus ergebende Chancen und Risiken des AT für die Produktentwicklung abgeleitet (siehe Abschnitt 5.4.1). Anschließend erfolgt eine genauere Betrachtung des notwendigen Aufwandes, im Speziellen der benötigten Zeit und den entstehenden Kosten, für den Einsatz von AT gegenüber dem konventionellen Tooling (siehe Abschnitt 5.4.2). Weiterhin wird der Aufwand und die erwartbare Wiedergabekette in Korrelation gesetzt, wobei das Rapid Prototyping, AT und das konventionelle Tooling miteinander verglichen werden (siehe Abschnitt 5.4.3). Im Anschluss werden Hürden in der Anwendung des AT aufgezeigt, die einer Nutzung des AT zur Produktvalidierung erschweren (siehe Abschnitt 5.4.4).

### 5.4.1 Vor- und Nachteile, sowie Chancen und Risiken des AT

Aus den betrachteten Studien und vorangegangenen Untersuchungen lassen sich verschiedene Vor- und Nachteile des AT gegenüber der konventionellen Werkzeug- und Prototypenfertigung identifizieren, woraus sich sowohl Chancen als auch Risiken in der Nutzung von AT in der Produktentwicklung ableiten lassen. Die wesentlichen Vor- und Nachteile, sowie Chancen und Risiken des AT gegenüber dem KT sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der wichtigsten Vor- und Nachteile, sowie Chancen und Risiken des AT gegenüber dem KT

Vorteile	Chancen
<ul style="list-style-type: none"> <li>Bei geeigneten Anwendungsfällen kostengünstigere und schnellere Verfügbarkeit von AT-Werkzeugen und Prototypen</li> <li>Komplexe Formen und direkte Funktionsintegration möglich</li> <li>Zeichnungserstellung entfällt, da direkt auf Basis der CAD-Daten gefertigt werden kann</li> <li>Additive Fertigung ist „einfacher“ realisierbar, da z.B. keine speziellen Werkzeuge erforderlich sind, keine Spannproblematik besteht usw.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Früherer Erkenntnisgewinn</li> <li>Mehr Iterationen im gleichen Zeitraum möglich</li> <li>Effizienterer und agilerer PEP</li> <li>Späte Werkzeugänderungen entfallen oder werden reduziert</li> <li>Risiken bei der Werkzeugfertigung durch Fehlinterpretationen von Zeichnungen entfallen</li> <li>Additive Fertigung kann aufgrund der einfacheren Realisierbarkeit die Erstellung von Formeinsätzen ohne eigenen Werkzeugbau ermöglichen (AT als „Enabler“)</li> </ul>
Nachteile	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> <li>Niedrige Werkzeugstandzeiten (i.d.R. nur kleine Serien &lt; 10 – 1.000 Stk.)</li> <li>Nicht für alle Kunststoffe geeignet</li> <li>Lange Zykluszeiten</li> <li>Einschränkungen hinsichtlich Oberflächenqualität (Rillen, Gratbildung)</li> <li>Einschränkungen hinsichtlich Prozessparametern</li> <li>Abweichende, schwer vorherzusagende Formteileigenschaften möglich</li> <li>Bisher kaum Referenzen und Anwenderunterstützung verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Formeinsätze versagen ohne die benötigte Menge an Prototypen herstellen zu können</li> <li>AT ist ggf. teurer, langsamer und führt zu Ineffizienzen im PEP</li> <li>Fehlinterpretationen der Testergebnisse aufgrund abweichender Formteileigenschaften möglich</li> </ul>

### **5.4.2 Zeit und Kosten bis zur Verfügbarkeit von Prototypen und Validierungsergebnissen**

Der Stand der Forschung lässt erkennen, dass die additive Fertigung von Werkzeugen, verglichen mit der konventionellen Fertigung, die kostengünstigere und schnellere Option sein kann (siehe Abschnitt 2.3.4.1). Allerdings verlängert sich aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit der AT-Werkzeuge die Zykluszeit des Spritzgussprozesses und infolgedessen die Gesamtzeit zur Herstellung der Prototypen. Da die Differenz der Werkzeugherstellungszeit zwischen KT und AT (typischerweise im Bereich von Stunden) potenziell größer ist als die Differenz der Prototypenherstellungszeit (typischerweise im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten pro Spritzgießzyklus), weist das AT die potenziell günstigere Gesamtzeit auf. Die Markt- und Beschaffungsstudie zeigt, dass die Potenziale hinsichtlich Zeit und Kosten im Falle der Fremdfertigung auch stark vom gewählten Dienstleister abhängen. Auch hier wurden Fälle aufgezeigt, in denen AT die kostengünstigere und schnellere Option darstellt. Dies ist jedoch unter anderem von der Größe und Komplexität, also von der Geometrie und des sich daraus ergebenden Fertigungsaufwandes des Formeinsatzes abhängig (siehe Abschnitt 5.1).

Die zur Unterstützungsevaluation durchgeführten Fallstudien B – D zeigen ebenfalls, dass mittels AT eine kostengünstigere und schnellere Herstellung von Formeinsätzen möglich ist (siehe Abschnitt 7.2). Allerdings bestätigt sich, dass die deutlich längeren Zykluszeiten des AT zu einer längeren Gesamtzeit führen können, falls eine entsprechend große Stückzahl zu fertigen ist.

In Tabelle 5.5 werden die Erkenntnisse zu Herstellzeiten und Herstellkosten getrennt nach Werkzeugfertigung und Prototypenfertigung mit entsprechender Quellenangabe zusammengefasst. Aufgrund fehlender Datengrundlage werden Planungs- und Konstruktionsaufwände nicht in die Betrachtung mit einbezogen.

Tabelle 5.5: Bewertung der Herstellzeiten und -kosten von Werkzeug und Prototyp bei konventionellem (KT) und additivem Tooling (AT)

Quellen	Werkzeug fertigen	Prototyp fertigen
Mendible et al. (2017) Kampker, Trieb, Kawollek und Ayvaz (2018) Tosello et al. (2019) Kampker et al. (2020) Lozano et al. (2022)	AT ist potentiell kostengünstiger und schneller, wobei die Werkzeugkosten vom AM-Material abhängen.	KT ist kostengünstiger und schneller, sodass sich AT eher für die Fertigung geringer Stückzahlen eignet.
Markt- und Beschaffungsstudie ( <i>Eigene Studie</i> , siehe Abschnitt 5.1)	Zeit bis Verfügbarkeit und Kosten der Formeinsätze hängen von Komplexität, Größe und Dienstleister ab. Je nach Ausprägung dieser Merkmale liegt der Vorteil entweder auf Seiten des KT oder des AT.	(Keine Daten vorhanden)
Technische Vorstudie ( <i>Eigene Studie</i> , siehe Abschnitt 5.2)	(Keine Daten vorhanden)	KT ist schneller. Zykluszeiten KT zwischen 40-70 s. Zykluszeiten AT zwischen 363-373 s.
Fallstudien B – D ( <i>Eigene Studien</i> , siehe Abschnitt 7.2)	AT ist bis zu 49 % kostengünstiger und bis zu 39 % schneller.	Zykluszeiten AT zwischen ca. 270-480 s. KT vermutlich schneller, jedoch keine Vergleichsdaten vorhanden.

Die Studienlage zeigt somit, dass AT in geeigneten Anwendungsfällen die Zeit bis zur Fertigstellung des Werkzeuges verkürzt und damit einen früheren Produktionsbeginn der Prototypenserie ermöglicht. Allerdings verkürzt sich der zeitliche Vorteil von AT mit steigender zu produzierender Stückzahl wieder. Da Prototypenserien aber meist geringe Stückzahlen aufweisen, dürfte die Zeitersparnis während der Werkzeugfertigung in vielen Fällen überwiegen, sodass, neben dem früheren Produktionsbeginn, auch die Gesamtzeit zwischen der Werkzeugfertigung bis zum Erhalt der Testergebnisse verkürzt werden kann. Wenn eine Revision im Produkt- oder Werkzeugdesign vorgenommen wird, die nicht durch eine Werkzeugüberarbeitung integriert werden kann, muss ein neues Werkzeug hergestellt werden. Wird davon ausgegangen, dass nach einem Validierungsdurchlauf eine Neufertigung des Werkzeuges erforderlich wird, ist theoretisch eine Vervielfachung der Zeitersparnis mit jeder Iteration möglich. Die beschriebenen Zusammenhänge hinsichtlich der Prozessbeschleunigung durch AT im Vergleich zum KT werden in Abbildung 5.9 dargestellt.

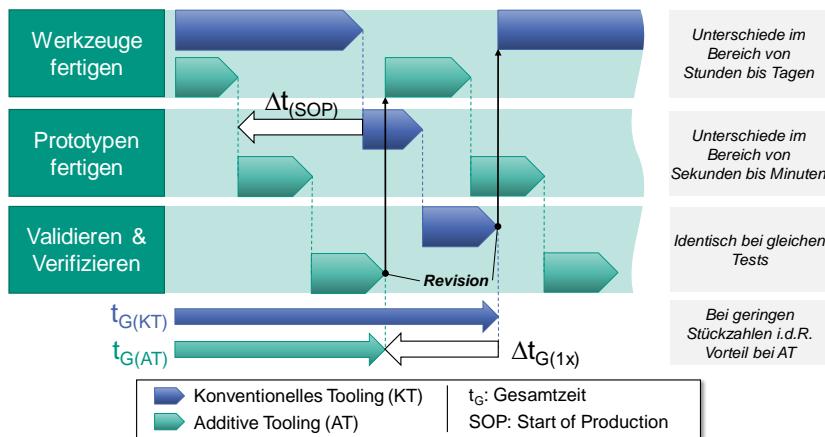


Abbildung 5.9: Prinzipielle Darstellung der Potenziale von AT hinsichtlich Effizienz und Agilität im PEP auf Basis der zusammengefassten Erkenntnisse aus Tabelle 5.5

Mathematisch lässt sich die Gesamtzeit ( $t_G$ ) des in Abbildung 5.9 beschriebenen Prozesses anhand der Werkzeugherstellzeit ( $t_w$ ), der Zykluszeit eines Spritzgussprozesses ( $t_z$ ) und der Zeit der Validierungsaktivität ( $t_v$ ) wie folgt berechnen:

$$t_G = (t_w + t_z \times \text{Anzahl Zyklen} + t_v) \times \text{Anzahl Revisionen} \quad 5.1$$

### 5.4.3 Verhältnis von Aufwand zu Wiedergabebetreue

Wie im Stand der Forschung beschrieben wurde, sollten Prototypen in einer akzeptablen Zeit und zu akzeptablen Kosten zur Verfügung stehen und dem Erkenntnisgewinn dienen. Das Erzielen valider Testergebnisse hängt dabei, neben der korrekten Testplanung und -durchführung, unter anderem von der Testinterpretation ab (vgl. Abschnitt 2.1.3). Dabei spielt die korrekte Bewertung der Wiedergabebetreue, also der Nähe des Prototyps zum Original, eine entscheidende Rolle. In der Regel steigt mit der Wiedergabebetreue eines Prototyps auch der Aufwand zu dessen Erstellung. Aufwand meint hier die Menge benötigter Ressourcen, wie Budget, Zeit, Arbeitskraft, Maschinen oder Material.

Um das Aufwand-Wiedergabebetreue-Verhältnis von AT-Prototypen zu beschreiben, folgt eine Gegenüberstellung des Prototyping mittels AT, Rapid-Prototyping (RP) und KT anhand des Beispiels „Zugprobenwerkzeug“ der technischen Vorstudie

(siehe Abschnitt 5.2). Dabei repräsentiert die Zugprobe das zu entwickelnde Produkt, dessen Zweck darin besteht, in Zugversuchen eingesetzt zu werden. Ein mittels RP gefertigter Zugproben-Prototyp könnte mit einem geringen Aufwand hergestellt werden, da lediglich die CAD-Daten des Produktes benötigt werden. Hinsichtlich Erscheinung und Gestalt kann dieser Prototyp bereits einen ersten Eindruck des zu entwickelnden Produktes vermitteln. Aufgrund der anisotropen Struktur des RP-Prototyps würde ein Zugversuch jedoch keine Vergleichbarkeit mit einer Zugprobe aus einem konventionell gefertigten Spritzgusswerkzeug ermöglichen, selbst wenn in beiden Verfahren das gleiche Material verwendet wurde. Mit einem höheren Aufwand lässt sich ein Werkzeug zur Herstellung der Zugprobe mittels AT fertigen. Dazu muss aber zunächst ein Werkzeug konstruiert werden. Im Sinne eines effizienten Prototypingprozesses sollte dieses Werkzeug so einfach wie möglich gehalten werden. Da nun neben dem korrekten Material auch im Spritzgussverfahren gefertigt werden kann, ergibt sich gegenüber dem RP eine höhere, dem KT nähere Wiedergabetreue und damit eine höhere Aussagekraft hinsichtlich der Eigenschaften des (Serien-) Produktes aus dem konventionell hergestellten (Serien-) Werkzeug (vgl. Tabelle 5.1). Hinsichtlich Wiedergabetreue und Realisierungsaufwand lässt sich AT tendenziell zwischen dem RP und dem KT einordnen (siehe Abbildung 5.10).

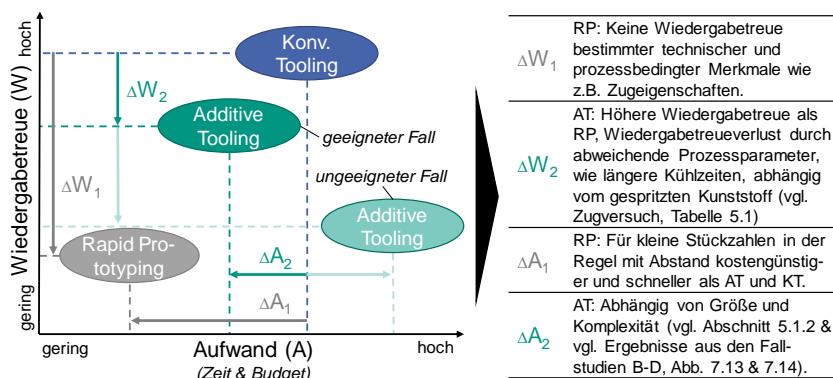


Abbildung 5.10: Tendenzielle Einordnung von AT, RP und KT hinsichtlich Aufwand und Wiedergabetreue auf Basis der DS-I

Wie in Abschnitt 2.1.4 bereits beschrieben wurde, hängen die relevanten Wiedergabedimensionen und die erforderliche Wiedergabetreue vom Testzweck ab. Ob ein Prototyp eine hohe oder niedrige Wiedergabetreue aufweist, lässt sich somit nicht pauschalisieren, sondern nur anhand der interessierenden Wiedergabedimensionen und fallspezifischer Anforderungen beurteilen.

#### 5.4.4 Hürden in der Anwendung von AT

Wie bereits mit der Formulierung des Forschungsbedarfes und vorangegangenen Abschnitte beschrieben wurde, unterscheidet sich das AT technologisch deutlich vom konventionellen Tooling (siehe Abschnitt 3.1), wodurch potenzielle Anwender vor verschiedene Herausforderungen und Probleme gestellt werden. Da der Mensch als Problemlöser stets im Zentrum des Problemlösungsprozesses steht (Albers & Braun, 2011b, S. 13; Bender & Gericke, 2021, S. 27 ff.; Pahl & Beitz, 1977) und daher die Entwicklung einer Anwenderunterstützung auf den Menschen ausgerichtet sein sollte, werden im Folgenden mögliche Hürden aus Sicht des Anwenders betrachtet.

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen zwar, dass mittels AT Prototypen mit einer höheren Wiedergabetreue als mittels RP erzeugt werden können und dass gegenüber dem KT Potenziale für ein schnelleres und kostengünstigeres Prototyping bestehen, jedoch spielen hierbei eine Reihe von Faktoren eine entscheidende Rolle (siehe Abschnitte 2.3.4.1 & 5.1). So hängen die Herstellkosten eines Formeinsatzes bspw. von der Komplexität der Formteil- bzw. Werkzeugform, dem additiv zu verarbeitenden bzw. spanend abzutragenden Materialvolumen und, im Falle einer Fremdfertigung, von der geforderten Lieferzeit ab (siehe Abschnitt 5.1). Zudem kann aufgrund längerer Zykluszeiten von einer längeren und somit teureren Fertigung der Prototypen während des Spritzgießens ausgegangen werden. Weiterhin weisen die AT-Werkzeuge eine begrenzte Standzeit auf, sodass unter Umständen mehrere AT-Werkzeuge hergestellt werden müssen. Während die Herstellungskosten und -zeiten kalkulierbar sind, stehen die Anwender vor dem Problem, dass die Standzeiten der AT-Werkzeuge derzeit nur schwer abschätzbar sind. Wie mit der technischen Vorstudie gezeigt wurde, können Methoden der Simulation zwar zur Abschätzung der Werkzeugbelastung unterstützend eingesetzt werden, eine genaue Ermittlung der Standzeit ist aber nur im praktischen Versuch möglich. Aufgrund der technischen Besonderheiten von AT-Werkzeugen, bedingt durch die eingesetzten Photopolymere und die Schichtbauweise, können sie bei falscher Auslegung und falscher Anwendung leicht beschädigt oder zerstört werden (siehe Abschnitt 5.2). Daher können bestimmte Geometrien nicht abgebildet und viele Kunststoffe nicht für das Spritzgießen mit AT-Werkzeugen eingesetzt werden. Zudem müssen die Spritzgussparameter beim Einsatz von AT-Werkzeugen gegebenenfalls angepasst werden, wodurch sich abweichende Formteileigenschaften gegenüber dem Serienbauteil ergeben können. Da sich diese Abweichungen nur schwer abschätzen lassen, ist eine Interpretation von mittels AT-Prototypen erzielter Testergebnisse gegebenenfalls erschwert.

Die Anwendung von AT stellt Entwickler daher vor verschiedene Fragen, die es im Entwicklungsprozess zu beantworten gilt (vgl. Schrock et al., 2021, S. 5):

- Ist AT für die geplante Anwendung technisch und wirtschaftlich geeignet?
- Welche konstruktiven Besonderheiten sind für eine AT- und spritzgussgerechte Formteil- und Werkzeugauslegung zu beachten (z.B. Wandstärken, Toleranzen etc.)?
- Welche anwendungstechnischen Besonderheiten (z.B. einzustellende Prozessparameter beim Spritzgießen) sind zu beachten, um einen AT-gerechten Spritzgussprozess mit hoher seriennaher Reproduzierbarkeit zu erreichen?
- Sind die mit AT-Prototypen erzielten Versuchsergebnisse valide und lassen sie Rückschlüsse auf Serienbauteile zu?

Entwickler und Hersteller von Spritzgussprodukten und Spritzgusswerkzeugen sind zwar Experten für die Verarbeitung von Kunststoffen durch das Spritzgießverfahren und für die konventionelle Werkzeugfertigung, besitzen aber in der Regel aktuell nicht die erforderlichen Kompetenzen für die additive Fertigung von Werkzeugen aus Photopolymeren (vgl. Interviewstudie 1, Abschnitt 5.3). Auch Schuh et al. (2017, S. 580) führen an, dass AM-Technologien in der Spritzgussbranche bisweilen eher selten eingesetzt werden. Die Interviewstudie 1 zeigt weiterhin, dass die befragten Experten zwar Potenziale in der Anwendung von AT sehen, dass aber aufgrund von mangelndem Wissen und wahrgenommenen Risiken eine gewisse Skepsis bzw. ein mangelndes Vertrauen gegenüber AT vorherrscht. Weiterhin stehen Anwender vor dem Problem, dass es kaum Referenzen für eine AT-gerechte Werkzeugauslegung und Nutzung gibt. Zwar bestehen, wie der Stand der Forschung zeigt, diverse Forschungsarbeiten im Forschungsfeld „AT“, jedoch werden in diesen Studien meist spezifische Anwendungsfälle und Experimente vorgestellt statt einer „Anleitung“ zur Nutzung von AT.

Aus der Summe der bisher in dieser Arbeit betrachteten und durchgeführten Studien ergibt sich das Gesamtbild, dass es sich bei der Anwendung von AT in der Produktentwicklung um ein komplexes System handelt, bei dem eine starke Vernetzung zwischen Produkt, Produktionssystem und Validierungssystem besteht. Für eine erfolgreiche Anwendung von AT reicht es daher nicht aus, einzelne Teilsysteme und spezifische Schwerpunkte zu betrachten. Vielmehr ist eine Betrachtung des Gesamtsystems erforderlich. Eine Unterstützung, die Anwendern eine ganzheitliche und vollständige Vorgehensweise, die notwendigen Schritte sowie Hilfsmittel zur Planung, Realisierung und Anwendung von AT bietet, ist bisher nicht bekannt. Somit lässt sich schlussfolgern, dass nicht nur die technologischen Einschränkungen des AT, sondern zusätzlich folgende Hürden in der Anwendung von AT bei der Zielgruppe der *Produkt- und Werkzeugentwickler* bestehen:

- fehlendes (Erfahrungs-) Wissen,
- wenige oder schwer auf die industrielle Praxis zu übertragende Referenzen,
- fehlende AT-spezifische Hilfsmittel und fehlende methodische Unterstützung.

## 5.5 Fazit zu Kapitel 5

Basierend auf dem Stand der Forschung und den im Rahmen der DS-I durchgeführten Studien wurden in Kapitel 5 zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage (FF1) verschiedene Potenziale des AT und Hürden in dessen Anwendung identifiziert und näher beschrieben.

**FF1:** Welche Potenziale besitzt Additive Tooling im Hinblick auf eine effiziente Validierung physischer Prototypen im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung und welchen Herausforderungen in Bezug auf dessen Anwendung stehen Entwickelnde gegenüber?

Die vorgestellten Studien zeigen, dass die Anwendung von AT in geeigneten Fällen das Potenzial besitzt, Prototypen mit hoher, seriennaher Wiedergabetreue kostengünstiger und schneller als mittels konventionell gefertigter Werkzeuge zur Verfügung zu stellen. Dies eröffnet Produktentwickelnden die Chance, Validierungsaktivitäten nicht nur effizienter, sondern auch früher durchzuführen, wodurch auch ein früherer und schnellerer Erkenntnisgewinn erzielt werden kann. Zudem lässt sich somit agiler auf Validierungsbedarfe reagieren. Da das AT gegenüber dem KT jedoch diverse Nachteile und Risiken aufweist (vgl. Tabelle 5.4) sollte ein entsprechend großer zeitlicher und finanzieller Mehrwert auf Seiten des AT erwartbar sein. Andernfalls wäre das KT als risikoärmere Prototypingtechnologie zu bevorzugen. Wie die wirtschaftliche Betrachtung von AT zeigt, wäre bei Ausfall von bereits einem AT-Formeinsatz die konventionelle Fertigung unter Umständen kostengünstiger und schneller (vgl. Abschnitte 5.1 & 7.2.3).

Die Planung und Realisierung einer Validierungsumgebung, in der die Anwendung von AT einen integralen Bestandteil zur Herstellung von Prototypen darstellt, basiert – wie auch die Entwicklung von Spritzgussprodukten und -werkzeugen – auf einem komplexen System wechselwirkender Zusammenhänge. Gegenüber dem Einsatz konventioneller Spritzgusswerkzeuge führen die durch das AT geänderten Rahmenbedingungen zu Unterschieden auf technischer Ebene. So sind AT-Formeinsätze aus Photopolymeren aufgrund ihrer Eigenschaften in ihren Anwendungsmöglichkeiten eingeschränkt und können leicht beschädigt oder zerstört werden.

Aus diesem Grund müssen auf Entwicklungsprozessebene grundlegende Prozessabläufe angepasst werden. So sollte die Anwendung des AT zum Beispiel mit einer sorgfältigen Technologieprüfung einhergehen. In vielen Fällen dürfte auch eine Anpassung des Abmusterungs- und Spritzgussprozesses sowie der Spritzgussparameter erforderlich sein. Da vom Serienprozess abweichende Prozessparameter zu abweichenden Formteileigenschaften führen können, bergen die mit AT-

Werkzeugen hergestellten Prototypen auch Spielraum für Fehlinterpretationen. Die Zugversuche der technischen Vorstudie zeigen, dass AT-gefertigte Zugproben aus teilkristallinen Thermoplasten höhere Festigkeitswerte gegenüber dem Referenzwerkzeug aus Stahl aufweisen.

Wie durch die Interviewstudie gezeigt wurde, liegt für das AT zudem nur wenig bis kein Erfahrungswissen bei potenziellen Anwendern vor. So stellt das Fehlen geeigneter Referenzen, Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien sowie methodischer Unterstützung eine Hürde in der Anwendung von AT in der industriellen Praxis dar. Durch das Fehlen AT-spezifischer Referenzsystemelemente wird auch das Bilden eines Referenzsystems im Modell der SGE erschwert. Jedoch bieten die vorhandenen Erkenntnisse, die überwiegend aus der Forschung stammen, das Potenzial, als Referenzsystemelemente in einer systematischen Vorgehensweise Anwendung zu finden.

Im Rahmen der folgenden präskriptiven Studie sollen daher zur Unterstützung der Anwender von AT auf der Ebene der Produktvalidierung Teilprozesse erstellt und unterstützende Methoden ausgewählt bzw. entwickelt werden. Wie der Stand der Forschung und die durchgeführten Studien der DS-I zeigen, ist zur Formulierung konkreter Aufgaben, Aktivitäten und Richtlinien aber auch eine Betrachtung tieferliegender Ebenen notwendig (siehe Abbildung 5.11).

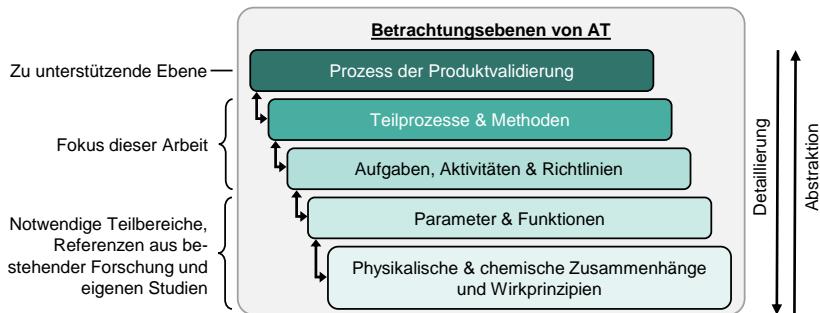


Abbildung 5.11: Unterschiedliche Betrachtungsebenen von AT zur Entwicklung einer Anwenderunterstützung



## 6 Unterstützung in der Anwendung von Additive Tooling zur Validierung

In diesem Kapitel wird zur Unterstützung der Anwendung von AT zur Validierung in der Produktentwicklung die „*Additive Tooling Systematik (AT-Systematik)*“ vorgestellt. Entsprechend der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Zielsetzung, soll die AT-Systematik nicht nur als strukturierendes Vorgehensmodell dienen, sondern auch praktisch anwendbare Methoden und Hilfsmittel für eine erfolgreiche Anwendung von AT bereitstellen. Die Entwicklung dieser Unterstützung entspricht der präskriptiven Studie (PS, vgl. Abschnitt 4.1) und baut auf den Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung (Kapitel 2) und der DS-I (Kapitel 5) auf. Im Zuge der PS wird die in Kapitel 3 gestellte Forschungsfrage 2 (FF2) beantwortet:

FF2: Wie ist eine Methode zu gestalten, mit der Entwickelnde das Potenzial des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung heben können?

In Abschnitt 6.1 wird zunächst eine Konkretisierung des Zielsystems der zu entwickelnden Unterstützung vorgenommen. Anschließend erfolgt die Beschreibung der AT-Systematik in Abschnitt 6.2. In Abschnitt 6.3 werden weitere Methoden und selbst entwickelte Hilfsmittel vorgestellt, die als Support innerhalb der AT-Systematik dienen. Der Anwendungsbereich der AT-Systematik im Kontext der integrierten Produktentwicklung und dem Modell der SGE wird in Abschnitt 6.2.1 erläutert.

Das genutzte Forschungsdesign basiert auf einem iterativen Vorgehen zwischen den Stadien der DRM, womit die Entwicklung der AT-Systematik innerhalb der PS teilweise parallel und iterativ zu den Studien der DS-I und der DS-II durchgeführt wurde (vgl. Abschnitt 4.1). Die Methodenentwicklung wurde weiterhin durch eine Support-Evaluation begleitet, die im Rahmen einer Anwendungsstudie in der Abschlussarbeit von Wolfinger (2022)<sup>1</sup> durchgeführt wurde (siehe Abschnitt 6.4). Damit wurde sichergestellt, dass die entwickelte Unterstützung vom Anwender genutzt und in der DS-II evaluiert werden kann. Weiterhin wurden die Erkenntnisse der Evaluationsstudien der DS-II sukzessive zur kontinuierlichen Optimierung der AT-Systematik herangezogen. In den nachfolgenden Abschnitten wird der finale Stand der AT-Systematik und der entwickelten Hilfsmittel vorgestellt. Das Phasenmodell der

---

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

AT-Systematik und dessen Entwicklung wurden bereits in Schrock et al. (2022) und Schrock et al. (2021) veröffentlicht.

## 6.1 Zielsystem zur Unterstützung von Additive Tooling

Zu Beginn der PS wird die in Kapitel 3 beschriebene Zielsetzung auf Basis der Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und den im Rahmen der DS-I durchgeführten Untersuchungen in Form eines Zielsystems für die zu entwickelnden Methode konkretisiert. Dazu werden zunächst die elementaren, zu unterstützenden Handlungsfelder beschrieben (siehe Abschnitt 6.1.1). Darauf aufbauend werden Zielsystemelemente in Form von Anforderungen an die zu entwickelnde Unterstützung definiert (siehe Abschnitt 6.1.2).

### 6.1.1 Handlungsfelder

Auf der Basis des Forschungsstandes und der durchgeführten Studien werden nachfolgend drei Handlungsfelder zur Unterstützung von AT in der Produktentwicklung beschrieben.

#### 6.1.1.1 Handlungsfeld 1: Eignungsprüfung von AT unterstützen

Aus den wirtschaftlichen und technischen Betrachtungen von AT wird klar ersichtlich, dass AT nicht immer für eine effektive oder effiziente Prototypenerstellung geeignet ist (vgl. Abschnitte 2.3.4, 5.1, 5.2 & 5.4). Daher sollten die technische Machbarkeit, die Wirtschaftlichkeit und die Eignung zum Erreichen der benötigten Wiedergabekriterien vorab geprüft werden, um die Eignung von AT für die spezifische Validierungsaufgabe sicherzustellen.

*a) Technische Eignung prüfen:* Zwar erlaubt die additive Fertigung hohe Freiheitsgrade hinsichtlich der geometrischen Gestaltbarkeit eines Bauteils (vgl. Abschnitt 2.3.2), allerdings sind den AT-Formeinsätzen, aufgrund der derzeitigen Werkstoffeigenschaften der für das AT genutzten Photopolymere, technische Grenzen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Haltbarkeit gesetzt. Entsprechend lassen sich nicht alle Kunststoffe für das Spritzgießen verarbeiten und es bestehen Einschränkungen hinsichtlich der Ausprägung verschiedener Prozessparameter und herstellbarer Formteilgeometrien (vgl. Abschnitt 2.3.4.2 & 5.2).

*b) Wirtschaftliche Eignung prüfen:* Die im Stand der Forschung dargestellten Erkenntnisse zeigen zwar, dass AT in geeigneten Fällen im Vergleich zum konventionellen Werkzeugbau Potenziale zur Kosten- und Zeiteinsparung bietet (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die Markt- und Beschaffungsstudie zeigt jedoch, dass, im Falle der

Werkzeugbeschaffung über einen Dienstleister, AT nicht in jedem Fall die kosten-günstigere oder schnellere Variante ist (vgl. Abschnitt 5.1.2).

c) *Ausreichende Wiedergabetreue prüfen:* Entsprechend der besonderen Eigen-schaften der AT-Werkzeuge treten in der Regel abweichende Parameter zum Seri-enprozess und damit evtl. abweichende Formteileigenschaften auf (vgl. Abschnitte 2.3.4.2 & 5.2.2.2). Demnach sollte im Vorfeld einer Entscheidung für AT sicherge-stellt werden, dass der AT-Prototyp auch die erforderliche Wiedergabetreue er-reicht. Zudem sollten etwaige Abweichungen analysiert werden, um die Validität der Testergebnisse beurteilen zu können.

#### **6.1.1.2 Handlungsfeld 2: Aufbau und Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung unterstützen**

Wie bereits in Handlungsfeld 1 beschrieben und anhand des Standes der Forschung dargelegt besitzen AT-Werkzeuge besondere, gegenüber dem konventionellen Tooling abweichende Eigenschaften. Damit AT gezielt und erfolgreich eingesetzt werden kann, müssen diese Eigenschaften beim Aufbau und der Nutzung der Vali-dierungsumgebung berücksichtigt werden. Zum einen sollten Gestaltungs- und An-wendungsrichtlinien für AT-gerechtes Design beachtet werden, welche derzeit aber kaum in der Literatur und in einer direkt anwendbaren Form verfügbare sind. Zum anderen ändern sich diverse Prozessabläufe, wie beispielsweise der Fertigungsprozess des Werkzeuges oder der Abmusterungsprozess (vgl. Abschnitte 2.3.4.2 & 5.2). Auch hierzu gibt es bislang nur wenige Referenzen, welche zudem aus einer fragmentierten Forschung stammen und aus Sicht der Produktentwicklung keine ganzheitliche Prozessbetrachtung bieten. Wie die Interviewstudie gezeigt hat, be-stehen bei den potenziellen Nutzern des AT zudem Wissenslücken bezüglich des AT-spezifischen Wissens (vgl. Abschnitt 5.3).

#### **6.1.1.3 Handlungsfeld 3: Interpretation der Testergebnisse unterstützen**

Wie die betrachteten Studien zeigen, hängen die Formteileigenschaften von ver-schiedenen, teils wechselwirkenden Parametern und deren Ausprägung ab (siehe Abschnitte 2.3.4.2 & 5.2.2). Dabei unterscheiden sich die Parameterausprägungen von additivem und konventionellem Tooling teilweise, sodass abweichende Form-teileigenschaften entstehen können (siehe Abschnitte 2.3.4.2 & 5.2.2). Damit eine valide Interpretation der Testergebnisse möglich ist, müssen diese Zusammen-hänge und mögliche Abweichungen zwischen Prototyping- und Serienprozess be-rücksichtigt werden.

### 6.1.2 Zielsystemelemente

In Abschnitt 3.2 wurde das Ziel formuliert, die Anwender von AT methodisch zu unterstützen, um AT erfolgreich für eine effiziente und kontinuierliche Produktvalidierung einsetzen zu können. Um AT erfolgreich anwenden zu können, wurden die zu unterstützenden Bereiche des AT durch die zuvor formulierten Handlungsfelder definiert (siehe Abschnitt 6.1.1). Es wird die Annahme getroffen, dass durch eine methodische Unterstützung und die Durchführung entsprechender Aktivitäten in diesen Handlungsfeldern ein erfolgreiches Prototyping mit AT ermöglicht wird. Aus dieser Annahme heraus wird das in Abschnitt 3.2 eingeführte Zielmodell wie in Abbildung 6.1 dargestellt erweitert. Dazu werden die zu unterstützenden Handlungsfelder sowie die im Folgenden näher beschriebenen Evaluationsarten implementiert.

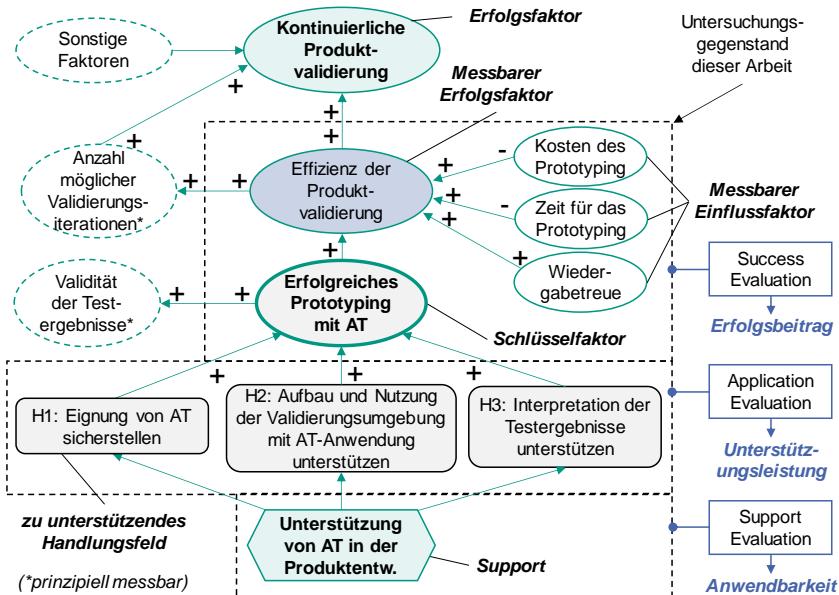


Abbildung 6.1: Erweitertes Zielmodell an die zu entwickelnde Unterstützung in Anlehnung an das *Initial Impact Model* nach Blessing und Chakrabarti (2009) mit prinzipieller Darstellung der Evaluation

In Anlehnung an die DRM (vgl. Abschnitt 4.1) erfolgt die Evaluation der prinzipiellen Durchführbarkeit, also dem Testen der technischen Funktionalität, sowie der Prüfung auf Widerspruchs- und Fehlerfreiheit im Rahmen der *Support-Evaluation*, wodurch die *Anwendbarkeit* der Unterstützung sichergestellt wird. Im Rahmen der

*Application-Evaluation* wird anschließend, neben der Anwendbarkeit in der Praxis, die durch die Anwender der Unterstützung wahrgenommene *Unterstützungsleistung* überprüft und bewertet. Durch die *Success-Evaluation* wird abschließend der *Erfolgsbeitrag* der Unterstützung bewertet. Blessing und Chakrabarti stellen fest, dass die Überprüfung des tatsächlichen Erfolgsbeitrages einer Unterstützung den schwierigsten Teil der Methodenevaluation darstellt, da der Erfolg einer Unterstützung nur in der Praxis und meist nur auf lange Sicht gemessen werden kann. Daher werden messbare Erfolgsfaktoren eingeführt, mit denen die Bewertung des Nutzens der Unterstützung in einem vertretbaren Umfang durchführbar ist (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 185).

So ist zwar bekannt, dass die *kontinuierliche Produktvalidierung* einen Erfolgsfaktor der Produktentwicklung darstellt (vgl. Abschnitt 2.1), jedoch ist diese praktisch nur sehr schwer messbar bzw. bewertbar. Unterschiedliche Projekte lassen sich dahingehend nur schwer oder kaum vergleichen, da der Validierungsbedarf projektspezifisch variiert. Es kann jedoch argumentiert werden, dass eine *effiziente Produktvalidierung* die kontinuierliche Produktvalidierung positiv beeinflusst, da durch den zeitlichen Vorteil früher und durch den finanziellen Vorteil öfter validiert werden kann. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Effizienz eines Prozesses stellen die benötigten Ressourcen dar, sodass die für das Prototyping *benötigte Zeit* und die *entstandenen Kosten* als messbare Einflussfaktoren zur Bewertung der Effizienz herangezogen werden können. Die *Anzahl der möglichen Validierungsiterationen* und die *Validität der Testergebnisse* können nur gemessen werden, wenn in den Validierungsstudien parallel ein konventionell gefertigtes Prototypenwerkzeug zum Vergleich der Anzahl an Iterationen und ein Serienwerkzeug zur Bewertung der Validität hergestellt werden. Aufgrund des damit einhergehenden hohen Aufwands werden diese Faktoren im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht gemessen.

Zur Bewertung der zu entwickelnden Unterstützung werden prüfbare und bewertbare Zielsystemelemente in Form von Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag*, die *Unterstützungsleistung* und die *Anwendbarkeit* definiert. Die Definition dieser Anforderungen leitet sich dabei aus den identifizierten Unterstützungsbedarfen (siehe Handlungsfelder H1-H3) und dem im Folgenden formulierten Ziel der Methodenanwendung ab:

**Ziel der Methodenanwendung:**

Die Anwendung der zu entwickelnden Methode soll den erfolgreichen Einsatz von Additive Tooling als Prototypingtechnologie zur effizienten und kontinuierlichen Produktvalidierung ermöglichen.

Das prinzipielle Vorgehen zur Anforderungsdefinition ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

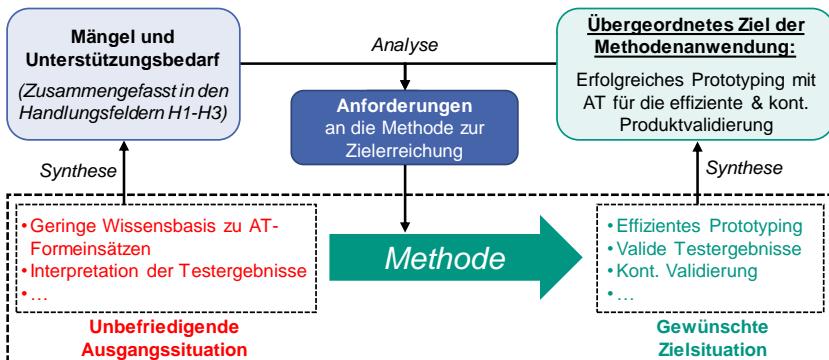


Abbildung 6.2: Prinzipielles Vorgehen zur Definition von Anforderungen an die zu entwickelnde Methode

Beispiel 1: Damit die Anwendung der zu entwickelnden Methode den erfolgreichen Einsatz von Additive Tooling als Prototypingtechnologie zur effizienten und kontinuierlichen Produktvalidierung ermöglicht (Ziel), müssen die relevanten Handlungsfelder des AT in der PE unterstützt werden (Anforderung, vgl. Tabelle 6.1, Anforderung E1).

Beispiel 2: Damit die zu entwickelnde Methode in der Praxis Anwendung finden kann (Ziel), muss die Methode einfach zu verstehen sein (Anforderung, vgl. Tabelle 6.3, Anforderung A1).

Im Folgenden werden 17 prüfbare und bewertbare Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag*, die *Unterstützungsleistung* und die *Anwendbarkeit* definiert (siehe Abschnitte 6.1.2.1 bis 6.1.2.3).

### 6.1.2.1 Anforderungen an den Erfolgsbeitrag (E)

Erfolgsfaktoren wie die für das Prototyping benötigte Zeit und die damit verbundenen Kosten können zwar direkt gemessen werden, lassen jedoch keinen direkten Schluss auf den Erfolgsbeitrag (E) der eingesetzten Unterstützung zu. Zum einen müsste dasselbe Projekt mit verschiedenen Prototyping-Technologien durchgeführt werden, um ermitteln zu können, ob durch AT tatsächlich eine Zeit- und Kostensparnis erzielt wurde. Zum anderen müsste das Projekt weiterhin einmal mit und einmal ohne die zu evaluierende Unterstützung durchgeführt werden, um zu prüfen, welchen Anteil die Unterstützung an der erfolgreichen Projektdurchführung trägt. Da dies aufgrund des hohen Aufwandes im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, werden stattdessen Referenzwerte für das konventionelle Tooling durch Kalkulation

erzeugt und für den Vergleich mit AT herangezogen. Zudem müsste zur Ermittlung des Erfolgsbeitrages der Unterstützung am Projekterfolg die Vorgehensweise variiert werden (mit Unterstützung bzw. ohne Unterstützung), was aufgrund des hohen technischen Aufwandes ebenfalls nicht möglich ist. Um dennoch den Beitrag der zu entwickelnden Unterstützung am *erfolgreichen Prototyping mit AT*<sup>2</sup> bestimmen zu können, werden in Tabelle 6.1 Anforderungen an den Erfolgsbeitrag definiert, welche während der Evaluation vom Methodenanwender zumindest subjektiv bewertet werden können. Die Methodenevaluation im Rahmen der DS-II wird daher bewusst als initial bezeichnet. Die Prüfung, ob diese Anforderungen erfüllt sind, sowie eine detaillierte Beschreibung des Vorgehens der Evaluierung erfolgt im Rahmen der Success-Evaluation innerhalb der DS-II, welche in Kapitel 7 vorgestellt wird.

Tabelle 6.1: Anforderungen an den Erfolgsbeitrag (E) der Methode

<b>Die Methode soll ...</b>	
E1	die relevanten Handlungsfelder des AT in der PE unterstützen.
E2	die notwendigen Aktivitäten zur erfolgreichen Nutzung von AT zur Validierung in der PE enthalten.
E3	das notwendige Wissen oder eine Hilfe zur Herleitung dieses Wissens zur Verfügung stellen.
E4	bei der Realisierung und Nutzung des AT helfen.

### 6.1.2.2 Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U)

Die Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U) wurden aus den drei zu unterstützenden Handlungsfeldern *Eignung von AT sicherstellen, Aufbau und Nutzung der Validierungsumgebung* und *Interpretation der Testergebnisse* abgeleitet und basieren somit auf dem Stand der Forschung und den Studien der DS-I. In Tabelle 6.2 sind die festgelegten Anforderungen gelistet. Die Relevanz dieser Anforderungen wurde im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Dogan (2022, S. 40 ff.)<sup>3</sup> durch eine Online-Umfrage, sowie zusätzlich durch die im Zuge der Methodenevaluation durchgeführte Interviewstudie 3 (siehe Abschnitt 7.4) bestätigt. Anhang E2 enthält die zusammengefassten Ergebnisse dieser Relevanzbewertung. Die Überprüfung des Erfüllungsgrades der Anforderungen erfolgt im Rahmen der Application-Evaluation innerhalb der DS-II in Kapitel 7.

<sup>2</sup> Vgl. Definition 6 (S. 79): Als „erfolgreich“ gilt die effiziente Anwendung von AT im Vergleich zu alternativen Prototypingtechnologien, wenn sie zu validierungsgeeigneten Prototypen, validen Testergebnissen und dem Erreichen der Validierungsziele führt.

<sup>3</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

Tabelle 6.2: Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U) der Methode

	<b>Die Methode soll ...</b>	<b>Begründung / Relevanz</b>
U1	die Ermittlung und Konkretisierung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs unterstützen.	Eine Eignungsprüfung ( <i>Anforderung U2</i> ) setzt Kenntnisse über die Validierungsziele und die durchzuführenden Tests voraus, weswegen zunächst eine Konkretisierung der Validierungsziele erfolgen muss.
U2	die Prüfung, ob sich AT für die Validierungsaufgabe eignet, unterstützen.	Abgeleitet aus dem in <i>Handlungsfeld 1</i> identifizierten Unterstützungsbedarf.
U3	in den Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge unterstützen.	Abgeleitet aus dem in <i>Handlungsfeld 2</i> identifizierten Unterstützungsbedarf.
U4	in der Anwendung der Validierungs-umgebung unterstützen.	Abgeleitet aus dem in <i>Handlungsfeld 2</i> identifizierten Unterstützungsbedarf.
U5	die Auswertung und Interpretation der Testergebnisse unterstützen.	Abgeleitet aus dem in <i>Handlungsfeld 3</i> identifizierten Unterstützungsbedarf.
U6	die Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte unterstützen.	Da AT vergleichsweise neu ist, wird von einem hohen Wissensgewinn in AT-Projekten ausgegangen. Dieser Wissenszugewinn sollte gesichert werden. In der Interviewstudie 1 wurde eine Bereitstellung von Wissen und Referenzen für AT-Projekte gefordert.

#### 6.1.2.3 Anforderungen an die Anwendbarkeit (A)

Eine intuitive Anwendbarkeit, sowie Akzeptanz und Vertrauen in die Unterstützung stellen Erfolgsfaktoren für eine gewissenhafte Anwendung dar (Marthaler et al., 2019). Damit die Methodik in der Praxis eingesetzt werden kann und auch Akzeptanz bei den Methodenanwendern findet, werden die in Tabelle 6.3 beschriebenen Anforderungen an die Anwendbarkeit (A) definiert. Die Notwendigkeit zur Berücksichtigung dieser bzw. vergleichbarer<sup>4</sup> Anforderungen an Methoden im Produktentwicklungsumfeld wurde bereits durch Umfragen in beispielsweise den Forschungsarbeiten von Reinemann (2020) und Dühr (2023) belegt. Die Überprüfung des Erfüllungsgrades dieser Anforderungen erfolgt im Rahmen der Application-Evaluation in Kapitel 7.

---

<sup>4</sup> Anforderungen mit sinngemäß übertragbarer Formulierung und Aussage.

Tabelle 6.3: Anforderungen an die Anwendbarkeit (A) der Methode

	<b>Die Methode soll ...</b>	<b>Begründung / Relevanz</b>
A1	einfach zu verstehen sein.	Führt bei Nichterfüllung zu Ineffizienz und geringer Akzeptanz der Methode.
A2	einfach anzuwenden sein.	
A3	in sinnvolle Schritte gegliedert sein.	
A4	einen angemessenen Detaillierungsgrad besitzen.	
A5	ein angemessenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis besitzen.	
A6	in der industriellen Praxis anwendbar sein.	
A7	auf unterschiedliche Projekte übertragbar sein.	

## 6.2 Beschreibung der AT-Systematik

Die *AT-Systematik* ist ein strukturierendes Vorgehensmodell, welches in sechs Phasen durch den Prozess der Prototypenherstellung mittels AT führt. Innerhalb der AT-Systematik werden zusätzliche phasen- und aktivitätenspezifische Methoden und Hilfsmittel zur Verfügung gestellt. Im Fokus der AT-Systematik steht die Unterstützung der in Abschnitt 6.1.1 definierten *Handlungsfelder H1 - H3*. Aus diesen Handlungsfeldern und auf Basis des erfolgreichen Vorgehens<sup>5</sup> aus der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (siehe Abschnitt 5.2.2), wurde ein generisches Phasenmodell erstellt. Das Modell adressiert zudem phasenweise die sechs Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U1-U6, vgl. Abschnitt 6.1.2.2). Ein streng sequenzielles Vorgehen wird durch das Phasenmodell der AT-Systematik jedoch nicht gefordert. Wie in der folgenden Beschreibung gezeigt wird, lassen sich einzelne Aktivitäten verschiedener Phasen auch teilweise parallelisieren und können in Iterationen durchlaufen werden. Der Übergang zwischen den einzelnen Phasen kann mit den sogenannten „Fuzzy Gates“ der dritten Generation des Stage-Gate-Ansatzes von COOPER verglichen werden (vgl. Cooper, 1994). Der Ablauf der sechs Phasen orientiert sich nicht nur an den Handlungsfeldern H1-H3 und dem bereits erfolgreich eingesetzten Vorgehen der Vorstudie, sondern ist auch im weitesten Sinne an die bewährte Problemlösungsmethode SPALTEN (siehe Abschnitt 2.1.2.3) angelehnt. Prinzipiell lässt sich jede Phase der AT-Systematik in einem eigenständigen SPALTEN-Prozess durchführen. Allerdings werden bestimmte Aktivitäten innerhalb der

<sup>5</sup> Anhang D4 zeigt die Zuordnung der projektspezifischen Aktivitäten und Handlungsschritte des optimierten Prozessmodells der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (siehe Abbildung 5.8) zu den sechs Phasen der AT-Systematik.

Phasen bereits durch einen Referenzprozess vorgegeben (siehe Abschnitt 6.3.1 - *AT-Checkliste*).

In Abbildung 6.3 wird die AT-Systematik mit einer kurzen Beschreibung jeder Phase und den wesentlichen Phasenergebnissen dargestellt.

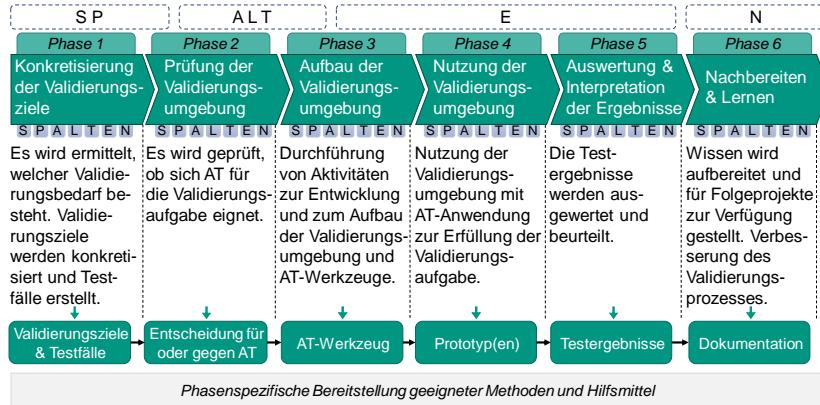


Abbildung 6.3: Gliederung der AT-Systematik mit Kurzbeschreibung der sechs Phasen und Angabe der wichtigsten Phasenergebnisse (in Anlehnung an Schrock et al., 2022)

Während das Phasenmodell der AT-Systematik ein Framework zur Strukturierung des Validierungsvorgehens bildet, werden innerhalb einer jeden Phase konkrete Aktivitäten, Handlungsempfehlungen und weitere, unterstützende Methoden vorgeschlagen. Einerseits wurden dazu bestehende Methoden übernommen oder entsprechend adaptiert. Andererseits wurden eigene, AT-spezifische Hilfsmittel entwickelt. Dazu zählen die *AT-Checkliste*, die *AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM)* und der *AT-Konstruktionskatalog*.

- Mit der *AT-Checkliste* werden die in der Vorstudie identifizierten Aktivitäten und Aufgaben in verallgemeinerter Form zusammengefasst und im Sinne eines Referenzprozesses zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 6.3.1).
- Die *AT-DSM* bietet einen Überblick über die AT-relevanten Einflussgrößen und Prozessparameter und ermöglicht die Beschreibung von Wechselwirkungen und deren weitere Untersuchung (siehe Abschnitt 6.3.2.2).
- Der *AT-Konstruktionskatalog* enthält Konstruktionsrichtlinien und Anwendungsbeispiele auf Basis verschiedener Forschungsarbeiten und eigenen Untersuchungen (siehe Abschnitt 6.3.2.3).

Eine Übersicht über die empfohlenen Hilfsmittel und ihre Zuordnung zu den Phasen innerhalb der AT-Systematik ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

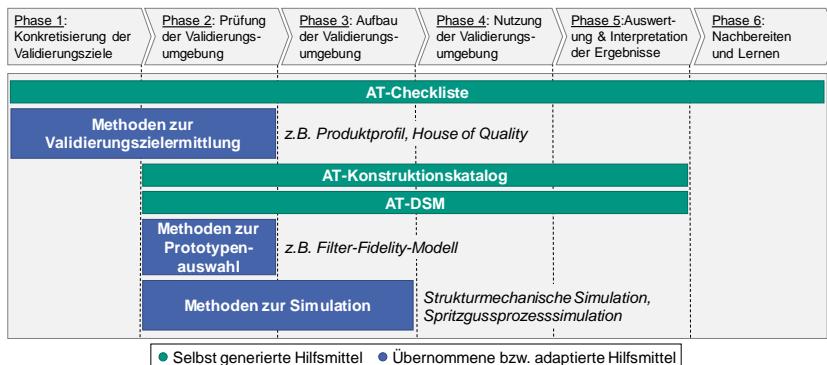


Abbildung 6.4: Übersicht über die verschiedenen Hilfsmittel innerhalb der sechs Phasen der AT-Systematik

Die hier vorgestellten Methoden stellen jedoch nur eine exemplarische Auswahl von in Frage kommenden Methoden dar. Es wird daher nicht der Anspruch erhoben, einen vollständigen Überblick über alle verfügbaren und geeigneten Methoden zu geben. Vielmehr soll eine Auswahl an unterstützenden Methoden und Werkzeugen gegeben werden. Letztlich ist die Entscheidung dem Anwender der AT-Systematik überlassen, der das Verhältnis von Aufwand und Nutzen des Methodeneinsatzes anwendungsfallbezogen abwägen sollte.

Nach der AT-Systematik erfolgt die Entwicklung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung auf der Grundlage des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Entsprechend basiert die Entwicklung der Validierungsumgebung auf den Elementen eines Referenzsystems. Demnach wird davon ausgegangen, dass Referenzsystemelemente bestehen, welche im Laufe des Entwicklungsprozesses, bzw. während der Planung und Realisierung der Validierungsumgebung zu identifizieren sind. Durch entsprechende Variation können diese Referenzsystemelemente auf die Entwicklung des Produktes, des Produktionssystems und des Validierungssystems übertragen werden. Bestimmte potenzielle Referenzsystemelemente werden bereits durch diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht über die AT-spezifischen Referenzsystemelemente, welche aus der DS-I und PS stammen, wird in Abbildung 6.5 gegeben.

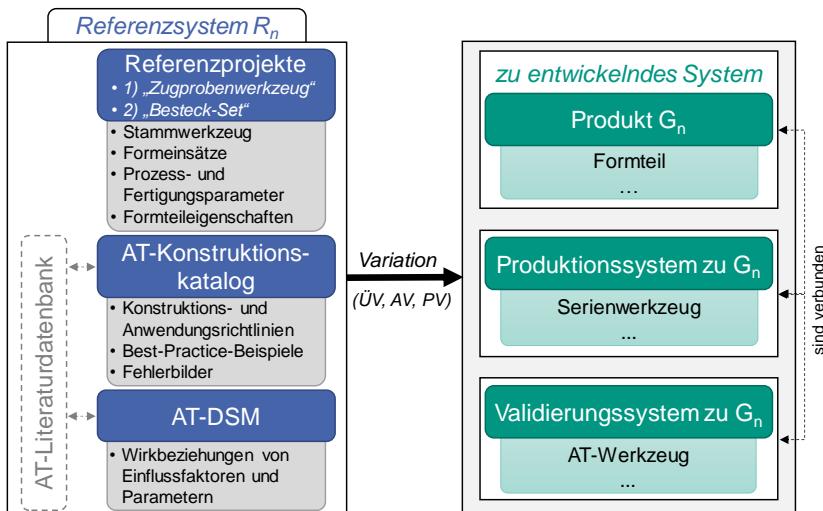


Abbildung 6.5: AT-spezifische Referenzsystemelemente, welche im Modell der SGE zur Entwicklung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung genutzt werden können.

Anwendungsbeispiele zur AT-Systematik und der empfohlenen Hilfsmittel und Methoden werden in der folgenden Beschreibung der sechs Phasen der AT-Systematik (Abschnitte 6.2.1 bis 6.2.7) und anhand der zur Evaluation durchgeföhrten Fallstudien in Kapitel 7 gegeben. Eine gesonderte Beschreibung der selbst generierten Hilfsmittel erfolgt in Abschnitt 6.3.

## 6.2.1 Anwendungsbereich der AT-Systematik in der integrierten Produktentwicklung

Die AT-Systematik soll eine möglichst „schlanke“ Unterstützung für die Herstellung von Spritzgussprototypen mittels AT darstellen und das effiziente Validieren von Produkteigenschaften ermöglichen. Dazu wird, neben dem Phasenmodell der AT-Systematik (siehe Abschnitt 6.2), mit der AT-Checkliste (siehe Abschnitt 6.3.1) ein Referenzprozess für die Nutzung von AT gegeben, welcher situationsspezifisch angepasst und durchgeführt werden kann.

Zur Modellierung und Strukturierung des gesamten Produktentwicklungsprozesses kann sie in Verbindung mit Meta-Modellen, wie dem integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM, siehe Abschnitt 2.1.2.2), gekoppelt werden. Das iPeM ermöglicht dabei die Ableitung eines situationsspezifischen PEP und enthält bereits die

wesentlichen Produktentwicklungsaktivitäten sowie die Kopplung von Produktgeneration, Produktionssystem und Validierungssystem. Im Kontext des iPeM steht die AT-Systematik primär in direkter Verbindung mit den Aktivitäten „Validieren und Verifizieren“ und „Prototyp aufbauen“. Der mit der AT-Systematik verbundene Referenzprozess enthält die erforderlichen Aktivitäten zur Planung, zum Aufbau und zur Nutzung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung.

Damit ist die AT-Systematik als zusätzliche, eigenständige Methode innerhalb eines PEP zur Validierung von Spritzgussprodukten zu verstehen. Die Kopplung der AT-Systematik an das iPeM ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

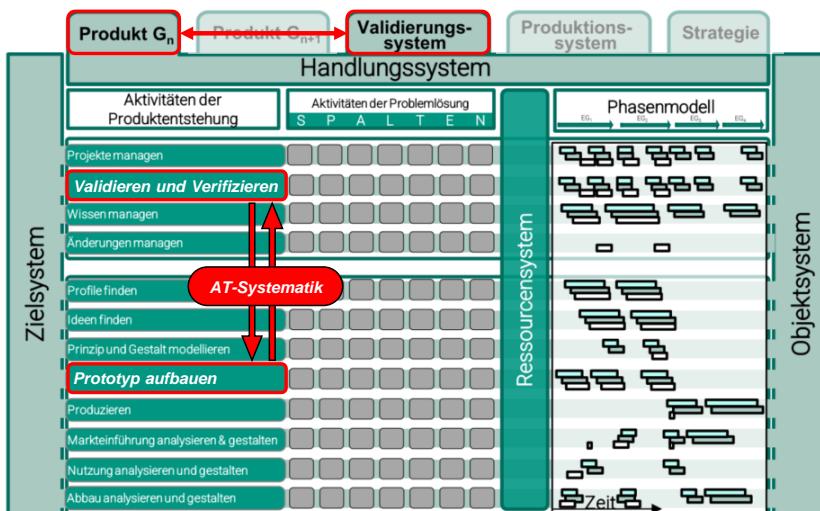


Abbildung 6.6: Kopplung der AT-Systematik mit dem integrierten Produktentstehungsmodell (iPeM) nach ALBERS

Ein Beispiel zur Anwendung der AT-Systematik in der integrierten PE mit einem im iPeM modellierten Beispielprozess kann aus Schrock et al. (2022) entnommen werden. Darin wurden zwischen iPeM und AT-Systematik bereits die folgenden Beziehungen definiert:

- Das Produkt stellt Anforderungen an das Produktionssystem, wobei das Produktionssystem wiederum die möglichen Eigenschaften des Produkts durch Fertigungsrestriktionen einschränkt.
- Die Entwicklung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung wird als eigenständiger Prozess betrachtet, der eng mit der Entwicklung des Produkts und des Produktionssystems verknüpft ist.

- Die Entwicklung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung erfolgt in dem separaten iPeM-Layer „Validierungssystem“.
- Die im Validierungssystem erstellten Objekte (z.B. die AT-Werkzeuge) stehen über das gemeinsame Ressourcensystem den entsprechenden Aktivitäten anderer Layer (z.B. Prototyp aufbauen, Validieren und Verifizieren) zur Verfügung und umgekehrt.

Im Folgenden werden die sechs Phasen der AT-Systematik näher beschrieben. Um den „Kern“ jeder Phase zu verdeutlichen, wird eine zentrale Leitfrage oder Leitaktivität formuliert. Zudem werden die Aktivitäten aus der AT-Checkliste phasenspezifisch aufgeführt. Bei diesen Aktivitäten handelt es sich um Empfehlungen auf Basis der bisher betrachteten Studien aus dem Stand der Forschung und der DS-I und der daraus gewonnenen Erkenntnisse. Diese können und sollten bei Bedarf explizit an die tatsächliche Projektsituation angepasst werden. Eine zusammenfassende Darstellung der sechs Phasen der AT-Systematik inklusive Leitfrage bzw. Leitaktivität sowie Referenzaktivitäten und Methodenempfehlungen kann Anhang F1 entnommen werden.

## 6.2.2 Phase 1: Konkretisierung der Validierungsziele

Zu Beginn des Validierungsprozesses steht unabhängig von der Art der Validierungsaktivität immer die Konkretisierung des Validierungsziels (Albers, Behrendt et al., 2016; Klingler, 2016). Da der Einsatz von AT bestimmten Restriktionen unterliegt (vgl. Abschnitte 2.3.4 und 5.4), sollte vorab die Eignung von AT geprüft werden (vgl. Abschnitt 6.1.1.1 - Handlungsfeld 1). Um eine Eignungsprüfung durchführen zu können, müssen jedoch die Testfälle bekannt sein, welche ihrerseits die vorherige Festlegung von Validierungszielen erfordern.

**Leitfrage: „Was“ soll getestet werden und welcher Testgegenstand lässt sich daraus ableiten?**

Hauptergebnis der Phase 1 sind konkrete Validierungsziele, sowie initial beschriebene Testfälle mit definiertem Testgegenstand und Anforderungen an die zur Validierung benötigte Prototyping-Technologie.

### **Aktivitäten der AT-Checkliste in Phase 1:**

- Identifikation und Spezifikation von Produktanforderungen
- Ableitung, Konkretisierung und Priorisierung der Validierungsziele
- Testgegenstand beschreiben
- Testfall (initial) beschreiben und Anforderungen an Prototyp(en) ableiten

Entsprechend der Zielsetzung von *Phase 1* sollte mit der Analyse der Ausgangssituation begonnen und zunächst das Anforderungsprofil des Produktes auf Vollständigkeit geprüft und ggf. ergänzt werden. Eine Hilfestellung kann hier das Produktprofil-Schema nach Albers und Heimicke et al. (2018, S. 257) bieten, in dem es das Produktprofil übersichtlich abbildet (siehe Anhang A). Auf Basis der Produktanforderungen können dann die zu validierenden und zu verifizierenden Produkteigenschaften identifiziert, spezifiziert und in Validierungs- bzw. Verifizierungsziele überführt werden. Aus diesen lassen sich wiederum Anforderungen an den benötigten Prototypen ableiten. Da aufgrund begrenzter Ressourcen nicht zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess alles auf höchster Detailebene validiert werden kann, sollte zudem eine Priorisierung der Validierungsziele erfolgen (Albers et al., 2014).

Zur Ermittlung, Konkretisierung und Priorisierung von Validierungszielen, sowie zur Testfalldefinition stehen prinzipiell verschiedene Möglichkeiten und unterstützende Methoden zur Verfügung, welche sich jedoch in ihrer spezifischen Zielsetzung und ihrem Detaillierungsgrad unterscheiden. Bekannte Methoden, die in diesem Kontext häufig eingesetzt werden, sind beispielsweise das Kano-Modell, das House of Quality (HoQ), die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), die statistische Versuchsplanung (Design of Experiments (DoE)) oder die Kritikalitätsmatrix<sup>6</sup> nach ALBERS. Eine Unterstützung zur Entwicklung des initialen Zielsystems gibt Zimmermann (2023) in seiner Arbeit. An dieser Stelle sei zudem auf die Arbeit von Klingler (2016) hingewiesen, in der eine methodische Unterstützung speziell zur systematischen Priorisierung von Validierungsaktivitäten und Definition von Testfällen präsentiert wird. Die Entwicklung dieser Unterstützung begründet sich auf der Erkenntnis, dass viele existierende Ansätze „häufig aus einer spezifischen Problemstellung oder einem spezifischen Entwicklungsbereich heraus entstanden und auf diesen zugeschnitten“ (Klingler, 2016, S. 41) sind. Danach bedienen die untersuchten Ansätze zudem entweder nur die Frage „Was?“ (z.B. FMEA) oder „Wie?“ (z.B. DoE) getestet werden soll (ebd.). Als Lösung stellt Klingler (2016) einen ganzheitlichen Ansatz vor, bei dem zunächst die Kritikalität des zu testenden Systems ermittelt wird. Anschließend erfolgt die Konkretisierung der Tests anhand eines Test-Beschreibungsmodells. Einen weiteren methodischen Ansatz stellen Albers, Reinemann, Hirscher, Fahl und Heitger (2019, S. 5) vor, bei dem ein Schritt-für-Schritt Vorgehen zur Auswahl und Konkretisierung von lösungsoffenen Produktattributen in der Frühen Phase der SGE genutzt wird.

Entsprechend dieser Methodenvielfalt sollten Entwickler unter Berücksichtigung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses auf die für ihren Anwendungsfall geeigneten Methoden zurückgreifen. Als praktische Beispiele zur Durchführung von *Phase 1* der AT-Systematik dienen die Evaluationsstudien B, C und D (siehe Abschnitt 7.2). Dabei

---

<sup>6</sup> Vgl. Albers, Klingler und Wagner (2014).

wurden das House of Quality (HoQ) in Verbindung mit einer Matrix zur Unsicherheitsbewertung für die Priorisierung des Validierungsbedarfs genutzt.

Im Anschluss an die Testfallbeschreibung muss nun noch die Zuordnung einer geeigneten Prototypingtechnologie, sowie die darauffolgende Konkretisierung der Testdurchführung erfolgen. Dieser Schritt erfolgt in *Phase 2: Validierungsumgebung prüfen*. Während *Phase 2* primär auf die Eignungsprüfung von AT im spezifischen Anwendungsfall abzielt, ist sie auch von zentraler Bedeutung um AT mit anderen, potenziellen Prototypingtechnologien vergleichen zu können. Vergleichstechnologien können z.B. Virtual oder Augmented Reality (VR/AR), virtuelle Simulation, Rapid Prototyping oder das Spritzgießen mit konventionell gefertigten Spritzgussform-einsätzen sein. Der Vergleich und die systematische Auswahl geeigneter Prototypingtechnologien erfolgt in dieser Arbeit durch eine Adaption des Filter-Fidelity-Modells (FFM) von Kohler et al. (2013) (siehe Abschnitt 6.2.3 - Phase 2: Validierungsumgebung prüfen).

Abbildung 6.7 zeigt das generelle Vorgehen, welches innerhalb der AT-Systematik zur Ableitung von Testfällen und der Auswahl einer geeigneten Prototypingtechnologie vorgeschlagen wird. Darin erfolgt in *Phase 1* zunächst die Konkretisierung von Validierungszielen auf Basis des initialen Zielsystems. Anschließend werden die Validierungsziele, z.B. die Überprüfung von Anforderungen, Hypothesen und Zielwerten, in priorisierte Testgegenstände überführt. Der Testgegenstand stellt sozusagen das „Was?“ eines Tests dar, z.B. „Es soll geprüft werden, ob das Bauteil den im Anwendungsfall auftretenden Zugkräften standhält.“ Zur weiteren Testbeschreibung wird anschließend in *Phase 2* das „Wie?“ definiert. Dazu muss ein Testfall (oder mehrerer Testfälle) spezifiziert und ein geeigneter Prototyp gewählt werden, z.B. „Es sollen Zugversuche mit einem seriennahen Prototyp durchgeführt werden.“ In der Praxis ist die Testfallbeschreibung so detailliert wie möglich auszuführen, so dass sich daraus verschiedene Anforderungen an die Validierungsumgebung und potenzielle Prototypen ergeben. Darauf aufbauend kann eine geeignete Prototypingtechnologie in *Phase 2* ermittelt und die Testbeschreibung vervollständigt werden.

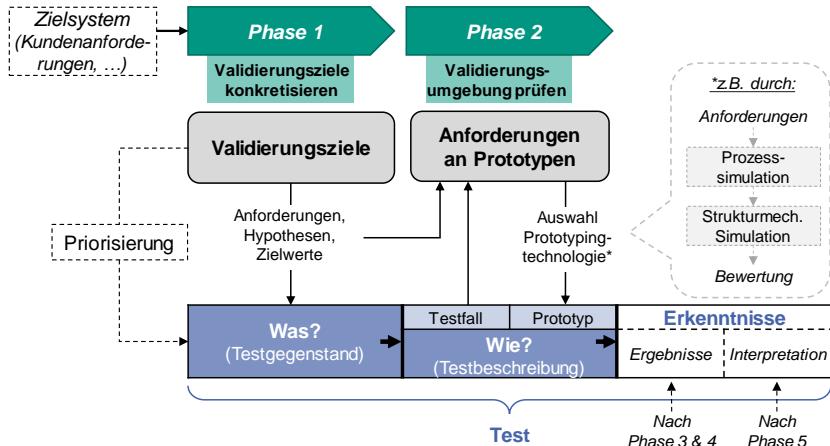


Abbildung 6.7: Prinzip zur Beschreibung von Testfällen im Kontext der AT-Systematik (in Anlehnung an Schrock, Junk & Albers, 2023)

Prinzipiell stellt *Phase 1* die Kopplung an den übergeordneten Produktentwicklungsprozess dar und könnte in Teilen bereits bei Initiierung der AT-Systematik vorliegen. Weiterhin dient *Phase 1* als Vorbereitung auf den AT-spezifischen Methodenteil, welcher den Kern dieser Forschungsarbeit bildet und der erst ab *Phase 2* beginnt.

### 6.2.3 Phase 2: Prüfung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung

In *Phase 2* wird geprüft, ob AT für die Validierungsaufgabe geeignet ist und ob es sich bei AT um die am besten geeignete Prototypingtechnologie handelt.

Hauptergebnis der Phase 2 ist die Entscheidung für oder gegen AT zur Bearbeitung der Validierungsaufgabe.

**Leitfrage:** „Wie“ soll validiert bzw. getestet werden und eignet sich AT als Methode zur Erzeugung des Prototyps für die Bearbeitung der Validierungsaufgabe?

Neben dieser Leitfrage lassen sich weitere, vertiefende Fragen formulieren, die für eine fundierte Entscheidung für oder gegen AT geklärt werden sollten:

- Lässt sich AT technisch für die Validierungsaufgabe nutzen? (siehe Abschnitt 6.2.3.1)
- Kann der Prototyp in einer angemessenen Zeit und zu angemessenen Kosten hergestellt werden? (siehe Abschnitt 6.2.3.2)
- Hat der Prototyp eine angemessene Wiedergabebreue und kann mit ihm das Validierungsziel erreicht werden? (siehe Abschnitt 6.2.3.3)

### **Aktivitäten der AT-Checkliste in Phase 2:**

- Material für den Prototyp festlegen
- Technische Machbarkeit initial prüfen und bewerten
  - z.B. Berechnung oder Prozesssimulation zur Prozessparameterermittlung
  - z.B. Strukturmechanische Simulation zur technischen Absicherung
- Wirtschaftlichkeit von AT prüfen und bewerten
- Vergleich zwischen Prototypanforderungen und erwarteter Wiedergabebreue mit verschiedenen Prototypingtechnologien durchführen und bewerten
- Entscheidung für oder gegen AT treffen (*Abbruch der AT-Systematik oder weiter zu Phase 3*)

Im Rahmen der Eignungsprüfung wird für jedes Validierungsziel geprüft, ob AT eine angemessene Erfüllung der Validierungsaufgabe ermöglicht und ob andere Technologien besser geeignet sind. Dazu sollten die in *Phase 1* definierten Anforderungen an den bzw. die Prototyp(en) mit den Möglichkeiten von AT, sowie verschiedenen anderen Prototypingtechnologien (z.B. VR/AR, Simulation, RP) verglichen werden. Bei der Wahl einer Prototypingtechnologie spielen insbesondere die technische Machbarkeit, die wirtschaftliche Zweckmäßigkeit und die Wiedergabebreue eine entscheidende Rolle (vgl. Abschnitt 2.1.4.2). Gegebenenfalls werden auch verschiedene Arten von Prototypen benötigt, die mit unterschiedlichen Prototypingtechnologien realisiert werden müssen. Im Zuge einer effizienten Validierung sollte ein Prototyp jedoch möglichst viele Testfälle adressieren. Da jede Technologie zur Herstellung von Prototypen spezifisches Wissen und Erfahrungen voraussetzt, sollten bei Bedarf entsprechende Experten in den Prozess eingebunden werden (Bildung eines Problemlösungsteams (PLT) im Sinne des SPALTEN-Prozesses).

Auch wenn der Aufbau der Validierungsumgebung im Layer „Validierungssystem“ erfolgt, werden zur Eignungsprüfung spezifische Kenntnisse aus den Layern „Produkt“ und „Produktionssystem“ benötigt. Dazu zählen insbesondere die Anforderungen an das Produkt (siehe *Phase 1*), seine geometrische Gestalt und das Material aus dem es gefertigt werden soll. Diese Punkte stehen zudem in enger Wechselwirkung mit den Eigenschaften des Produktionssystems. Von Interesse sind zum Bei-

spiel die Art der Fertigungsanlage und des Werkzeuges sowie die Fertigungsparameter. Der eigentliche Aufbau der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung, also unter anderem die finale Konstruktion der AT-Formeinsätze für das Prototyping, beginnt allerdings erst in *Phase 3*. Damit stehen in *Phase 2* noch nicht alle bzw. noch nicht die finalen Informationen zur exakten Beurteilung der Eignung von AT zur Verfügung. Eine höhere Sicherheit des Aussagegehalts der Eignungsprüfung ergibt sich entsprechend nur durch ein parallelisiertes, iteratives Vorgehen mit *Phase 3*. Durch neue Erkenntnisse oder Arbeitsstände in *Phase 3* (z.B. Änderung des Produktdesigns oder Materials) kann darüber hinaus eine erneute Eignungsprüfung erforderlich werden.

Im Folgenden wird die Eignungsprüfung von AT als Prototypingtechnologie anhand der *Prüfung der technischen Machbarkeit* (siehe Abschnitt 6.2.3.1), der *Prüfung der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit* (siehe Abschnitt 6.2.3.2), sowie der *initialen Bewertung der Wiedergabetreue und Vergleich zu anderen Prototypingtechnologien* (siehe Abschnitt 6.2.3.3) näher beschrieben.

### **6.2.3.1 Prüfung der technischen Machbarkeit**

Im Rahmen der technischen Machbarkeitsprüfung wird untersucht, ob sich das AT aus technischer Sicht für den Anwendungsfall eignet. Dabei wird unter anderem geklärt, ob sich die Produktgeometrie in einem AT-Formeinsatz abbilden lässt, ob der AT-Formeinsatz den Prozessbelastungen standhalten kann und ob der AT-Prototyp den technischen Anforderungen entsprechen kann.

Zur Überprüfung der technischen Machbarkeit wird in dieser Arbeit ein Vorgehen vorgeschlagen, das im *ersten Schritt* die Ermittlung relevanter Parameter bzw. deren Ausprägung (z.B. Werkzeug-Zuhaltkraft  $F_z = 200 \text{ kN}$ ) vorsieht. Im *zweiten Schritt* erfolgt dann die Überprüfung, ob der geplante AT-Formeinsatz diesen Anforderungen und Belastungen standhalten kann. Zur Durchführung beider Schritte sind prinzipiell verschiedene Ansätze möglich, die im Folgenden kurz erläutert werden. Dazu gehören die Eignungsabschätzung auf Basis von Referenzen, die überschlägige Berechnung und der Einsatz von Methoden der Simulation. Es sei darauf hingewiesen, dass der Fokus der folgenden Erläuterungen auf dem methodischen Vorgehen und nicht auf der detaillierten Darstellung aller technischen Zusammenhänge liegt. Einen Überblick über das zweistufige Vorgehen und die empfohlenen Ansätze sowie deren Kombinationsmöglichkeiten gibt Abbildung 6.8.

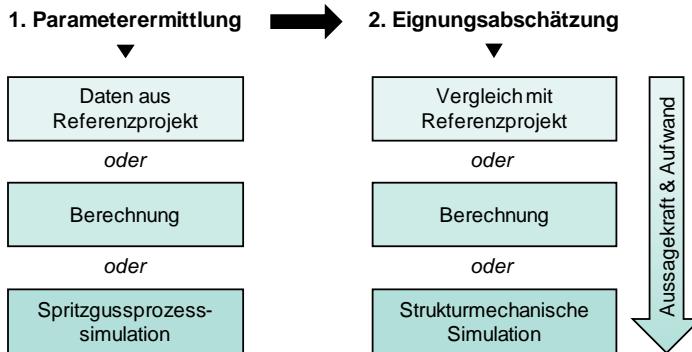


Abbildung 6.8: Möglichkeiten zur technischen Eignungsprüfung von AT hinsichtlich der mechanischen und thermischen Belastung bzw. Belastbarkeit in zwei Schritten

Die einfachste Form der Eignungsabschätzung ist der Vergleich mit geeigneten Referenzprojekten. Verglichen werden unter anderem geometrische Features, wie Radien, Entformschrägen und filigrane Elemente. Dabei wird davon ausgegangen, dass ähnliche Geometrien von Formteil und Formeinsatz unter ähnlichen Prozessbedingungen auch zu ähnlichen Ergebnissen hinsichtlich Standzeit und Formteilqualität führen. Bei den Methoden der Berechnung<sup>7</sup> und Simulation werden bereits Prozessschritte der Formteil- und Werkzeugentwicklung (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) vorausgesetzt, um konkrete Parameterwerte ermitteln zu können. Im Folgenden wird der Ansatz zur Parameterermittlung durch Berechnung und Prozesssimulation mit anschließender Eignungsabschätzung durch strukturmechanische Simulation näher erläutert.

Für die Durchführung der strukturmechanischen Simulation werden die CAD-Daten des Formeinsatzes, sowie die angreifenden Kräfte benötigt. Eingangsparameter für die strukturmechanische Simulation stellen hier die Werkzeugzuhaltkraft ( $F_Z$ ), der Werkzeuginnendruck und gegebenenfalls die Temperaturverteilung dar. Diese können entweder von Referenzprojekten, Überschlagsrechnungen oder einer Spritzgussprozesssimulation stammen. Die Berechnung der Werkzeugzuhaltkraft kann anhand der spezifischen Zuhaltkraft und der projizierten Fläche ermittelt werden:

$$F_Z \text{ (kN)} = \text{spez. Zuhaltkraft (kN/cm}^2\text{)} \times \text{proj. Fläche (cm}^2\text{)} \times \text{Anzahl Kavitäten} \quad 6.1$$

<sup>7</sup> Einen Ansatz zur Berechnung und Abschätzung der mechanischen Belastung additiv gefertigter Formeinsätze beschreibt bspw. Mitterlehner (2020, S. 56).

Richtwerte für die spezifische Zuhaltkraft und den Werkzeuginnendruck werden üblicherweise in Materialdatenblättern, Tabellenbüchern oder Fachliteratur gegeben. Dabei sollte beachtet werden, dass neben einer zu hohen Werkzeugzuhaltkraft auch eine zu niedrige Werkzeugzuhaltkraft zu Schäden am Werkzeug durch Überspritzen und Gratbildung führen kann<sup>8</sup> (Hopmann et al., 2018, S. 105).

Präziser als durch Berechnung können die Zuhaltkraft und der Werkzeuginnendruck mit einer Spritzgussprozesssimulation ermittelt werden. Diese ist in der industriellen Praxis oft essenzieller Bestandteil in vielen Entwicklungsprojekten und dient in erster Linie der Absicherung des fertigungsgerechten Formteildesigns und der Vorhersage der zu erwartenden Formteilqualität<sup>9</sup>. Sie stellt also prinzipiell eine eigenständige Validierungstechnologie dar, welche in das systematische Vorgehen des AT eingebunden wird. Für die Generierung von Prozessparametern anhand der Spritzgussprozesssimulation müssen das CAD-Modell des Formteils vorhanden und das Formteilmaterial bekannt sein. Üblicherweise werden diese Daten durch die Entwicklungsaktivitäten im iPeM-Layer „Produkt“ erzeugt. Stehen diese Daten nicht zur Verfügung, können sie durch ein iteratives Vorgehen mit Phase 3 (Aufbau der Validierungsumgebung) erzeugt werden.

Wie die im Stand der Forschung betrachteten Studien zeigen, sollte der mechanischen Belastung des Formeinsatzwerkstoffes unter hohen Temperaturen besondere Beachtung gewidmet werden, da hierin eine der wesentlichen Versagensquellen von AT-Formeinsätzen liegt (vgl. Abschnitt 2.3.4.2). Ein weiterer Ausgangsparameter der Prozesssimulation als Eingangsparameter für die strukturmechanische Simulation bildet daher die Temperaturverteilung. Um realitätsnahe Simulationsergebnisse zu erzeugen, sollte das Verhalten des Werkzeugwerkstoffes unter Temperatureinwirkung sowie die Lagersituation (z.B. Anschraubpunkte, Angussbuchse, Auswerfer usw.) berücksichtigt werden. Eine Bewertung bzw. Abschätzung, ob der Formeinsatz den Prozessbelastungen standhalten kann, wird anschließend durch die Analyse der Vergleichsspannung mit der Zugspannung des Formeinsatzwerkstoffes vorgenommen. Beispielsweise liegt für das AM-Material *Di-*

---

<sup>8</sup> In den praktischen Anwendungsstudien im Rahmen dieser Arbeit wurde regelmäßig beobachtet, dass Überspritzungen durch zu geringe Zuhaltkraft zu irreversiblen Abdrücken im Bereich der Werkzeugtrennebene und damit zu fortlaufender Gratbildung an den Formteilen führt.

<sup>9</sup> Je nach verwendeter Software stehen meist unterschiedliche Analysemöglichkeiten, wie bspw. die Ermittlung der Angussposition, die Füllbildanalyse, die Analyse der Wärmeverteilung bzw. -homogenität und die Verzugsanalyse zur Verfügung.

gital ABS die maximale Zugfestigkeit innerhalb der Schichtebene und im Temperaturbereich von 50 °C - 75 °C zwischen ca. 33 - 27 MPa, wobei die Zugfestigkeit mit zunehmender Temperatur abnimmt (Mendible et al., 2017, S. 346–347).

Eine Darstellung des beschriebenen Vorgehens zur Spritzgussprozesssimulation des Formteils mit anschließender strukturmechanischer Simulation des Formeinsatzes kann Abbildung 6.9 entnommen werden.

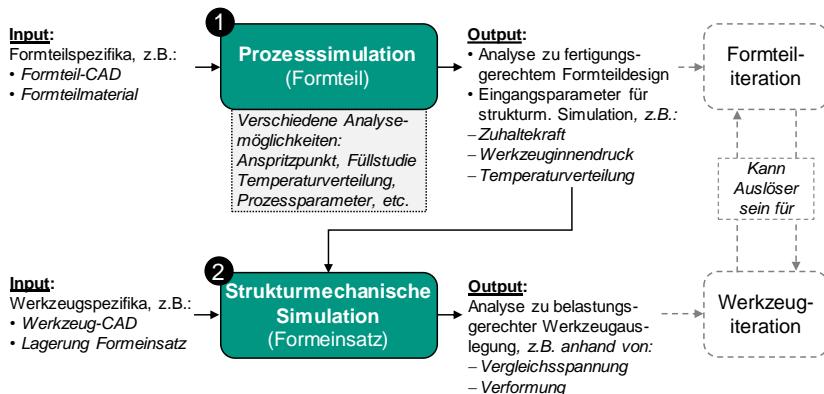


Abbildung 6.9: Schema zur Durchführung der strukturmechanischen Formeinsatzsimulation auf Basis der Spritzgussprozesssimulation

Für ein schnelles und effizientes Prototyping empfiehlt sich ein Kompromiss zwischen Nutzen und Aufwand für die Durchführung einer Werkzeugsimulation und einem „Trial-and-Error“ Ansatz zur Herstellung und Nutzung der AT-Formeinsätze. Übersteigt der Aufwand der Simulation den Aufwand für die (Neu-) Fertigung des AT-Formeinsatzes bei weitem, handelt es sich wahrscheinlich nicht um einen effizienten Prozess. Eine zu umfangreiche bzw. aufwändige Absicherung widerspricht auch dem Grundgedanken des „Rapid Prototyping“.

### 6.2.3.2 Prüfung der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit

Im Rahmen der Prüfung der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit des AT, werden die Aufwände verschiedener Prototypingtechnologien einander gegenübergestellt. Zu bevorzugen sind Technologien, die mit dem geringsten Aufwand die Erfüllung der Validierungsziele ermöglichen. Eine Gegenüberstellung der Wiedergabetreue und des hier ermittelten Aufwands zur Erzeugung der Prototypen erfolgt im nächsten Schritt (vgl. Abschnitt 6.2.3.3).

Die Kosten der additiven Fertigung von AT-Formteileinsätzen lassen sich in der Regel ohne großen Aufwand über die 3D-Druck-Software ermitteln. Diese gibt den zu erwartenden Materialverbrauch und die zu erwartende Druckzeit aus, auf deren Basis sich die Material- und Maschinenkosten berechnen lassen. Hinzu kommen die Kosten für das Pre- und Post-Processing, sowie die Kosten für weitere Bearbeitungsschritte wie das Entgraten, Aufbohren, Reiben oder Schleifen von Funktionsflächen. Neben den Fertigungskosten des Werkzeuges müssen auch die Kosten des Fertigungsprozesses des oder der Prototypen berücksichtigt werden. Eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit zwischen dem konventionellen und dem additiven Tooling in Bezug auf Beschaffungskosten und Lieferzeiten wurde anhand verschiedener Beispiele im Zuge der Markt- und Beschaffungsstudie vorgestellt (vgl. Abschnitt 5.1). Als ganzheitliche Berechnungsmodelle für den Kostenvergleich können beispielsweise die im Stand der Forschung vorgestellten Modelle von Tosello et al. (2019) und Kampker et al. (2020) herangezogen werden (vgl. Abschnitt 2.3.4.1). Die in Abschnitt 5.4 beschriebene Potenzialanalyse des AT kann zusätzlich als erste Beurteilungshilfe genutzt werden.

### **6.2.3.3 Initiale Bewertung der Wiedergabetreue und Vergleich gegenüber anderen Prototypingtechnologien**

Nachdem die technische Machbarkeit belegt (vgl. 6.2.3.1) und der Realisierungsaufwand als zweckmäßig eingestuft wurde (vgl. 6.2.3.2), erfolgt die Bewertung der Wiedergabetreue zwischen Prototyp und Produkt in zwei Schritten. In *Schritt 1* wird zunächst ein Abgleich zwischen den Prozessparametern aus dem Serienprozess und denen des AT-Prozesses vorgenommen, um etwaige Abweichungen und deren Einfluss zu beurteilen. Dabei handelt es sich jeweils um Eigenschaften und Parameter aus dem *geplanten* Prozess (SOLL-Prozess). In *Schritt 2* wird das Ergebnis dieser Beurteilung im Hinblick auf die testrelevanten Wiedergabedimensionen betrachtet und bewertet. Im Folgenden werden beide Schritte näher beschrieben.

**Schritt 1:** Zunächst werden relevante Eigenschaften und Parameter, sowie deren Ausprägungen aus dem geplanten Serien- und AT-Prozess ermittelt. Durch den Vergleich dieser beiden SOLL-Prozesse und die Analyse abweichender Ausprägungen wird eine Bewertung des Einflusses auf die Wiedergabetreue ermöglicht. Da diese Bewertung zu einem verhältnismäßig frühen Zeitpunkt stattfindet, bei dem durchaus auch Unsicherheiten hinsichtlich der Ausprägung bestimmter Eigenschaften und Parameter vorliegen können oder diese schlicht noch nicht ermittelbar sind, handelt es sich um eine *initiale Bewertung*, die primär der Eignungsprüfung und Entscheidungsfindung dient. Für die strukturierte Durchführung dieser Aktivität kann das in Abbildung 6.10 gezeigte Template genutzt werden, welches im folgenden Beispiel anhand der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (siehe Abschnitt 5.2) erläutert wird. Dabei werden die Abweichungen auf einer Skala von „1 = kein Einfluss“ bis

„3 = hoher Einfluss“ auf die Wiedergabetreue bewertet. Die tatsächlichen Ausprägungen der Parameter ergeben sich allerdings erst während der praktischen Durchführung in Phase 4 (IST-Prozess). Diese sollten in Phase 5 zur *finalen Testauswertung* im Zuge der Ergebnisinterpretation herangezogen werden. Bei der Abweichungsanalyse sollte zudem beachtet werden, dass Parameter in Beziehung bzw. Wechselwirkung zueinander stehen können. Für die Analyse und Bewertung dieser oft komplexen Zusammenhänge kann deshalb eine tiefergehende Untersuchung nötig werden. Als Hilfsmittel dafür wird in Abschnitt 6.3.2.2 die *AT-DSM* vor gestellt.

Beispiel:<sup>10</sup> Bei der Prüfung der technischen Machbarkeit zeigt sich, dass das für den Serienprozess vorgesehene Material ABS auch für das Prototyping mittels AT im PJM-Verfahren eingesetzt werden kann. Somit ergeben sich aus der Materialverwendung zunächst keine Einschränkungen hinsichtlich der Wiedergabetreue. Aus eigenen Erfahrungen und aus der Literatur ist bereits bekannt, dass sich die PJM-typische gerillte Oberflächenstruktur der AT-Formeinsätze auf dem Prototyp abbilden wird. Gegenüber dem polierten Formeinsatz aus Stahl ergibt sich somit eine Abweichung. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass sich die Zugeigenschaften der Proben deswegen verschlechtern, womit dieser Abweichung eine hohe Bedeutung im Hinblick auf die Wiedergabetreue zugeschrieben wird. Zudem wird eine benötigte Zuhaltkraft von 300 kN zur Herstellung der Proben berechnet. Die strukturmechanische Simulation des AT-Formeinsatzes deutet jedoch darauf hin, dass die Belastung unterhalb von 240 kN liegen sollte. Durch Reduktion des Einspritzdrucks kann auch die Zuhaltkraft verringert werden, sodass das AT dennoch eingesetzt werden kann. Dieser Abweichung wird zunächst eine mittlere Auswirkung auf die Zugeigenschaften zugesprochen. Aus der Prozesssimulation ergibt sich weiterhin, dass mit einer hohen Abweichung der Abkühlzeit zu rechnen ist. Wie aus bekannten Studien hervorgeht, führt dies mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Abweichungen in den Zugeigenschaften. Die ermittelten Ausprägungen und das Ergebnis der Abweichungsanalyse werden in Vorbereitung auf Schritt 2 dokumentiert (siehe Abbildung 6.10).

---

<sup>10</sup> Das Beispiel dient der Veranschaulichung des prinzipiellen Vorgehens zur Bewertung der Wiedergabetreue und erhebt nicht den Anspruch, die dazu herangezogenen technischen Eigenschaften und Prinzipien vollständig zu erläutern.

Eigenschaft / Prozess-parameter	Geplante Ausprägung im Serienprozess (SOLL)	Vermutete Ausprägung im AT-Prozess (SOLL)	Tatsächliche Ausprägung im AT-Prozess (IST)	Analyse der Abweichung und deren Einfluss auf die Wiedergabebetreue	
Material	ABS	ABS	ABS	1	1
Oberflächen-güte	poliert	PolyJet-typische Rillenstruktur	PolyJet-typische Rillenstruktur	3	1
Zuhaltkraft	300 kN	240 kN	270 kN	2	2
Restkühlzeit	10 sec.	180 sec.	180-220 sec.	3	3
...	...	...	...	...	...

In Phase 2	1 = kein Einfluss
In Phase 4	2 = geringer bis mittlerer Einfluss
In Phase 5	3 = hoher Einfluss

Initiale Bewertung zur Entscheidungsfindung
Finale Bewertung zur Ergebnisauswertung

Abbildung 6.10: Template für die Abweichungsanalyse zwischen Serien- und Prototypingprozess mit beispielhafter Parameterbeschreibung<sup>11</sup>

**Schritt 2:** Es werden zunächst die testrelevanten Wiedergabedimensionen des Prototypen (wie bspw. Farbe, Material, innere Struktur, mechanische oder thermische Belastbarkeit usw.) ermittelt. Auf Basis der in Schritt 1 durchgeföhrten Abweichungs- und Einflussanalyse erfolgt anschließend eine Bewertung sämtlicher definierter Wiedergabedimensionen. Als Hilfsmittel dazu wird eine Adaption des Filter-Fidelity-Modells von Kohler et al. (2013) eingeföhrert. Darin werden die testrelevanten Wiedergabedimensionen, sowie der für den Prototyp ermittelte Realisierungsaufwand auf einer Skala von „0 = nicht ausgeprägt bzw. gering“ bis „5 = voll ausgeprägt bzw. hoch“ erfasst. Werden Filter-Fidelity-Profile unterschiedlicher Prototypingtechnologien angelegt, kann ein Vergleich in den relevanten Dimensionen erfolgen. Auf dieser Basis lassen sich testfallspezifisch geeignete Prototypen zuweisen. In Abbildung 6.11 wird ein Beispiel des angepassten Filter-Fidelity-Modells gegeben.

<sup>11</sup> Das Template wurde im Anschluss an die Evaluationsstudien (siehe Kapitel 7) als Teil der Umsetzung von Verbesserungspotentialen erstellt.

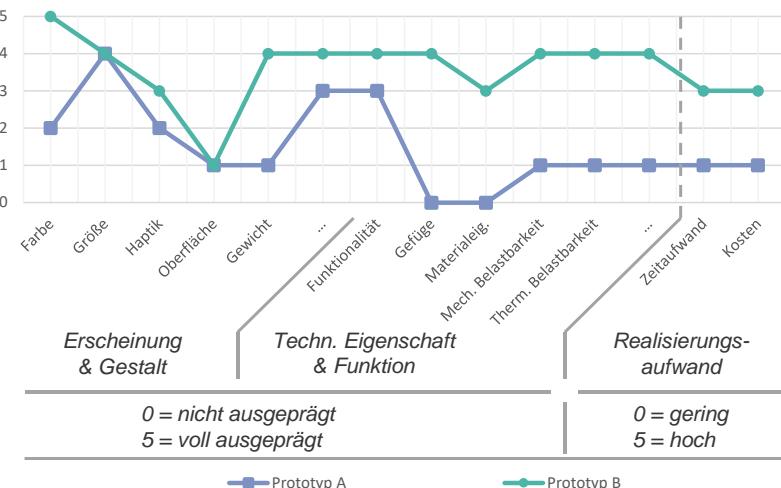


Abbildung 6.11: Beispielhafte Ausprägung zweier Filter-Fidelity-Profile in einem Filter-Fidelity-Modell<sup>12</sup> unter möglichen Filterdimensionen

Beispiel: Sollen lediglich die *Größe*, *Haptik* und *Oberflächenbeschaffenheit* getestet werden, stellt, mit Hinblick auf den *Realisierungsaufwand*, Prototyp A die wahrscheinlich sinnvollere Wahl dar. Sobald aber auch *technische Eigenschaften* oder die *Funktion* getestet werden soll, bietet Prototyp A keine ausreichende Wiedergabe mehr, sodass Prototyp B gewählt werden sollte.

## 6.2.4 Phase 3: Aufbau der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung

Wie aus dem Stand der Forschung und auch aus der Vorstudie (vgl. Abschnitt 5.2) ersichtlich wird, müssen zur Realisierung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung diverse technische und konstruktive Besonderheiten berücksichtigt werden. Phase 3 der AT-Systematik beschäftigt sich daher explizit mit der Durchführung von Aktivitäten zur Entwicklung und Realisierung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung.

<sup>12</sup> In Anlehnung an Kohler, Hochreuter, Diefenbach, Lenz und Hassenzahl (2013).

Hauptergebnis der Phase 3 ist die einsatzbereite Validierungsumgebung mit AT-Anwendung. Dazu zählen im Wesentlichen die AT-Formeinsätze und die Stammform, in der die Formeinsätze eingesetzt werden. Darüber hinaus gehören sämtliche, zur Erfüllung der Validierungsaufgabe erforderlichen Ressourcen dazu.

### Aktivitäten der AT-Checkliste in Phase 3:

- AT-Formeinsätze & formgebende Teile konstruieren
- Nutzbarkeit absichern (z.B. durch Simulation, siehe *Phase 2*)
- Pre-Processing und Fertigungsvorbereitung
- Additive Fertigung der Formeinsätze und Fertigung sonstiger Teile
- Post-Processing und Nacharbeit der AT-Formeinsätze
- Montage des Werkzeugs und der AT-Formeinsätze

In den meisten Entwicklungssituationen dürften zu diesem Zeitpunkt des PEP bereits CAD-Daten des Formteils vorliegen (falls nicht, müssen diese nun erstellt werden). Hieraus erfolgt die Ableitung eines CAD-Modells des Formeinsatzes, die Ergänzung der notwendigen technischen Funktionen und schließlich die Detaillierung bis zur Fertigungsreife. In Phase 2 kann bereits ein CAD-Modell des Werkzeugs zur Eignungsprüfung von AT erzeugt werden sein (z.B. für die strukturmechanische Simulation). Im Sinne einer schnellen und effizienten Eignungsprüfung handelt es sich dabei jedoch eher um eine „Grobkonstruktion“, welche noch nicht den Detaillierungsgrad aufweist, wie er in Phase 3 erarbeitet wird. Die Detaillkonstruktion baut auf der Grobkonstruktion auf, wodurch sich beide in der Praxis kaum phasenscharf voneinander trennen lassen. Deshalb sollte hier ein iteratives Vorgehen zwischen den Phasen 2 und 3 stattfinden. Prinzipiell werden zwei unterschiedliche CAD-Datensätze des Formeinsatzes benötigt. Ein Datensatz enthält die Soll-Maße des Formeinsatzes. Aus diesem Datensatz werden die technischen Zeichnungen zur Nacharbeit abgeleitet. In einigen Fällen kann der Datensatz auch direkt an die mechanische Nachbearbeitung übergeben werden, wenn die Nachbearbeitung auf NC-Maschinen erfolgt (z. B. in einem Austauschformat wie STEP). Der zweite Datensatz bildet das 3D-Modell für die additive Fertigung. In diesem sind Bearbeitungsaufmaße für Funktionsflächen (z.B. für Auswerferbohrungen) enthalten. Neben konventionellen Konstruktionsrichtlinien müssen auch die AT-spezifischen Besonderheiten beachtet werden. Dazu gehören zum Beispiel die technischen Eigenschaften des AM-Werkstoffs und die damit verbundenen Restriktionen bei der Konstruktion und Verwendung von AT-Werkzeugen. Auf Seiten des Spritzgießprozesses sind unter anderem die Schließkraft, der Werkzeuginnendruck, sowie die thermische Belastung der AT-Werkzeuge zu berücksichtigen (vgl. Phase 2). Eine detaillierte Ausführung von Konstruktionsrichtlinien wurde in der co-betreuten Masterarbeit von

Schmieder (2022)<sup>13</sup> in Form eines AT-Konstruktionskataloges angefertigt, welcher zur Unterstützung von Phase 3 empfohlen wird (siehe Abschnitt 6.3.2.3). Ein weiteres Hilfsmittel stellt die AT-DSM dar, welche Beziehungen und Wechselwirkungen verschiedener technischer Größen abbildet (siehe Abschnitt 6.3.2.2).

### **6.2.5 Phase 4: Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung**

In Phase 4 folgt schließlich die Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung, also der Einsatz der AT-Formeinsätze auf einer Spritzgussmaschine zur Herstellung der Prototypen mit anschließender Durchführung der Tests.

Hauptergebnis von Phase 4 ist der Erhalt von AT-Prototypen und Ergebnissen zu den definierten Tests.

#### **Aktivitäten der AT-Checkliste in Phase 4:**

- Zu verarbeitendes Material vorbereiten (z.B. trocknen, Master-Batch hinzufügen)
- Maschine und Werkzeug rüsten
- Abmusterungsprozess durchführen
- Prototypen produzieren & Fertigungsqualität beurteilen
- Test(s) durchführen und Ergebnisse dokumentieren

Der Einsatz der Validierungsumgebung beginnt in der Regel mit dem Spritzgießen der Prototypen. Dazu wird zunächst das zu verarbeitende Material vorbereitet. Anschließend oder parallel dazu wird das Werkzeug und die AT-Formeinsätze auf der Spritzgussmaschine gerüstet. Vor der Produktion der zu testenden Prototypenserie erfolgt das Einrichten und Einstellen der Spritzgussmaschine, was in Verbindung mit einem Abmusterungsprozess durchgeführt werden sollte (vgl. Abschnitt 2.2.2.2). Dieser stellt die Qualität des Fertigungsprozesses und der Prototypen sicher.

Im Gegensatz zum „konventionellen“ Abmusterungsprozess sollte beim AT ein angepasstes Vorgehen gewählt werden (vgl. Abschnitt 2.3.4.2, Punkt e). Bereits aus den Phasen 2 und 3 sollten einige grundlegende Maschinenparameter bekannt sein (z.B. die erforderliche bzw. maximale Zuhaltkraft). Da diese Parameter nicht mehr experimentell ermittelt werden müssen, kann der Abmusterungsprozess möglichst kurz gehalten werden. Dennoch muss die Feineinstellung der Parameter immer an der Maschine erfolgen. Dabei muss darauf geachtet werden, den AT-Formeinsatz

---

<sup>13</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

nicht zu beschädigen oder zu zerstören. Während der technischen Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (vgl. Abschnitt 5.2) hat es sich bewährt, mit einem geringen Füllvolumen und einer geringen Schließkraft zu beginnen und diese schrittweise zu erhöhen. Auch die Temperatur der AT-Formeinsätze sollte möglichst konstant niedrig gehalten werden (z.B. Kühlung mit Druckluft). Eine Beschreibung des empfohlenen Abmusterungsprozesses wird im AT-Konstruktionskatalog gegeben. Für eine Übersicht zu relevanten Prozessparametern und deren Wirkbeziehungen kann die AT-DSM herangezogen werden. Sobald eine ausreichende Qualität der Formteile erreicht ist, werden die zu testenden Prototypen produziert. Anschließend werden die definierten Tests entsprechend der Testszenarien durchgeführt und dokumentiert.

### **6.2.6 Phase 5: Auswertung und Interpretation der Ergebnisse**

In Phase 5 werden die Testergebnisse ausgewertet und interpretiert. Grundlegende Überlegungen zur Übertragbarkeit der Testergebnisse werden zwar bereits in Phase 2, während der Auswahl einer geeigneten Prototypingtechnologie, angestellt, allerdings liegt das tatsächliche Resultat des Prototypingprozesses erst nach Phase 4 vor. Somit sind auch erst zu diesem Zeitpunkt die tatsächlich genutzten Prozessparameter, die Qualität der Prototypen und der genaue Verlauf der Tests bekannt. Es empfiehlt sich daher eine erneute Prüfung der Übertragbarkeit der Testergebnisse.

**Leitfrage:** Lassen sich die Ergebnisse aus dem Prototypingprozess (IST-Prozess) auf den Spritzguss-Serienprozess (SOLL-Prozess) übertragen?

Hauptergebnis der Phase 5 sind hinsichtlich Validität und Aussagekraft bewertete Testergebnisse.

#### **Aktivitäten der AT-Checkliste in Phase 5:**

- Parametervergleich von Prototypingprozess (IST) zu Serienprozess (SOLL)
- Analyse, Interpretation und Bewertung von Abweichungen
- Analyse, Interpretation und Bewertung der Testergebnisse
- Prüfen, ob Validierungsziele erreicht wurden

Um die Aussagekraft der Prototypen zu bewerten bzw. die Übertragbarkeit der Testergebnisse auf das zu entwickelnde Produkt zu ermöglichen, werden etwaige Abweichungen zwischen Prototypingprozess (IST) und Serienprozess (SOLL) erfasst und die daraus folgenden Einschränkungen analysiert. An dieser Stelle empfiehlt die AT-Systematik daher die Vervollständigung des Bewertungsschemas aus

Phase 2 (siehe Abschnitt 6.2.3.3, Abbildung 6.10). Neben den Abweichungen zwischen den Prozessen sind auch die Testergebnisse zu analysieren und zu interpretieren. Es soll bewertet werden, ob die Testergebnisse von ausreichender Qualität sind und ob die Validierungsziele erreicht wurden. Wird festgestellt, dass die Testergebnisse nicht übertragbar sind, müssen, je nach Art des Mangels, der Prototyp oder der Test überarbeitet oder ggf. eine andere Prototypingtechnologie gewählt werden.

Beispiel: Mit einem Prototyp sollen Einbauversuche durchgeführt werden, weshalb der Formteilgeometrie und den Formteiltoleranzen eine hohe Bedeutung zukommen. Während Phase 2 wurden bereits Parameter von geplantem Serienprozess (SOLL) und geplantem AT-Prozess (SOLL) miteinander verglichen. Als Datengrundlage dienten die Erkenntnisse aus früheren Validierungsaktivitäten mit AT-Prototypen, bei denen eine ausreichende Formteilgenauigkeit erzielt wurde. Anhand der Bewertung wurde entschieden, dass der AT-Prototyp sich für die Durchführung der geplanten Testreihe eignet und es wurden AT-Prototypen gefertigt. Nach deren Herstellung fällt auf, dass die Prototypen einen hohen Verzug aufweisen. Als Ursache wird die Lage der Auswerfer in Verbindung mit der hohen Entformungskraft gesehen, welche sich durch die Formteilgeometrie und die Oberflächenbeschaffenheit der AT-Formeinsätze ergibt. Durch den Formteilverzug wird für die Einbauversuche eine erhöhte Kraft benötigt. Die Testergebnisse werden daher als nicht valide bewertet. Das Validierungsziel wurde somit nicht erreicht. Als weiteres mögliches Vorgehen bietet sich eine Überarbeitung des AT-Formeinsatzes (z.B. Vergrößerung der Formschräge, Erhöhung der Anzahl an Auswerfen) und eine Wiederholung des Tests an.

Wie mit den Ausführungen zum Stand der Forschung gezeigt wurde, stehen allerdings nicht nur eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren in Wechselwirkung miteinander, sondern diese bilden nach wie vor den Gegenstand fortlaufender, bislang nicht abgeschlossener Untersuchungen. Die AT-Systematik sieht daher als weiteres Hilfsmittel den Einsatz der AT-DSM vor, welche die Beziehungen und Wechselwirkungen der im Stand der Forschung beschriebenen Parameter enthält (siehe Abschnitt 6.3.2.2).

## 6.2.7 Phase 6: Nachbereiten und Lernen

In Phase 6 wird der Prototypingprozess reflektiert und das Wissen wird aufbereitet und für Folgeprojekte zur Verfügung gestellt. Zudem werden mögliche Verbesserungspotenziale identifiziert und umgesetzt.

Hauptergebnis der Phase 6 ist die abgeschlossene Dokumentation des Prototyping- und Validierungsprozesses.

### **Aktivitäten der AT-Checkliste in Phase 6:**

- Ergebnisse und Prototypingprozess final dokumentieren
- Gegebenenfalls AT-Systematik und Hilfsmittel anpassen und optimieren

Phase 6 der AT-Systematik dient der Aufbereitung und Reflexion der im Prototypingprozess erzielten Erkenntnisse. Während der Anwendung der AT-Systematik sollte bereits eine kontinuierliche Dokumentation aller Aktivitäten und der damit verbundenen Prozesse erfolgt sein. Entsprechend dem Vorgehen nach dem SPALTEN-Prozess werden in dieser Phase durch gezieltes Nachbereiten und Lernen die Erfahrungen und das erhaltene Wissen reflektiert und nutzbar gemacht. Dem Ziel eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses folgend, soll das mit dieser Arbeit beschriebene Vorgehensmodell zur Nutzung des AT in der Produktentwicklung durch den Anwender selbst verbessert werden. Neben dem Prozess sollen auch die genutzten Methoden und Hilfsmittel stetig weiterentwickelt und verbessert werden. Im Vordergrund stehen dabei insbesondere die Pflege, also die Anpassung und Erweiterung, der AT-Checkliste, des AT-Konstruktionskataloges und der AT-DSM.

## **6.3 Support innerhalb der AT-Systematik**

Innerhalb der AT-Systematik werden verschiedene Methoden und Hilfsmittel zur phasenübergreifenden oder phasen- bzw. aufgabenspezifischen Unterstützung zur Verfügung gestellt. Diese wurden in Abschnitt 6.2 bereits im Phasenmodell der AT-Systematik verortet (vgl. Abbildung 6.4, S. 137). Im Folgenden werden die Methoden und Hilfsmittel kurz benannt und anschließend näher vorgestellt.

Durch die *AT-Checkliste* wird das Vorgehensmodell der AT-Systematik operationalisiert und in ausführbare Aufgaben und Tätigkeiten heruntergebrochen (siehe Abschnitt 6.3.1). Mit der *AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM)* und dem *AT-Konstruktionskatalog* wird notwendiges, insbesondere AT-spezifisches Wissen für die Realisierung und Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung bereitgestellt (siehe Abschnitt 6.3.2.2). Im Rahmen der Evaluationsstudien wurden eine Reihe von weiteren Methoden ausgewählt und als Unterstützung für die Validierung von Produkten eingesetzt. Dazu zählen das *House-of-Quality (HoQ)* zum Anforderungsmanagement und der Validierungszielermittlung, die Adaption des *Filter-Fidelity-Modells (FFM)* nach Kohler et al. (2013) zur Prototypenauswahl (vgl. Abschnitt 6.2.3.3), sowie die *Spritzgussprozesssimulation* und die

*strukturmechanische Simulation* (vgl. Abschnitt 6.2.3.1). Beispiele zur praktischen Anwendung werden im Rahmen der Fallstudien in Kapitel 7 gegeben.

Es ist jedoch zu betonen, dass die Auswahl dieser Methoden nicht als exklusive Empfehlung zu verstehen ist, sondern vielmehr aufzeigen soll, wie die entsprechenden Phasen und Aufgaben innerhalb der AT-Systematik methodisch unterstützt werden können. Weitere Methoden und Hilfsmittel können je nach Bedarf und Kontext eingesetzt werden, um die Validierung von Produkten innerhalb der AT-Systematik weiter zu verbessern und zu optimieren. In den kommenden Abschnitten folgt eine Beschreibung der selbst generierten Hilfsmittel.

### 6.3.1 AT-Checkliste

Das systematische Vorgehensmodell der AT-Systematik wird dem Anwender zur operativen Nutzung in Form der AT-Checkliste zur Verfügung gestellt. Da die Nutzung von AT zu Validierungszwecken in einem schnellen, iterativen und agilen Prozess geschehen soll, wird die AT-Checkliste in ein Kanban-Board<sup>14</sup> überführt, wie es beispielsweise für das agile Projektmanagement nach Scrum<sup>15</sup> genutzt wird (siehe Abbildung 6.12).

Das Board der AT-Checkliste bildet die sechs Phasen der AT-Systematik als separate Swimlanes ab (horizontale Gliederung). Zu Beginn jeder Swimlane befindet sich eine Phasenbeschreibung, welche um zusätzliche Informationen, Arbeitsanweisungen und Anhänge (wie Hilfsmittel, Templates etc.) ergänzt wird. Anschließend folgen die Reiter „Backlog“, „To-do“, „Doing“, „Review“ und „Done“ (vertikale Gliederung). Das Backlog enthält phasenweise die in Abschnitt 6.2 beschriebenen Referenz-Aktivitäten und Aufgaben. Die Referenz-Aktivitäten aus dem Backlog sollen vom Anwender situationsspezifisch ausgewählt und gegebenenfalls angepasst oder ergänzt werden. Anschließend werden die Aufgaben einem oder mehreren Verantwortlichen zugewiesen und von „To-do“ nach „Done“ abgearbeitet. Dem iterativen und agilen Charakter der AT-Systematik entsprechend, lassen sich die Aufgaben auch wieder in einen vorherigen Aufgabestatus zurückversetzen oder gar ändern, sowie um neue Aufgaben ergänzen.

---

<sup>14</sup> Der Begriff *Kanban* stammt aus dem Japanischen und bedeutet „Karte“.

<sup>15</sup> Scrum ist eine Methode für das agile Projektmanagement, die ursprünglich aus der Softwareentwicklung stammt. Vgl. Schwaber und Sutherland (2020).

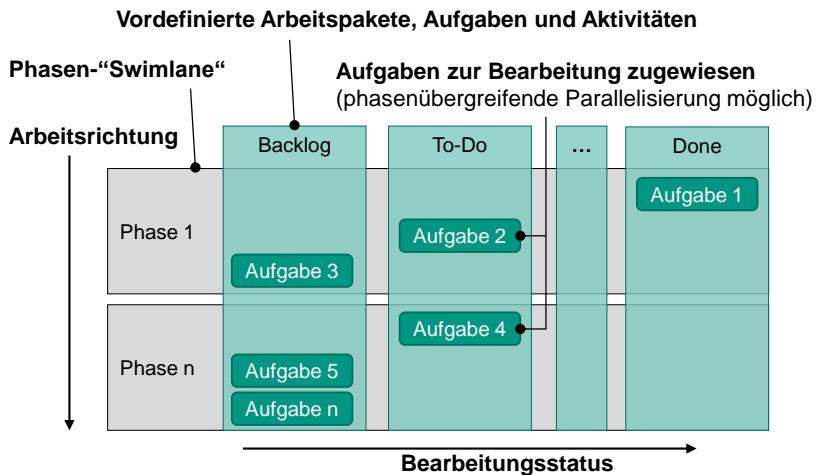


Abbildung 6.12: Schematischer Aufbau der AT-Checkliste als Kanban-Board

Die praktische Umsetzung der AT-Checkliste erfolgte im Online-Kollaborations-Tool Trello<sup>16</sup> (eine rein tabellarische Form der AT-Checkliste ist in Anhang F1 enthalten). Damit soll eine zeitgemäße Darstellung realisiert, Arbeits- und Komfortfunktionen integriert und der Zugang zur AT-Systematik und den in ihr enthaltenen Arbeitspaketen erleichtert werden. Über einen Zugangsslink oder per Mail können Mitglieder auf das Board eingeladen werden. Die Arbeitspakete oder Aufgaben sind in Form von Kärtchen dargestellt, welche per Drag-and-Drop zwischen den Arbeitsbereichen verschoben werden können (siehe Abbildung 6.13). Jedes Kärtchen enthält eine genauere Aufgabenbeschreibung und weitere Informationen und kann mit einem Anhang (z.B. Templates für das HoQ, FFM usw.) versehen werden. Überdies können Aufgaben terminiert, einem oder mehreren Verantwortlichen zugewiesen und der Fortschritt verfolgt werden. Somit kann über die AT-Checkliste simultan die Aufgabe des Projektmanagements erfüllt werden. Zudem sollte, entsprechend *Phase 6 - Nachbereiten und Lernen*, die AT-Systematik stetig verbessert und entsprechend der eigenen Bedürfnisse optimiert werden. Das in dieser Arbeit vordefinierte Trello-Board „AT-Checkliste“ lässt sich hinsichtlich der Gestaltung, des Aufbaus und der Struktur leicht anpassen und um eigene Aufgaben, Vorlagen usw. erweitern.

<sup>16</sup> [www.trello.com](http://www.trello.com)

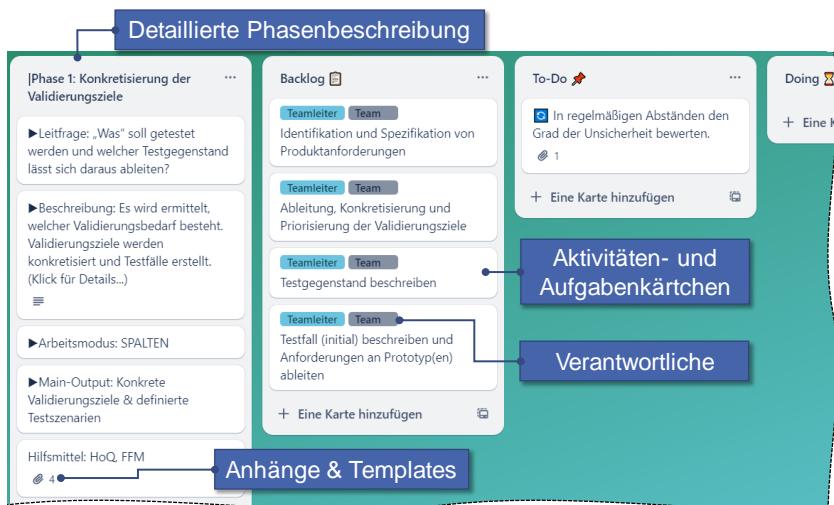


Abbildung 6.13: Ausschnitt aus der Umsetzung der AT-Checkliste im Online-Tool „Trello“, wie sie in den Evaluationsstudien eingesetzt wurde

### 6.3.2 Konstruktions- und Anwendungsunterstützung

Um notwendiges Wissen für die Realisierung und Anwendung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung zur Verfügung zu stellen, wurden eine *AT-Design-StructureMatrix (AT-DSM)* und ein *AT-Konstruktionskatalog* entwickelt. Beide Hilfsmittel wurden auf Basis einer systematischen Literaturrecherche erstellt und um Erkenntnisse aus eigenen Versuchen und co-betreuter Abschlussarbeiten ergänzt. Die AT-DSM dient der Beschreibung und Modellierung von Wirkbeziehungen, wohingegen der AT-Konstruktionskatalog eine anwendergerechte Zusammenfassung von Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien darstellt. Diese beiden Hilfsmittel stellen die primären, innerhalb der AT-Systematik zur Verfügung gestellten, Wissensquellen dar.

Die operative Umsetzung der systematischen Literaturrecherche, die Erstellung des Konstruktionsleitfadens sowie die initiale Befüllung der AT-DSM wurden im Rahmen der studentischen Abschlussarbeiten von Schmieder (2022)<sup>17</sup> und Proksch (2020a)<sup>18</sup> durchgeführt, die vom Autor dieser Arbeit co-betreut wurden. Das Prinzip

<sup>17</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>18</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

zur Modellierung der AT-DSM wurde bereits in Schrock et al. (2021) veröffentlicht. Ein Auszug essenzieller Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien wurde in Junk, Schrock und Schmieder (2024) publiziert.

### 6.3.2.1 Aufbau der Literaturdatenbank

Im Zuge der systematischen Literaturrecherche wurden zunächst Quellen identifiziert, welche sich mit der Auslegung (Planung, Konstruktion, Simulation usw.), sowie Anwendung (Prozessparameter, Fehlerbilder usw.) von AT-Formeinsätzen aus Photopolymeren befassen. Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in einem Citavi<sup>19</sup>-Projekt erfasst und ausgewertet (Vorgehen und Suchstrings können Anhang F2 entnommen werden). Im Zuge der Literaturrecherche identifizierte Schmieder (2022)<sup>20</sup> zunächst 3068 Quellen, welche über verschiedene Filter auf 82 relevante Quellen aus den Jahren 1997 bis 2021 eingegrenzt wurden. Diese 82 Quellen befassen sich überwiegend mit den AM-Verfahren SLA, PJM (bzw. MJM) und DLP. Während der Quellenanalyse wurden 355 Wissenselemente in der Citavi-Datenbank mit Informationen zu Richtlinien, Parametern und Fehlerbildern abgelegt, wodurch sukzessive eine Literatur- und Wissensdatenbank aufgebaut wurde.

Die Wissenselemente enthalten jeweils eine kurze Zusammenfassung des Kerninhaltes aus dem markierten Quellentext und wurden nach der in der AT-DSM genutzten Bezeichnung verschlagwortet oder entsprechend der Struktur des AT-Konstruktionskataloges kategorisiert. Der Aufbau des Citavi-Projektes und Beispiele für Wissenselemente werden in Anhang F2 aufgezeigt.

Nach Analyse der Elemente wurden diese für die Erstellung der AT-DSM (siehe Abschnitt 6.3.2.2) und des AT-Konstruktionsleitfadens (siehe Abschnitt 6.3.2.3) genutzt. In beiden Hilfsmitteln wird auf die entsprechenden Wissenselemente und deren Quellen in der Citavi-Datenbank referenziert, sodass Kontext und Forschungsvorgehen zu den beschriebenen Zusammenhängen und den abgeleiteten Richtlinien transparent nachvollzogen werden können (siehe Abbildung 6.14). Auf diese Weise wird der Nutzer in die Lage versetzt, sich selbstständig ein tieferes Verständnis anzueignen.

---

<sup>19</sup> Citavi ist eine Software zur Literaturverwaltung und Wissensorganisation.

<sup>20</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

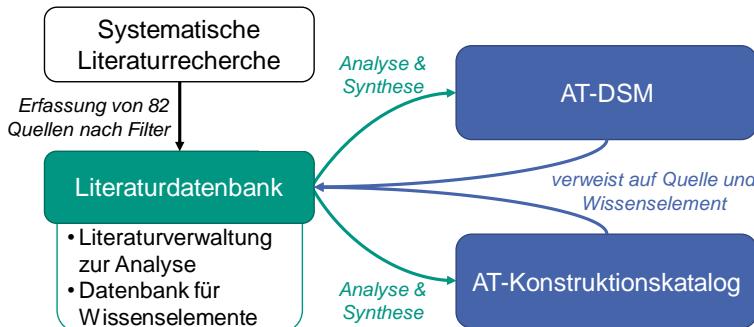


Abbildung 6.14: Vorgehen zur Entwicklung der AT-DSM und des AT-Konstruktionskatalogs

### 6.3.2.2 Beschreibung und Modellierung von Parametern und Wirkbeziehungen mittels „AT-DSM“

Wie mit den Ausführungen zum Stand der Forschung und den durchgeführten Vorstudien dargelegt wurde, handelt es sich bei der Summe aller Beziehungen zwischen Spritzgussprodukt, Spritzgussprozess und Werkzeugfertigung, sowie insbesondere der darin wirkenden Parameter um ein hochgradig vernetztes und komplexes System. Um dieses System in eine analysierbare und kommunizierbare Struktur zu bringen, wurde eine *AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM)* erstellt. Im Rahmen dieser AT-DSM wird primär das Wissen um die Zusammenhänge und Wirkungsbeziehungen zwischen den technischen Parametern des AT modelliert.

Beispiel: Als einleitendes Beispiel und als Motivation für die Erstellung der AT-DSM wird nochmals auf das Beispiel des Zugprobenwerkzeugs aus Abschnitt 5.2 zurückgegriffen. Während des Abmusterungsprozesses wurden Einfallstellen am Formteil „Zugprobe“ erkannt. Um dieses Fehlerbild zu beheben, wurde der Nachdruck erhöht, was eine höhere mechanische Belastung des AT-Formeinsatzes zur Folge hatte. Zeitgleich musste als Reaktion auf den erhöhten Nachdruck auch die Werkzeugschließkraft erhöht werden. Zwar wurden die Einfallstellen so reduziert, jedoch kam es nun zu Lufteinschlüssen im Formteil, da die „weichen“ AT-Formeinsätze vollständig abdichteten und keine Entlüftung mehr möglich war. Die Erhöhung beider Parameter führte schließlich, in Kombination mit der thermischen Belastung, zum Versagen des Formeinsatzes (siehe Abbildung 6.15).

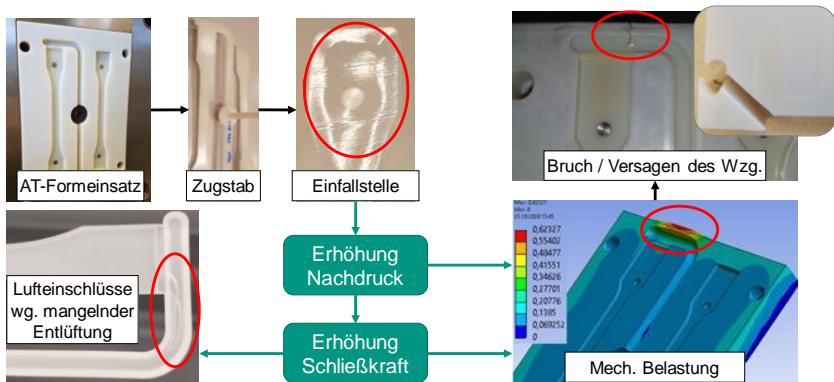


Abbildung 6.15: Beispielhafte Wirkbeziehungen beim Spritzgießen mit AT-Formeinsätzen der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (siehe Abschnitt 5.2)

Neben den genannten Parametern bestehen zahlreiche weitere, in Wechselwirkung stehende Parameter aus den Bereichen des AT und des Spritzgießens, welche bei der Anwendung des AT beachtet werden müssen. Abbildung 6.16 zeigt die Vorgehensweise, bestehend aus Parameteridentifikation und Modellierung der AT-DSM, die dabei beleuchteten Teilbereiche innerhalb der Modellierungsebene, sowie die auf Anwendungsebene unterstützten (Teil-) Aktivitäten des AT. Im Folgenden wird die AT-DSM aus Perspektive der Modellierungsebene und anschließend aus Perspektive der Anwendungsebene näher erläutert.

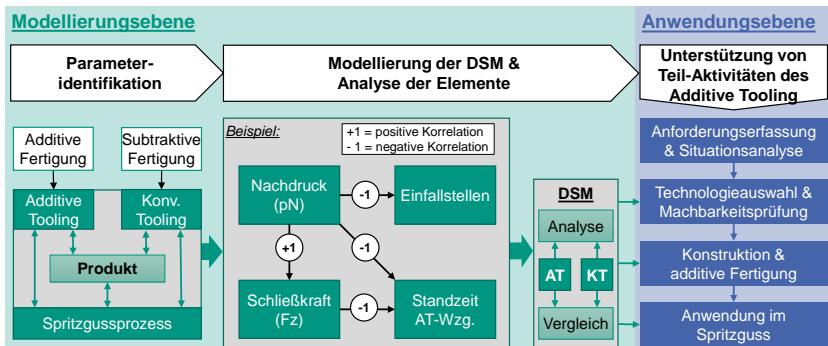


Abbildung 6.16: Modell zur systematischen Erfassung von Einflussfaktoren per DSM zur Unterstützung verschiedener Teil-Aktivitäten des AT (Schrock et al., 2021)

### Modellierungsebene

Auf Modellierungsebene wurde zunächst eine Identifikation relevanter Elemente aus den Bereichen Spritzgussprodukt, Spritzgussprozess und Werkzeugfertigung durchgeführt. Bei der Werkzeugfertigung wurde zwischen dem Additive Tooling und dem konventionellen Tooling, mit den sich daran anschließenden Fertigungstechnologien unterschieden. Um die Elemente überschaubar und analysierbar abbilden zu können, wurden sie in eine numerische DSM übertragen, in der auch deren Korrelationen zueinander modelliert werden konnte. Dabei beschreibt eine Korrelation immer die Beziehung von zwei Elementen mit Angabe der Wirkrichtung der Beziehung. Zur Beschreibung der Korrelationen wurden die Werte „- 1“ (negative Korrelation), „0“ (keine Korrelation) und „+ 1“ (positive Korrelation) verwendet.

- Als positive Korrelation werden „gleichgerichtete“ Beziehungen bezeichnet, also wenn die Erhöhung des ersten Elementes eine Erhöhung des zweiten Elementes bzw. eine Verminderung des ersten Elementes eine Verminderung des zweiten Elementes verursacht.
- Die negative Korrelation bezeichnet den gegenteiligen Fall, also wenn die Erhöhung des ersten Elementes eine Verminderung des zweiten Elementes bzw. eine Verminderung des ersten Elementes eine Erhöhung des zweiten Elementes verursacht.

Durch eine feinere Abstufung des Korrelationswertes zwischen „- 1 bis 0“ bzw. „0 bis + 1“ ließe sich zusätzlich die Stärke der Korrelation beschreiben, worauf bei der Erstellung der initialen AT-DSM aufgrund des hohen Validierungsaufwandes verzichtet wurde. Weiterhin wird eine Korrelation mit dem Kürzel „M“ versehen, falls es sich um einen quantifizierbaren, mathematisch berechenbaren Zusammenhang handelt. Abbildung 6.17 zeigt das Modellierungsprinzip der AT-DSM, welches nachfolgend anhand eines kurzen Beispiels erläutert wird.

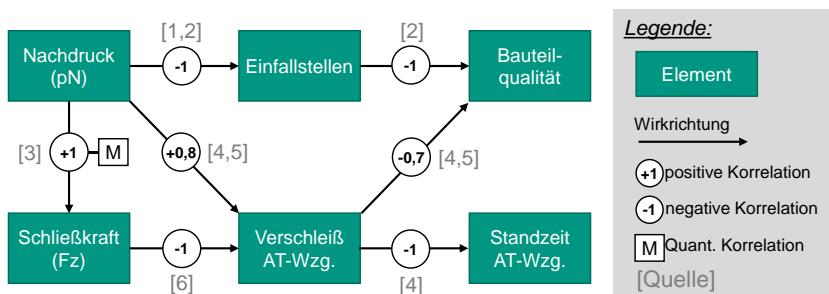


Abbildung 6.17: Prinzip der DSM-Modellierung anhand beispielhafter AT-Einflussfaktoren in grafischer Darstellung (Schrock et al., 2021)

Beispiel: Die Erhöhung des Nachdrucks erfordert eine Erhöhung der Werkzeug-schließkraft (positive Korrelation), welche sich auch mathematisch berechnen lässt (Korrelation „M“). Die Angabe dieser Korrelation beruht auf „[Quelle 3]“. Durch die Erhöhung des Nachdrucks ist laut „[Quellen 1 & 2]“ von einer Verringerung von Ein-fallstellen auszugehen (negative Korrelation). Aufgrund der Ausbreitung dieser Än-derung über unterschiedliche weitere Elemente führt eine Erhöhung des Nach-drucks zunächst zu einer Verbesserung der Formteilqualität. Jedoch erhöht sich simultan der Werkzeugverschleiß, was zu einer Verringerung der Standzeit des AT-Formeinsatzes und auch zu einer erneuten Abnahme der Formteilqualität führt.

Nach dem in Schrock et al. (2021) vorgestellten Modellierungsprinzip erfasste Schmieder (2022)<sup>21</sup>, auf Basis seiner systematischen Literaturrecherche, 125 Ein-flussfaktoren mit 281 Korrelationen in der AT-DSM. Die Modellierung der AT-DSM erfolgte in einem selbst erstellten Excel-Tool über eine mit VBA<sup>22</sup> programmierte Eingabemaske. Neben der Eingabemaske enthält das Tool auch weitere Optionen, zum Beispiel zur Pflege von Elementen und Korrelationen oder auch zu verschie-denen Analysefunktionen (z.B. Ermittlung der Kritikalität von Elementen oder zur Verfolgung der Änderungsausbreitung via Pfadanalyse). Auszüge aus dem Excel-Tool und der AT-DSM werden in Anhang F3 gezeigt.

### **Anwendungsebene**

Zunächst ist anzumerken, dass die AT-DSM auf einer Vielzahl von Einzelstudien und -quellen basiert, die sich jeweils nur mit einer begrenzten Anzahl von Faktoren beschäftigen. Die Korrelationen, die sich aus dem Modellierungsprinzip der DSM ergeben, sind daher über verschiedene Forschungsarbeiten und Forschungs-schwerpunkte verteilt. Das daraus entstehende Gesamtgefüge wurde bislang nicht validiert oder verifiziert. Die AT-DSM soll in ihrer aktuellen, initialen Form vielmehr eine Ausgangsbasis für die Entwicklung eines tiefergehenden Verständnisses des Gesamtsystems „AT“ liefern und aktuelle Forschungsergebnisse nachvollziehbar für eine Nutzung des AT zugänglich machen. Für die Anwendung der AT-DSM innerhalb der AT-Systematik ergeben sich daraus im Wesentlichen zwei sich ergänzende Anwendungsfälle:

#### Anwendungsfall 1: Nutzung der AT-DSM als Wissensquelle und Wissensspeicher.

Hier dient die AT-DSM zur Vermittlung von AT-spezifischem Wissen, insbesondere zu Einflussfaktoren, Prozessparametern etc. und deren Beziehungen zueinander. Zudem dient die AT-DSM hier auch der Dokumentation von neuen, selbst erlangten

---

<sup>21</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>22</sup> VBA: Visual Basic for Applications.

Erkenntnissen aus der Anwendung von AT. In diesem Anwendungsfall besteht ein geringer Aufwand zur Anwendung und Pflege der AT-DSM.

Anwendungsfall 2: Nutzung der AT-DSM zur Analyse von Elementen und Korrelationen. Hier dient die AT-DSM der genaueren Analyse ihrer Elemente und der darin beschriebenen Zusammenhänge. Mögliche Untersuchungen können z.B. dem Aufzeigen einflussreicher oder kritischer Elemente (über Aktiv- und Passivsumme, Aktivität und Kritikalität) sowie der Nachverfolgung der Änderungsausbreitung (mittels Pfadanalyse) dienen. In diesem Anwendungsfall besteht ein erhöhter Aufwand zur Anwendung und Pflege der AT-DSM, da valide Analyseergebnisse nur mit einer möglichst vollständigen und korrekten Abbildung der Realität erwartet werden können.

Innerhalb der AT-Systematik kann die AT-DSM über alle Phasen hinweg als Unterstützung herangezogen werden. Beispielsweise kann sie als Wissensbasis für die Eignungsprüfung von AT, als Unterstützung innerhalb der Entwicklung und Konstruktion, zur Ermittlung und Prüfung geeigneter Prozesseinstellung und dem Nachbereiten und Lernen genutzt werden. Eine Übersicht zur AT-DSM bietet der in Abbildung 6.18 dargestellte Steckbrief.

AT-DSM	
<b>Anwendungsfeld:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Modellierung und Analyse von Korrelationen und Wirkbeziehungen auf Parameterebene in Form einer Design-Structure-Matrix (DSM)</li><li>• Wissensquelle (für die Phasen 2 - 5)</li><li>• Wissensspeicher (kontinuierlich &amp; Phase 6)</li></ul>	
<b>Vorteile:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Vollständige Erfassung des Gesamtsystems möglich</li><li>• Verschiedene Analysemöglichkeiten (z.B. Kritikalitäts- oder Pfadanalyse)</li></ul>	<b>Nachteile:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Aufwändige Anwendung</li><li>• Kann unübersichtlich werden</li><li>• Aussagekraft hängt von der Validität der gesetzten Korrelationen ab</li></ul>
<b>Benötigte Anwenderkompetenz:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Anwendung als Wissensquelle erfordert keine speziellen Kenntnisse, jedoch sollte das Prinzip der DSM bekannt sein</li><li>• Modellierung und Analyse der DSM sollte von Experten vorgenommen werden</li></ul>	

Abbildung 6.18: Steckbrief zur Beschreibung der AT-DSM

### 6.3.2.3 Beschreibung von Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien im „AT-Konstruktionskatalog“

Wie die AT-DSM beruht der AT-Konstruktionskatalog zu großen Teilen auf den zusammengefassten Ergebnissen verschiedener Forschungsarbeiten, welche durch eigene Erkenntnisse ergänzt wurden. Die relevanten Informationen aus den identifizierten Quellen wurden dazu in kurzgefasste Richtlinien überführt. Diese sind meist in tabellarischer Form oder in Fließtext wiedergegeben und werden, wenn möglich und sinnvoll, mit einer bildlichen Darstellung unterstützt. Die Bereitstellung des AT-Konstruktionskatalogs erfolgt in Form eines PDF-Dokumentes, welches im Kern 42 Seiten umfasst und das im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Schmieder (2022)<sup>23</sup> verfasst wurde. Richtlinien aus dem AT-Konstruktionskatalog wurden bereits in Junk et al. (2024) veröffentlicht. Neben Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien umfasst der AT-Konstruktionskatalog Informationen zu AM-Verfahren, AM-Materialien und eine Übersicht zu typischen Fehlern und deren Ursachen. Eine ausführliche Beschreibung der identifizierten Richtlinien würde den Umfang dieser Arbeit übersteigen, weswegen an dieser Stelle lediglich ein Auszug dargestellt wird (siehe Abbildung 6.19). Der vollständige AT-Konstruktionskatalog kann der Arbeit von Schmieder (2022)<sup>24</sup> und Anhang F4 entnommen werden.

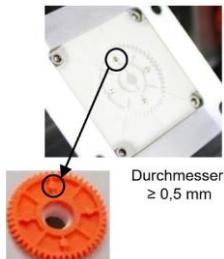
Konstruktionsrichtlinien für geometrische Strukturen des Formeinsatzes und der Kavität			
	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
Lowered Features (Vertiefungen)	Bohrungen, die durch die additive Fertigungsanlage direkt gefertigt werden, sollten einen Durchmesser $\geq 0,5$ mm besitzen. [4]		1. Die Bohrungen werden während der additiven Fertigung vollständig gedruckt und definiert, da die Druckgenauigkeit ausreicht
	Bohrungen mit einem Durchmesser $< 0,5$ mm sollten anschließend im Post-Processing gebohrt werden. Ausnahmen bilden Bohrungen für Auswerferstifte, die immer nachgebohrt werden sollten. [10, 19]		1. Kleinere Durchmesser werden durch die Bohrungen vollständig definiert 2. Perfekte Passung zwischen Bohrung und Auswerferstift aufgrund der

Abbildung 6.19: Auszug aus dem AT-Konstruktionskatalog am Beispiel von Konstruktionsrichtlinien für geometrische Strukturen in der Unterkategorie „Vertiefungen: Bohrungen“ (Schmieder, 2022)<sup>25</sup>

<sup>23</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>24</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>25</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

## 6.4 Support-Evaluation anhand Fallstudie A: „Besteck-Set“

Das Ziel der *Support-Evaluation* ist das Sicherstellen der technischen Funktionalität der Unterstützung, so dass diese innerhalb der DS-II evaluiert werden kann (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 184). Zu diesem Zweck wurde die Entwicklung der AT-Systematik von einer Support-Evaluation in Form einer Anwendungsstudie begleitet. Neben der reinen Funktionalität wurde geprüft, ob die Unterstützung anwendergerecht gestaltet ist und ob sie die wesentlichen, für das AT notwendigen, Schritte berücksichtigt. Die Anwendungsstudie wurde im Rahmen der Masterarbeit von Wölflinger (2022)<sup>26</sup> zwischen dem 01.11.2021 und dem 29.04.2022 in Kooperation mit der Braunform GmbH durchgeführt. Die Ergebnisse und Zwischenergebnisse wurden zur kontinuierlichen Verbesserung der AT-Systematik genutzt. Die Hilfsmittel *AT-Checkliste* und *AT-Konstruktionskatalog* befanden sich zum Zeitpunkt der Studie noch in der Entwicklung, sodass ihre Evaluation erst im Rahmen der DS II erfolgt.

Im Folgenden werden neben dem Studiendesign nur die Studienergebnisse bezüglich der Support-Evaluation vorgestellt.

### 6.4.1 Studiendesign

Um zu testen, ob die AT-Systematik die notwendigen Schritte zum Aufbau und zur Nutzung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung enthält, wurde im Rahmen der Anwendungsstudie eine Entwicklungsaufgabe an den Probanden (Abschlussarbeiter) gestellt, welche mit Hilfe der AT-Systematik gelöst werden sollte. Diese bestand in der Entwicklung eines vierteiligen „Besteck-Sets“. Das Validierungsziel lag in der Validierung und Verifikation vorgegebener Kundenanforderungen. Die Validierung sollte mittels AT-Prototypen durchgeführt werden.

Neben der Durchführung der sechs Phasen der AT-Systematik sollten ein House of Quality (HoQ) zum Management der Kundenanforderungen und das adaptierte Filter-Fidelity-Modell (FFM, vgl. Abschnitt 6.2.3.3) zur Bewertung und Auswahl geeigneter Prototypingtechnologien eingesetzt werden. Da sich die AT-Checkliste zum Zeitpunkt der Studie noch in Entwicklung befand, wurde für das spezifische Vorgehen innerhalb der sechs Phasen das optimierte Vorgehensmodell der technischen Vorstudie (siehe Anhang D4) als Referenzprozess herangezogen. Anstelle des AT-Konstruktionskataloges wurden die im Rahmen des Standes der Forschung ermittelten Quellen herangezogen.

---

<sup>26</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

Weiterhin war für die Entwicklung des Produktes ein Referenzsystem zu bilden. Als potenzielle Referenzsystemelemente standen unter anderem die Daten der technischen Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ und bereits recherchierte Literatur zur Verfügung. Im Anschluss an die Entwicklungsaufgabe erfolgte eine qualitative Beurteilung der AT-Systematik auf Basis der persönlichen Erfahrungen durch den Probanden. Die quantitative Bewertung erfolgte auf Basis eines Fragebogens (siehe Anhang F5, Tabelle F5.2). Die Dokumentation des Entwicklungsablaufs, sowie der persönlichen Eindrücke des Probanden und die Beantwortung des Fragebogens erfolgten durch die Erstellung der Abschlussarbeit.

Aufgrund seiner Berufsausbildung zum Werkzeugbauer und seines Studiums des Maschinenbaus wird Herr Wolfinger als qualifizierter Proband für die Studie eingestuft. Durch den Verfasser dieser Arbeit erfolgte zudem eine teilnehmende Beobachtung in der Rolle des Co-Betreuers der Abschlussarbeit, sodass weitere qualitative Erkenntnisse über die Funktionalität und Probleme in der Anwendung der AT-Systematik ermittelt werden konnten.

#### **6.4.2 Studienergebnisse**

Da eine hohe geometrische Ähnlichkeit zwischen den Komponenten des „Besteck-Sets“ und dem Formteil „Zugprobe“ besteht, konnte das Werkzeugkonzept des „Zugprobenwerkzeugs“ (siehe Abschnitt 5.2) übernommen werden. Aufgrund der ebenfalls ähnlichen Spritzgussparameter wurde das Eignungsrisiko von AT bereits früh als gering eingestuft, weswegen auf eine strukturmechanische Simulation verzichtet wurde. Wie in Abbildung 6.20 gezeigt wird, konnten erfolgreich AT-Prototypen hergestellt und validiert werden. Pro Formteil wurden zwischen 29 und 39 Stück gefertigt. Aus den qualitativ hochwertigsten Formteilen wurden fünf vollständige AT-Prototypen des Besteck-Sets aufgebaut, welche anschließend für die Validierung genutzt werden konnten.

Prinzipiell nicht Teil der Support-Evaluation aber dennoch wichtig für die Weiterentwicklung der AT-Systematik sind die mit der Studie gewonnenen Erkenntnisse zur Entwicklung, Fertigung und Anwendung der AT-Formeinsätze, welche im Anschluss in deren Weiterentwicklung eingeflossen sind. Darüber hinaus wurden Projektdaten wie CAD-Dateien und Fertigungsparameter erzeugt, welche als Referenzsystemelemente für zukünftige Projekte zur Verfügung stehen. Abbildungen der erstellten Filter-Fidelity-Profile, der vier AT-Formeinsatzpaare sowie die Prozessparameter für das Spritzgießen können Anhang F5 entnommen werden.

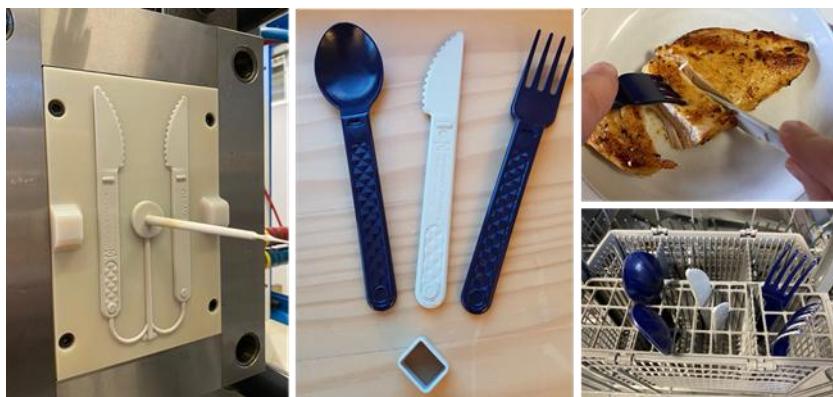


Abbildung 6.20: AT-Formeinsatz mit gespritztem Formteil (links), AT-Prototyp des Besteck-Sets (Mitte), Testdurchführung zur Validierung (rechts)

Wie Wolfinger mit seiner Arbeit zeigt, kann die AT-Systematik vollständig für die Durchführung einer Produktvalidierung durchlaufen werden. Den Aufbau der AT-Systematik beschreibt Wolfinger zudem als „verständlich und nachvollziehbar“ (Wolfinger, 2022, S. 82). Die Ergebnisse des Fragebogens zur Bewertung der AT-Systematik sind in Anhang F5, Tabelle F5.2 aufgeführt. Daraus wird ersichtlich, dass die sechs Phasen für den Probanden von hoher Relevanz für die erfolgreiche Projektdurchführung waren („stimme eher zu“ bis „stimme voll zu“). Zudem wurde der vorgeschlagene Referenzprozess und die darin enthaltenen Aktivitäten als „sinnvoll und hilfreich“ bewertet („stimme voll zu“).

Trotz der positiven Resultate der vorgestellten Fallstudie sollten folgende Punkte einer kritischen Ergebnisbewertung berücksichtigt werden. Zum einen erfolgte die Anwendung der AT-Systematik durch eine studentische Einzelperson. In der Praxis arbeiten in der Regel mehrere Experten in Teams zusammen. Zum anderen wurde in dieser Studie nur ein spezifischer Anwendungsfall betrachtet. Entwicklungsprojekte sind jedoch einzigartig, sodass keine generelle Aussage über die Übertragbarkeit der Ergebnisse getroffen werden kann.

Das Ziel der Überprüfung der Kernfunktionalität der AT-Systematik durch die Support-Evaluation wird aufgrund der erfolgreichen Anwendung aus Sicht des Autors als ausreichend erfüllt betrachtet, um in weiteren Studien zusätzliche Anwendungsfälle zu schaffen und im Rahmen der DS-II eine vertiefende Evaluation zu beginnen.

## 6.5 Fazit zu Kapitel 6

In Kapitel 6 wurden die Ergebnisse der präskriptiven Studie mit dem Ziel der methodischen Unterstützung von AT zur Validierung in der Produktentwicklung vorgestellt. Auf Basis des Standes der Forschung und der in der DS-I durchgeführten Studien wurde zunächst das in Kapitel 3 beschriebene Forschungsziel in ein konkretes Ziel-  
system mit Anforderungen an eine unterstützende Methode überführt (siehe Abschnitt 6.1). Dazu wurden die drei elementaren Handlungsfelder *Eignung von AT sicherstellen*, *Aufbau und Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung unterstützen* und *Interpretation der Testergebnisse unterstützen* beschrieben. Auf Basis des erweiterten Zielmodells und der Handlungsfelder wurden anschließend Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag*, die *Unterstützungsleistung* und die *Anwendbarkeit* der zu entwickelnden Unterstützung definiert.

Damit wurde Forschungsfrage 2 beantwortet:

FF2: Wie ist eine Methode zu gestalten, mit der Entwickelnde das Potenzial des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung heben können?

Mit der *AT-Systematik* wurde daraufhin ein strukturierendes Vorgehensmodell präsentiert, welche das methodische Rahmenwerk für AT-Projekte innerhalb der Produktvalidierung bilden soll (siehe Abschnitt 6.2). Um einen ganzheitlichen Ansatz im Sinne der integrierten Produktentwicklung zu gewährleisten, wurde die AT-Systematik als zusätzliche Methode zur Unterstützung der Aktivitäten „Prototyp aufbauen“ und „Validieren und Verifizieren“ innerhalb des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM, siehe Abschnitt 2.1.2.3) verortet (siehe Abschnitt 6.2.1). Die AT-Systematik beinhaltet in sechs Phasen eingeteilte Aktivitäten und Hilfsmittel, mit denen die Anforderungen an die Unterstützungsleistung abgedeckt werden sollen (siehe Tabelle 6.4).

Tabelle 6.4: Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U) der Methode durch die Phasen der AT-Systematik

	<b>Die Methode soll ...</b>	<b>Wird unterstützt durch...</b>
U1	die Ermittlung und Konkretisierung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs unterstützen.	Phase 1: Konkretisierung der Validierungsziele
U2	die Prüfung, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet, unterstützen.	Phase 2: Prüfung der Validierungsumgebung
U3	in den Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge unterstützen.	Phase 3: Aufbau der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung
U4	in der Anwendung der Validierungsumgebung unterstützen.	Phase 4: Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung
U5	die Auswertung und Interpretation der Testergebnisse unterstützen.	Phase 5: Auswertung und Interpretation der Ergebnisse
U6	die Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte unterstützen.	Phase 6: Nachbereiten und Lernen

Zur direkten operativen Anwendung der AT-Systematik wird dem Anwender die *AT-Checkliste* zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 6.3.1). Diese bildet mit ihren Aktivitäten und Aufgaben einen Referenzprozess ab, welcher in Form eines an die Scrum-Methode angelehnten Kanban-Boards vermittelt wird. Somit kann auf Basis des Referenzprozesses je nach Bedarf ein situationsspezifischer Prozess zur Nutzung des AT erstellt werden. Aufgrund dieser Flexibilität soll ein möglichst schlanker und agiler AT-Prozess gewährleistet werden, um die Vorteile von AT für eine effiziente Produktvalidierung bestmöglich nutzen zu können.

Als weitere Hilfsmittel wurden die *AT-DSM* und der *AT-Konstruktionskatalog* eingeführt (siehe Abschnitt 6.3.2). Die AT-DSM ermöglicht die Modellierung und Analyse weitverzweigter Beziehungen von Parametern und deren Wechselwirkungen. Der AT-Konstruktionskatalog enthält Richtlinien zur Konstruktion und Anwendung des AT für das Spritzgießen. Um den Anforderungen an die Anwendbarkeit der Unterstützung gerecht zu werden, wurden die in Tabelle 6.5 genannten Maßnahmen zur Entwicklung der Unterstützung berücksichtigt.

Tabelle 6.5: Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen an die Anwendbarkeit (A) der Methode

	<b>Die Methode soll ...</b>	<b>Maßnahme zur Erfüllung</b>
A1	einfach zu verstehen sein.	Mit der <i>AT-Systematik</i> wird ein generisches Vorgehensmodell gegeben, welches ausführliche Hifestellungen zur Verfügung stellt.
A2	einfach anzuwenden sein.	Das Phasenmodell der <i>AT-Systematik</i> gibt im Groben die Struktur des AT-Projektes vor.
A3	in sinnvolle Schritte gegliedert sein.	Durch die <i>AT-Checkliste</i> wird im Detail ein direkt anwendbarer Referenzprozess zur Verfügung gestellt, welcher relevante Aufgaben und Aktivitäten enthält.
A4	einen angemessenen Detailierungsgrad besitzen.	Die im Referenzprozess empfohlenen Aktivitäten und Hilfsmittel können vom Anwender situationsadäquat durchgeführt bzw. genutzt und nach Bedarf angepasst werden.
A5	ein angemessenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis besitzen.	
A6	in der industriellen Praxis anwendbar sein.	Die Entwicklung der <i>AT-Systematik</i> und die Entwicklung bzw. Auswahl weiterer Hilfsmittel basiert auf Expertenumfragen, dem aktuellen Stand der Forschung und eigenen Anwendungsstudien mit einem Industriepartner.
A7	auf unterschiedliche Projekte übertragbar sein.	Die <i>AT-Systematik</i> bietet ein generisches Vorgehensmodell, welches auf eigene Bedarfe angepasst werden kann.

Zur frühen Überprüfung der Funktionalität wurde die Entwicklung der Unterstützung von einer *Support-Evaluation* begleitet (siehe Abschnitt 6.4). Diese wurde in Form einer Anwendungsstudie zur Entwicklung eines Besteck-Sets im Rahmen der Masterarbeit von Wolfinger (2022)<sup>27</sup> durchgeführt. Darin wurde gezeigt, dass die entwickelte AT-Systematik und die empfohlenen Hilfsmittel anwendbar sind. Die Anwendungsstudie konnte mit der erfolgreichen Durchführung der geplanten Validierungsaktivitäten abgeschlossen werden. Eine weiterführende Überprüfung der Anwendbarkeit erfolgt in den Anwendungsstudien im Rahmen der DS-II (siehe Kapitel 7). Darin erfolgt neben der Überprüfung der Anwendbarkeit auch die Evaluation der *Unterstützungsleistung* und des *Erfolgsbeitrages* der AT-Systematik.

Im Modell der SGE können die vorgestellten Studien und Hilfsmittel Elemente eines Referenzsystems darstellen, welche durch entsprechende Variation auf das zu entwickelnde System übertragen werden können.

<sup>27</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.



## 7 Evaluation

In diesem Kapitel wird die Überprüfung der Zielerreichung und des Mehrwertes der entwickelten Unterstützung vorgestellt. Die Evaluation der AT-Systematik orientiert sich dabei an den von Blessing und Chakrabarti (2009) definierten Evaluationsarten *Application- und Success-Evaluation*. Zur empirischen Bewertung der entwickelten Unterstützung werden die in Abschnitt 6.1.2 definierten Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag* (E1-E4), die *Unterstützungsleistung* (U1-U6) und die *Anwendbarkeit* (A1-A7) herangezogen. Im Rahmen der DRM entspricht diese Evaluation der deskriptiven Studie II und dient in dieser Arbeit der Beantwortung von Forschungsfrage 3.

FF3: Welchen Beitrag leistet die erarbeitete Methode zur Nutzung der Potenziale des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung?

Die **Application-Evaluation** (Anwendungsevaluation) dient der Bewertung der Anwendbarkeit und Benutzerfreundlichkeit der Unterstützung (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 184). Dazu werden folgende, übergeordnete Fragestellungen fokussiert:

- FF3.1: Ist die AT-Systematik praktisch anwendbar und wird sie vom Anwender akzeptiert? (*gemessen an A1-A7*)
- FF3.2: Unterstützt die AT-Systematik in den relevanten Handlungsfeldern (H1-H3, siehe Abschnitt 6.1.1) des AT? (*gemessen an U1-U6*)

Mit der **Success-Evaluation** (Erfolgsevaluation) wird das Ziel verfolgt, die tatsächlich durch den entwickelten Support erzielten Erfolg bzw. den Erfolgsbeitrag zu messen (Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 185). Im Zuge der Success-Evaluation wird folgende, übergeordnete Fragestellung fokussiert:

- FF3.3: Unterstützt die AT-Systematik die erfolgreiche Anwendung von AT zur Produktvalidierung? (*gemessen an E1-E4*)

Eine „erfolgreiche“ Anwendung liegt vor, wenn mit Hilfe von AT unter effizientem Ressourceneinsatz validierungsgeeignete Prototypen erstellt, valide Testergebnisse erzielt und die Validierungsziele erreicht werden (siehe Definition 6, S. 79). Da die AT-Systematik an Entwickler aus der industriellen Praxis gerichtet ist, kann eine vollumfängliche Erfolgsmessung nur durch Durchführung zusätzlicher Feldstudien erfolgen. Allerdings ist hier in der Regel keine Bildung von Kontrollgruppen möglich.

Zudem sind Entwicklungsprojekte oft langwierig, erfordern einen hohen Ressourceneinsatz und können nicht wiederholt, bzw. kann ein und dasselbe Projekt nicht mit und ohne die zu testende Methode durchgeführt werden. Aufgrund ihrer Einzigartigkeit sind industrielle Entwicklungsprojekte weiterhin schwer miteinander vergleichbar. Auch die Wissensbasis und das Verhalten der Probanden wäre schwer zu erfassen, zumal an der praktischen Anwendung von AT in der Produktentwicklung eine Vielzahl von Fachbereichen und Personen beteiligt sind. Blessing und Chakrabarti (2009) bezeichnen die *Success-Evaluation* ebenfalls als die herausforderndste Evaluationsart im Rahmen der DRM. In dieser Arbeit wird der Erfolg der AT-Systematik daher anhand von Arbeitsergebnissen aus der praktischen Methodenanwendung in verschiedenen Fallstudien evaluiert. Zusätzlich wird der Erfolgsbeitrag von Experten auf Basis ihrer persönlichen Einschätzung und Erfahrung bewertet.

## 7.1 Übersicht zu Evaluationsstudien

Neben Fallstudie A zur *Support-Evaluation* (siehe Abschnitt 6.4) wurden verschiedene Studien in unterschiedlichen Formaten zur *Application-* und *Success-Evaluation* der AT-Systematik durchgeführt, über welche in diesem Abschnitt ein Überblick gegeben wird.

Zunächst wurden die vier Fallstudien B bis E (siehe Abschnitte 7.2 & 7.3) mit praktischer Methodenanwendung durchgeführt. Anschließend wurden diese Fallstudien im Rahmen von Experteninterviews diskutiert und die AT-Systematik wurde aus Expertensicht bewertet. Die Fallstudien B, C und D stellen die umfangreichsten Evaluationsstudien innerhalb dieser Arbeit dar. Da sie nach identischem Forschungsvorgehen durchgeführt wurden, werden sie zusammengefasst vorgestellt (siehe Abschnitt 7.2). Fallstudie E basiert auf der Bachelorarbeit von Bühler (2022)<sup>1</sup>, welche vom Verfasser co-betreut wurde (siehe Abschnitt 7.3).

Im Anschluss wurden die Ergebnisse der Anwendungsstudien sowie die AT-Systematik selbst in semi-strukturierten Interviews mit insgesamt 16 Experten aus der Spritzgießbranche diskutiert und von diesen bewertet. Interviewstudie Nr. 2 umfasst fünf Interviews und wurde im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Bühler (2022)<sup>2</sup> mit direktem Bezug zu Fallstudie E durchgeführt. Die Vorstellung dieser Interviewstudie erfolgt daher gemeinsam mit Fallstudie E (siehe Abschnitt 7.3). Interviewrunde Nr. 3 umfasst elf Experteninterviews und wurde vom Verfasser dieser Arbeit durchgeführt (siehe Abschnitt 7.4).

---

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

In allen Evaluationsstudien wurden Fragebögen zur Bewertung der eingesetzten Unterstützung genutzt. Für die Erstellung der Fragebögen wurden überwiegend Fragen und zu bewertende Aussagen auf Grundlage der in Abschnitt 6.1.2 definierten Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag* (E1-E4), die *Unterstützungsleistung* (U1-U6) und die *Anwendbarkeit* (A1-A7) abgeleitet. Einen Überblick über die durchgeführten Evaluationsstudien gibt Tabelle 7.1.

Tabelle 7.1: Übersicht über alle durchgeführten Evaluationsstudien zur *Support-, Application- und Success-Evaluation*

Studie	Fallstudie A: „Besteck-Set“	Fallstudien B-D: „Eiskratzer“, „Tesla-Ventil“, „Karabiner“	Fallstudie E: „Benchmark“ & Experten- interview Nr.2	Expert- interview Nr.3
Studenttyp	Labornahe Anwendungs- studie	Live-Lab	(a) feldnahe An- wendungsstudie / (b) semistruktu- riertes Interview	Semi- strukturiertes Interview
Evaluations- art	Support- Evaluation (Teil der PS)	Application- & Success- Evaluation	Application- & Success- Evaluation	Application- & Success- Evaluation
Teilnehmer	1	15	(a) 1 / (b) 5	11
Beteiligte Unternehmen	Braunform GmbH	Braunform GmbH	Würth GmbH & Co.KG	Diverse
Abschnitt	6.4	7.2	7.3	7.4

Alle Anwendungsstudien wurden mit Unternehmensbeteiligung durchgeführt, wobei jedoch die Hauptanwender der AT-Systematik Studierende waren. Insbesondere die Aufbereitung und die praktische Anwendung der AT-Werkzeuge fand bei bzw. mit den kooperierenden Unternehmen statt. In allen Fallstudien erhielten die Studententeilnehmer eine theoretische Einführung in die AT-Systematik sowie in die vorgeschlagenen Hilfsmittel und wurden bei der Anwendung der AT-Systematik durch den Verfasser dieser Arbeit unterstützt.

Im Zuge der Anwendungsstudien entstanden teils sehr umfangreiche Entwicklungsprojekte und Projektergebnisse, welche in dieser Arbeit nicht in Gänze wiedergegeben werden können. Jedoch werden zu jedem Projekt essenzielle Entwicklungsstritte, die dabei eingesetzten Methoden und wichtige Arbeitsergebnisse entlang der sechs Phasen der AT-Systematik beschrieben, sodass über die Studien hinweg ein gesamtheitliches Bild zur Anwendung der AT-Systematik entsteht. Die Vorstellung der Evaluationsergebnisse erfolgt jeweils im Anschluss an die detaillierte Beschreibung der jeweiligen Studie.

## 7.2 Fallstudien B bis D: „Eiskratzer“, „Karabiner“ und „Tesla-Ventil“

Die Fallstudien B bis D wurden in Form einer *Live-Lab Studie* (vgl. Abschnitt 4.2.4) im Wintersemester 2021 und Sommersemester 2022 an der Hochschule Offenburg durchgeführt. In Summe nahmen 15 Masterstudierende aus den Studiengängen Maschinenbau ( $n = 12$ ) und Wirtschaftsingenieurwesen ( $n = 3$ ) teil. Teile dieser Fallstudien, wie das Live-Lab Konzept, sowie Arbeits- und Evaluationsergebnisse wurden bereits in Schrock et al. (2023) veröffentlicht. Die folgenden Abschnitte geben die relevanten Punkte dieser Veröffentlichung mit zusätzlichen Ergänzungen wieder. Daher wird im gesamten Abschnitt - mit Ausnahme von Abbildungen und Tabellen - auf eine zusätzliche Quellenangabe dieser Veröffentlichung verzichtet. Im Folgenden werden das Studiendesign (siehe Abschnitt 7.2.1), die Studiendurchführung inklusive der erzielten Arbeitsergebnisse der Studienteilnehmer (siehe Abschnitt 7.2.2) sowie die Studienergebnisse und deren Interpretation beschrieben (siehe Abschnitt 7.2.3).

### 7.2.1 Studiendesign

Als Teil der Evaluation der AT-Systematik wurde das *Live-Lab „Workshop Additive Tooling“* im Rahmen einer Lehrveranstaltung initiiert und mit Masterstudierenden der Fachrichtungen Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen durchgeführt. Im Folgenden wird das Konzept des *Workshop Additive Tooling* als Forschungsumgebung erläutert.

Dem Charakter eines Live-Lab entsprechend (vgl. Abschnitt 4.2.4) war es das Ziel des Workshops, ein möglichst realistisches Entwicklungsszenario zu schaffen, in dem die Studierenden eine Entwicklungsaufgabe unter Anwendung der zu untersuchenden *AT-Systematik* durchführen. Dazu erhielten die Studierenden entsprechend der gestellten Entwicklungsaufgabe Kundenanforderungen von der Workshopleitung, welche validiert bzw. verifiziert werden sollten. Die Kundenanforderungen wurden dabei gezielt so gestellt, dass sie in das Profil von AT als Prototyping-technologie passten. Der Projektlauf folgte den üblichen Schritten realer Entwicklungsprojekte, wie der Erfassung der Kundenanforderungen, der Produkt- und Spritzgusswerkzeugentwicklung, dem Spritzgießen von Prototypen sowie der Testdurchführung und -auswertung.

Bei der Auswahl der Kundenanforderungen für die Fallstudien wurde darauf geachtet, dass diese möglichst unterschiedlich (z.B. technisch oder wirtschaftlich) sind und den Einsatz verschiedener Prototypingtechnologien erfordern. Obwohl der

Schwerpunkt auf dem Prototyping mit AT lag, war der Einsatz anderer Prototyping-technologien (z.B. Simulation, VR, 3D-Druck etc.) entlang des Entwicklungspfades ebenfalls möglich, wurde aber methodisch nicht weiter unterstützt. Für alle Schritte mit Bezug zu AT folgten die Studierenden der *AT-Systematik*.

Um eine hohe Praxisnähe zu erreichen, wurden verschiedene Projektrollen mit unterschiedlichen Aufgabenschwerpunkten angeboten, wie sie auch in realen Entwicklungsprojekten üblich sind. Die Teilnehmer waren aufgefordert, sich je nach ihren Präferenzen für eine Rolle zu entscheiden, die nachfolgend kurz beschrieben und mit der jeweils maximalen Anzahl pro Team angegeben werden:

- **Projektleiter (1):** Erster Ansprechpartner des Kunden (hier: Workshopleitung). Verantwortlich für Projektplan, Kostenkalkulation, Gesamtdokumentation usw. Unterstützt die Teammitglieder in der Erfüllung ihrer Aufgaben.
- **Konstrukteur (1-2):** Erstellt CAD-Daten für Produkte und Werkzeuge auf Basis von Kundenanforderungen. Muss auf fertigungsgerechte Konstruktion achten. Kennt die Designrichtlinien für Spritzgussprodukte.
- **Simulations-Ingenieur (1-2):** Führt FEM-Simulationen zu Produkt und Werkzeug durch (strukturmechanische Simulation, Prozesssimulation). Überprüft fertigungsgerechte Konstruktion und erstattet Bericht über seine Ergebnisse.
- **AM-Ingenieur (1-2):** Unterstützt durch seine AM-Expertise den Prototypingprozess. Prüft die AM-gerechte Konstruktion. Stellt AM-Prototypen und AT-Formeinsätze her.

Zu Beginn des Workshops und vor der Schulung der Teilnehmer wurde ein Online-Fragebogen mit 24 Fragen verteilt, um eine Selbsteinschätzung der Teilnehmer in Bezug auf projektrelevante Kenntnisse und Kompetenzen in den Bereichen Produktentwicklung, Methoden und Tools, Spritzgießen und additive Fertigung zu erhalten (siehe Anhang G1). Dadurch wurde einerseits eine auf die Teilnehmer zugeschnittene Schulung ermöglicht. Andererseits konnte durch die Befragung mit dem gleichen Fragebogen am Ende des Projektes der Kompetenzfortschritt der Teilnehmer in den verschiedenen Kategorien gemessen werden. Die eigenständige Projektarbeit der Teams wurde durch regelmäßige Projekttreffen und eine teilnehmende Beobachtung begleitet. Die teilnehmende Beobachtung beschränkte sich dabei auf die beratende Unterstützung, soweit dies aus Sicht der Workshopleitung erforderlich war. So konnten der Projektfortschritt und die Arbeitsweise verfolgt, Hindernisse und Probleme erkannt und gegebenenfalls Hilfestellung gegeben werden. Weiterhin bewerteten die Teams regelmäßig ihre Validierungsziele in Bezug auf die Sicherheit der Zielerreichung. Zum Abschluss des Workshops hielten die Studierenden einen Abschlussvortrag und füllten den Fragebogen zur Bewertung der AT-Systematik aus, welcher Anhang G2 entnommen werden kann. Der prinzipielle Ablauf des Workshops und die Einordnung der genutzten Forschungsmethoden ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

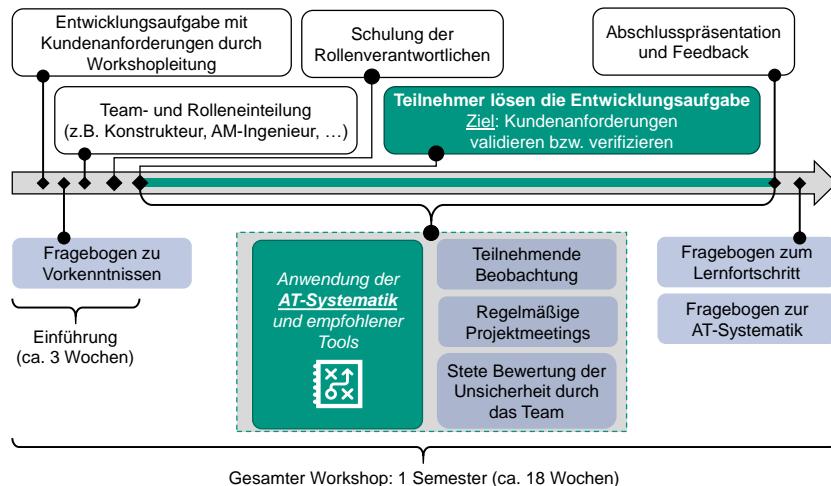


Abbildung 7.1: Prinzipieller Ablauf und Forschungsvorgehen im Live-Lab „Workshop Additive Tooling“ (Schrock et al., 2023)

Der Arbeitsumfang für den gesamten Workshop betrug 90 Stunden pro Teilnehmer (entspricht 3 ECTS), mit zusätzlichen 30 Stunden (+1 ECTS) für Teilnehmer aus dem Studiengang Maschinenbau, die zusätzlich einen Projektbericht einreichten. Nach Abzug der Zeit für Schulungen, Projekt-Meetings und Abschlusspräsentation verblieben den Teilnehmern ca. 70 bis 80 Stunden für die Projektarbeit.

Zur Unterstützung der sechs Phasen der AT-Systematik wurden den Studierenden zu verwendende Methoden und Hilfsmittel vorgegeben. Für die genaue Vorgehensweise nach der AT-Systematik wurde den Teilnehmern die *AT-Checkliste* mit den darin definierten Aktivitäten und Aufgaben in Form des digitalen Kanban-Boards (vgl. Abschnitt 6.3.1) online zur Verfügung gestellt. Zur Unterstützung der Konstruktion der Produkte und AT-Formeinsätze wurden der *AT-Konstruktionskatalog* (vgl. Abschnitt 6.3.2.3) und die *AT-DSM* (vgl. Abschnitt 6.3.2.2) zur Verfügung gestellt. Es ist anzumerken, dass sowohl der AT-Konstruktionskatalog als auch die AT-DSM im Workshop des Sommersemesters 2022 aufgrund stetiger Nachpflege neuer Erkenntnisse umfangreicher waren als im Workshop des Wintersemesters 2021.

Weiterhin wurden das House of Quality (HoQ), das angepasste Filter-Fidelity-Model (FFM) nach Kohler und Hochreuter (2014) (vgl. Abschnitt 6.2.3.3), die Spritzgussprozesssimulation (mit Moldflow Adviser 2021) und eine vereinfachte strukturmechanische FEM-Simulation der AT-Formeinsätze (mit ANSYS 2021) als zu nutzende Hilfsmittel vorgegeben. Die phasenspezifische Zuordnung der zu verwendenden

Methoden und Hilfsmittel entlang der sechs Phasen der AT-Systematik ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

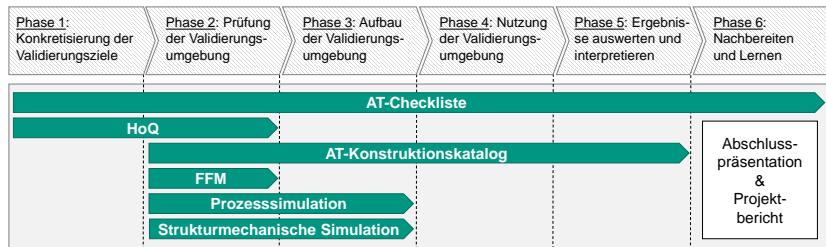


Abbildung 7.2: Vorgehen im Workshop Additive Tooling nach den Phasen der AT-Systematik mit Übersicht zu den eingesetzten Methoden und Hilfsmitteln (Schrock et al., 2023)

## 7.2.2 Studiendurchführung und Arbeitsergebnisse

Das *Live-Lab „Workshop Additive Tooling“* wurde im Wintersemester 2021 und Sommersemester 2022 durchgeführt. Die teilnehmenden Studierenden wurden in drei Teams aufgeteilt, von denen jedes eine eigenständige Entwicklungsaufgabe erhielt, sodass daraus drei Fallstudien entstanden (siehe Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2: Übersicht zu den durchgeführten Workshops und der jeweiligen Entwicklungsaufgabe der Fallstudien B, C und D

Workshop-Nr. & Zeitraum	1, Wintersemester 2021	2, Sommersemester 2022	
<b>Fallstudie</b>	B	C	D
<b>Zu entwickelndes Produkt</b>	Eiskratzer	Karabiner	Tesla Ventil
<b>Team Nummer</b>	Team 1	Team 2	Team 3
<b>Team Größe</b>	n = 6	n = 4	n = 5

Im Folgenden wird das Vorgehen der drei studentischen Teams anhand von Auszügen aus deren Arbeitsergebnissen und eigenen Beobachtungen aus der Begleitung der Teams während des Workshops beschrieben. Um einen verständlichen Überblick über die Anwendung der AT-Systematik zu geben, erfolgt die Beschreibung entlang der sechs Phasen der AT-Systematik.

### 7.2.2.1 Phase 1: Konkretisierung des Validierungsbedarfs

Als Teil eines übergeordneten PEP sieht die AT-Systematik als erste Aufgabe die Konkretisierung der Validierungsziele vor. Entsprechend mussten die Teams zunächst Validierungsziele definieren. Dazu wurden die von der Workshopleitung vor-gegebenen Kundenanforderungen in ein House of Quality (HoQ) aufgenommen, priorisiert und durch gezielte Rückfragen durch die Teams weiter ergänzt. Im Sinne des Modells der SGE (vgl. Abschnitt 2.1.2.1) wurde weiterhin ein Referenzsystem gebildet. Aus den gesammelten Referenzen wurden dann verschiedene Lösungskonzepte abgeleitet. Abbildung 7.3 zeigt einen exemplarischen Auszug aus dem Referenzsystem von Team 1 zur Entwicklung des Produktes „Eiskratzer“. Anschlie-ßend wurden die initialen Lösungskonzepte für das zu entwickelnde Produkt eben-falls in das HoQ übertragen.

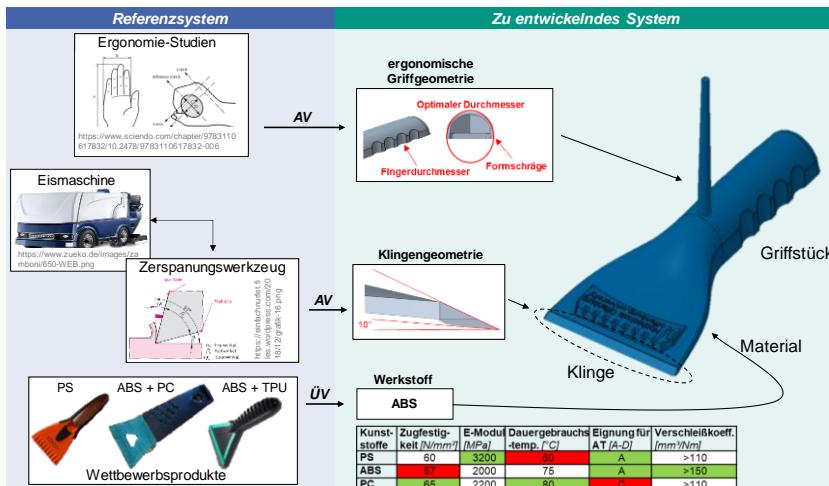


Abbildung 7.3: Beispiele und symbolische Darstellung aus dem Referenzsystem von Team 1 zur Entwicklung des „Eiskratzers“ im Modell der SGE

Zur Vervollständigung des HoQ bewerteten die Teams die Korrelation von Kunden-anforderungen und technischen Lösungen sowie die Korrelation der technischen Lösungen untereinander. Weiterhin wurden die definierten Zielwerte entsprechend dem geschätzten Schwierigkeitsgrad ihrer Erfüllung bewertet. Da die zu entwickeln-den Produkte eine verhältnismäßig niedrige Komplexität aufweisen (z.B. gegenüber einem Verbrennungsmotor, Automobil oder Smartphone) und auch nur die erste der

vier HoQ-Matrizen<sup>3</sup> gebildet wurde, konnte das HoQ mit einem vergleichsweise moderaten Aufwand modelliert werden.

Im nächsten Schritt wurde eine Priorisierung des Validierungsbedarfes vorgenommen. Dazu wurde den Teams ein Template ausgehändigt, in welches die Kundenanforderungen und die technischen Lösungsansätze mit Zielwerten übertragen wurden. Anschließend bewerteten die Teams auf einer Skala von „0“ (= absolut sicher) bis „10“ (= sehr unsicher), wie sicher oder unsicher sie sich in der Erfüllung der Kundenanforderungen bzw. Erreichung der Zielwerte sind. Um eine gewichtete Unsicherheitsbewertung zu erhalten, wurde diese Bewertung mit der Kundengewichtung („0“ = niedrig, „10“ = hoch) bzw. der Schwierigkeit der technischen Realisierung („0“ = einfach, „10“ = schwierig) multipliziert. Dabei wurde angenommen, dass eine hohe gewichtete Unsicherheit mit einem zu priorisierenden Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarf einhergeht. Die Unsicherheitsbewertung wurde von den Teams während des Projektverlaufs selbstständig zu verschiedenen Zeitpunkten (i.d.R. nach dem Erhalt wesentlicher neuer Erkenntnisse) aktualisiert, wodurch eine Unsicherheits-Heatmap entstand, mit der sich der Validierungsbedarf kontinuierlich bewerten ließ. Als Beispiel wird in Abbildung 7.4 die Unsicherheits-Heatmap von Team 1 „Eiskratzer“ zu den Kundenanforderungen vorgestellt. Auf Basis dieser Priorisierung definierten die Teams entsprechende Testgegenstände als ersten Teil zur Bildung eines Testszenarios (Leitfrage: „Was soll getestet werden?“, siehe Abbildung 7.5).

Kundenanforderung	Tag:	gewichtete Unsicherheit									
		1	4	5	6	14	15	16	26	43	49
A1 Bruchsicherheit		72	45	45	36	27	27	27	27	9	9
A2 Langlebigkeit (Temperatur, UV)		50	50	30	30	30	30	30	30	30	30
A3 Keine Kratzer auf der KFZ-Scheibe		100	50	50	50	50	50	50	50	10	10
A4 Keine Verletzungsgefahr		70	50	50	50	50	50	50	50	10	10
A5 Ergonomie		42	24	24	24	24	24	24	24	18	6
A6 Steifes Griffstück		40	25	25	15	15	15	15	15	0	0
A7 Preisbereich (VK) 2 bis 5 €		50	50	20	20	20	20	20	20	25	20
A8 Produktionsmenge p. a. > 10k		70	70	35	35	35	28	28	28	35	28
A9 Logos individualisiert		70	90	90	90	80	70	70	50	10	10
A10 Schneide passt sich Scheibe an		80	56	56	48	48	48	48	48	40	40

█ Hohe Priorität
 █ Niedrige Priorität
 Initiale Bewertung und Priorisierung
Kontrolle der Unsicherheitsreduktion

Abbildung 7.4: Priorisierung der Validierungsziele anhand der gewichteten Unsicherheit in der Erfüllung von Kundenanforderungen am Beispiel von Team 1 „Eiskratzer“ (Schrock et al., 2023)

<sup>3</sup> Im Quality Function Deployment existieren vier Matrizen: 1) Produktplanung (das HoQ), 2) Produktentwicklung, 3) Prozessplanung, 4) Prozess- & Qualitätskontrolle.

### 7.2.2.2 Phase 2: Prüfung der Validierungsumgebung

Für die vollständige Beschreibung der Testszenarien wurden anschließend Testfälle definiert und geeignete Prototypingtechnologien ausgewählt (Leitfrage: „Wie soll getestet werden?“). Zum Vergleich verschiedener möglicher Prototypingtechnologien und zur Auswahl einer Prototypingtechnologie wurde die Anwendung des angepassten Filter-Fidelity-Modells (FFM) vorgegeben (vgl. Abschnitt 6.2.3.3). Statt vordefinierter Filter-Dimensionen wie Größe, Farbe usw., wurden hier die Kundenanforderungen und technischen Lösungsansätze eingetragen. Anschließend wurde auf einer Skala von „0 = nicht ausgeprägt“ bis „5 = voll ausgeprägt“ bewertet, wie gut die jeweiligen Prototypingtechnologien das zu bewertende Merkmal abbilden. Zur Unterstützung dieser Aufgabe wurden den Teams verschiedene 3D-Druck Modelle sowie die AT-Formeinsätze und AT-Prototypen aus der technischen Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (siehe Abschnitt 5.2) zur Verfügung gestellt. Weiterhin stand die Workshopleitung für Rückfragen zur Verfügung. Eine schematische Übersicht zum Vorgehen der studentischen Teams und der genutzten Methoden in den Phasen 1 und 2 wird in Abbildung 7.5 gegeben.

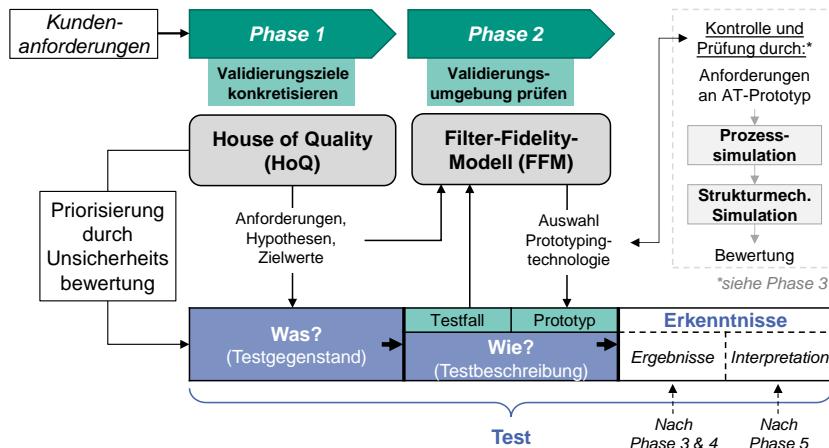


Abbildung 7.5: Schematische Übersicht zum Vorgehen der studentischen Teams in den Phasen 1 und 2 mit Angabe der wesentlich genutzten Methoden (in Anlehnung an Schrock et al., 2023)

Der Einsatz von Methoden der Simulation zur Eignungsprüfung war zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich, da den Teams noch keine geeigneten 3D-Datensätze vorlagen. Die Eignungsprüfung durch Simulation war jedoch ebenfalls Teil der Entwicklungsaufgabe und wurde iterativ zu der Produkt- und Werkzeugkonstruktion in

Phase 3 durchgeführt. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von AT wurde, wie auch zur Durchführung der Markt- und Beschaffungsstudie (vgl. Abschnitt 5.1), die Möglichkeit der Online-Kalkulation anhand vereinfachter Formeinsatzdaten genutzt.

### 7.2.2.3 Phase 3: Aufbau der Validierungsumgebung

Zu Beginn der Phase 3 lagen die in den Phasen 1 und 2 erstellten initialen Produkt-CAD-Daten vor, die nun weiter ausgearbeitet werden mussten. Zur Entwicklung stand allen Teams das Referenzprojekt „Zugprobenwerkzeug“, inklusive CAD-Daten, Zeichnungen, Simulations- und Fertigungsparametern zur Verfügung. Den Teams 2 und 3 standen zusätzlich die Projektergebnisse von Team 1 und das Referenzprojekt „Besteck-Set“ zur Verfügung. Relevantes Wissen zur Entwicklung und zum Aufbau der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung wurde in Form des AT-Konstruktionskataloges (vgl. Abschnitt 6.3.2.3) und der AT-DSM (vgl. Abschnitt 6.3.2.2) zur Verfügung gestellt. Ein Auszug aus dem Referenzsystem von Team 1 zur Entwicklung des AT-Werkzeugs für das Produkt „Eiskratzer“ ist in Abbildung 7.6 dargestellt.

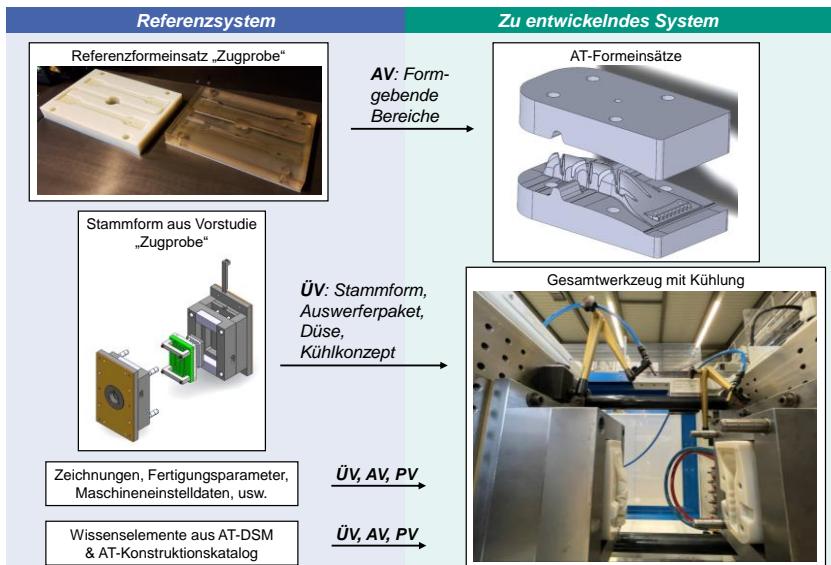


Abbildung 7.6: Beispiele aus dem Referenzsystem zur Entwicklung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung im Modell der SGE

Bei dem hier durchgeführten Vorgehen handelte es sich nicht um eine wie in Abschnitt 2.2.3.1 beschriebene „ungünstige“ Entwicklungssituation, bei der das Werkzeug zu einem bereits final entwickelten Produkt entwickelt werden muss. Stattdessen konnte eine überwiegend parallelisierte Entwicklung von Produkt und Werkzeug erfolgen, sodass sowohl unter den Gesichtspunkten des Spritzgießens als auch des AT ein fertigungsgerechtes Design fokussiert werden konnte.

Um das Produkt fertigungsgerecht zu gestalten, wurden die Teilnehmer außerdem aufgefordert, eine Prozesssimulation durchzuführen. Dabei sollte unter anderem ein geeigneter Anspritzpunkt ermittelt, Hinterschneidungen identifiziert und Entformungswinkel geprüft werden. Weiterhin sollte die Simulation eine Prognose über die zu erwartende Formteilqualität liefern, indem z.B. Wandstärken, Massenanhäufungen und Temperaturverteilungen analysiert und damit Einfallstellen und Formteilverzug prognostiziert werden. Auf Basis der durch die Spritzgussprozesssimulation erzeugten Daten wurde anschließend eine strukturmechanische Simulation des Formeinsatzes durchgeführt. In der Simulation wurden beide Formeinsatzhälften mit dem maximalen Werkzeuginnendruck und der benötigten Zuhaltkraft beaufschlagt. Ermittelt wurde die Vergleichsspannung von Mises, welche mit der zulässigen Zugspannung von *Digital ABS* von 45 bis 60 MPa verglichen wurde<sup>4</sup>. Zudem wurde die Verformung der Formeinsätze analysiert.

In Anhang G3 werden die Lager- und Lastfälle sowie das Simulationsergebnis für die von Mises Vergleichsspannung am Beispiel der AT-Formeinsätze zur Herstellung des Tesla-Ventils dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die zulässige Spannung von *Digital ABS* größtenteils unterschritten wird. Es wird vermutet, dass das Auftreten einzelner, lokaler Spannungsmaxima, die über dem zulässigen Wert liegen, auf eine ungünstige Vernetzung, d. h. auf eine unzureichende Genauigkeit der Simulation zurückzuführen ist. Es ist an dieser Stelle ausdrücklich anzumerken, dass das hier gezeigte Vorgehen zur strukturmechanischen Simulation der AT-Formeinsätze sowie die Simulationsergebnisse nicht wissenschaftlich überprüft wurden. Im Rahmen der studentischen Workshops bot die Simulation jedoch ein Mittel zur Abschätzung von Belastungen auf die Formeinsätze, das gegenüber einer „reinen Vermutung“ als besser eingestuft wurde.

Weiterhin wurden die Simulationsergebnisse als initiale Parameter zur Einstellung der Spritzgussmaschine während des Abmusterungsprozesses in Phase 4 genutzt. Das Vorgehen zur Integration der Simulation in die Entwicklung von Formteil und Werkzeug wird schematisch in Abbildung 7.7 dargestellt.

---

<sup>4</sup> 45 bis 60 MPa entspricht der gemessenen Zugspannung im Temperaturbereich von ca. 25 °C bis 40 °C nach Mendible, Rulander und Johnston (2017, S. 346-347).

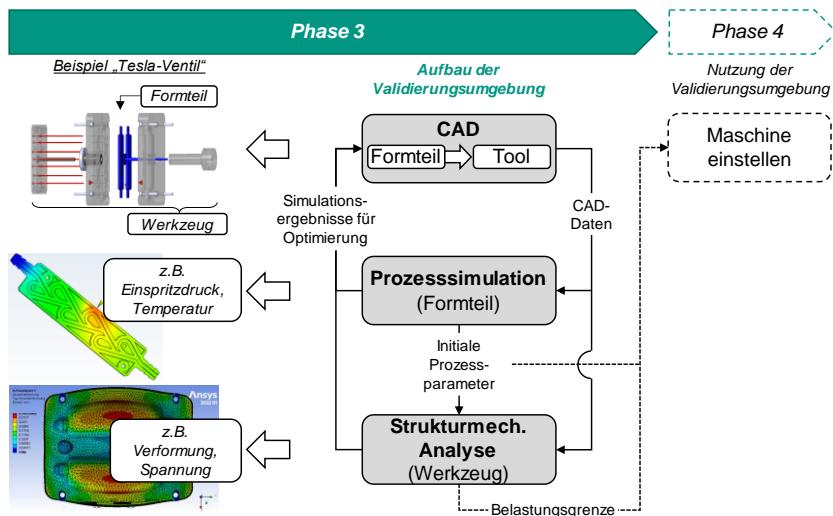


Abbildung 7.7: Schematische Übersicht zum Vorgehen der drei studentischen Teams in Phase 3 am Beispiel „Tesla-Ventil“ (in Anlehnung an Schrock et al., 2023)

Nachdem die Eignungsprüfung AT als Prototypingtechnologie bestätigte und das Formteil- und Werkzeugdesign als geeignet eingestuft wurden, erfolgte die additive Fertigung der Formeinsätze im Labor Rapid Prototyping an der Hochschule Offenburg auf dem 3D-Drucker J750. Die Fertigungsdaten können Anhang G4 entnommen werden.

#### 7.2.2.4 Phase 4: Nutzung der Validierungsumgebung

Die Nutzung der Validierungsumgebung begann mit dem Rüsten des Werkzeugs und der AT-Formeinsätze sowie dem Einstellen der Spritzgussmaschine. Vor der Produktion der Prototypenserie wurde ein Abmusterungsprozess, wie in Abschnitt 6.2.5 beschrieben, durchgeführt. Um die AT-Formeinsätze zu schonen, wurde mit niedrigen Prozesseinstellungen, insbesondere bei der Schließkraft, der Einspritzgeschwindigkeit und dem Nachdruck begonnen, welche schrittweise erhöht wurden, bis eine zufriedenstellende Teilequalität erreicht war. Zur Verkürzung des Abmusterungsprozesses wurden die zuvor generierten Simulationsdaten als Näherungswerte für die Einstellung der Parameter an der Spritzgussmaschine herangezogen. Da sich die mechanischen Eigenschaften von *Digital ABS* bei hohen Temperaturen rapide verschlechtern, wurde eine Druckluftkühlung eingesetzt. Damit wurde die Werkzeugoberfläche nach jedem Schuss auf eine Temperatur zwischen

30 °C bis 40 °C abgekühlt. Die Temperaturmessung erfolgte mit einer Thermografiekamera, so dass neben der Abkühlzeit des Formeinsatzes auch die Zeit bis zum Erreichen der Entformungstemperatur bestimmt werden konnte. Sobald eine ausreichende Teilequalität erreicht war, wurde mit der Produktion der Prototypenserie begonnen. Die zur Fertigung eingestellten Spritzgussparameter können Anhang G4 entnommen werden. Das Vorgehen zur Anwendung der Validierungsumgebung wird in Abbildung 7.8 schematisch dargestellt.

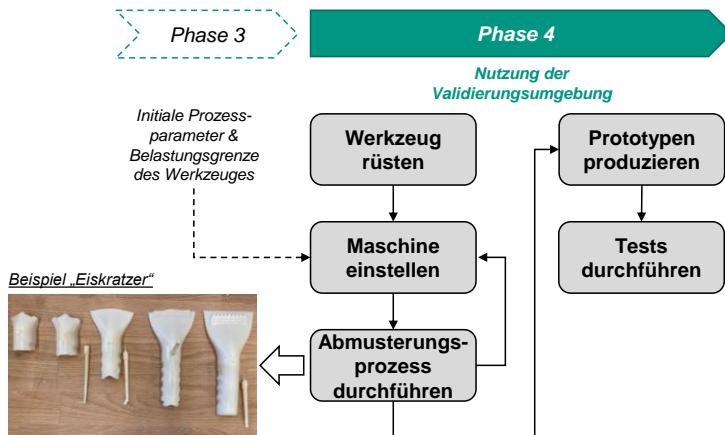


Abbildung 7.8: Vorgehen zur Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung in Phase 4 (Schrock et al., 2023)

Im letzten Schritt führten die Teams ihre Validierungs- und Verifizierungsaktivitäten anhand der zuvor definierten Testszenarien durch. Beispiele und Eindrücke aus dem Prototyping- und Validierungsprozess werden in Abbildung 7.9 vorgestellt.

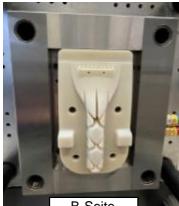
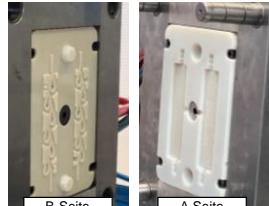
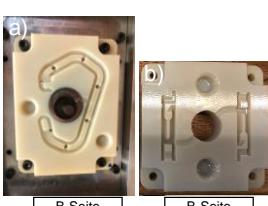
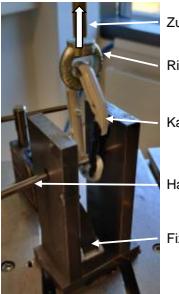
Eiskratzer	Tesla-Ventil	Karabiner (Form a & b)
 B-Seite	 B-Seite      A-Seite	 a) B-Seite      b) B-Seite
 AT Prototyp		
 Validierungsaktivität	 Wasserzulauf Speicher mit konst. Wasserlevel (1,25l) Anschluss- schlauch Tesla-Ventil Testvolumen (0,5l / 1l)	 Zugrichtung Ringmutter Karabiner Haltestange Fixierung

Abbildung 7.9: Beispiele und Eindrücke aus dem Prototyping- und Validierungsprozess: „Eiskratzer“ - Enteisung einer Autoscheibe (links); „Tesla-Ventil“ - Prüfung der Diodizität (Mitte); „Karabiner“ - Zugversuch (rechts) (Schrock et al., 2023)

### 7.2.2.5 Phase 5: Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Die Auswertung und Interpretation der Testergebnisse wurden selbstständig von den Teams und nach eigenem Ermessen durchgeführt. Einer Überprüfung und Bewertung der Validierungsergebnisse hinsichtlich ihrer Validität gegenüber dem Serienprozess konnte aus Zeit- und Kostengründen nicht durchgeführt werden. Stattdessen erfolgte eine abschließende Aktualisierung der Unsicherheitsbewertung, um das Erreichen der Validierungsziele und die Erfüllung der Kundenanforderungen zu bewerten. In diesem Zuge wurden auch mögliche Revisionen des Produkt- und

Werkzeugdesigns identifiziert. Während des Workshops wurde nach Abschluss von Phase 5 von jeder Gruppe mindestens eine Überarbeitung des Produkt- und Werkzeugdesigns vorgenommen, sodass eine Iteration der Phasen 3 bis 5 stattfand. Typische Überarbeitungsmaßnahmen waren etwa die Anpassung des Entformungswinkels, um eine leichtere Entformung zu erreichen, die Verringerung der Wandstärke des Produkts, um Einfallstellen und Verzug zu reduzieren, oder das Verrunden von Kanten, um die Haptik zu verbessern. Als Beispiel für das iterative Entwicklungsvorgehen sind die Entwicklungsgenerationen des „Eiskratzers“ mit Angabe der iterationsauslösenden Projektrolle in Anhang G5 dargestellt.

#### 7.2.2.6 Phase 6: Nachbereiten und Lernen

Den Projektabschluss bildete eine 45-minütige Abschlusspräsentation, in der auch Feedback zum Workshop gegeben wurde. Anschließend füllten die Studienteilnehmer die Fragebögen zur persönlichen Selbsteinschätzung und zur Bewertung der AT-Systematik aus (siehe Anhänge G1 und G2). Die Teilnehmer der Fachrichtung Maschinenbau reichten zudem einen zehnseitigen Projektbericht ein. Alle erzielten Ergebnisse wurden aufbereitet und in digitaler Form an die Workshopleitung übergeben. Mit Tabelle 7.3 wird eine Übersicht zu den dokumentierten Arbeitsergebnissen gegeben.

Tabelle 7.3: Übersicht über die von den Workshopteilnehmern dokumentierten Arbeitsergebnisse je Phase (in Anlehnung an Schrock et al., 2023)

Phase 1	Phase 2	Phase 3
<ul style="list-style-type: none"><li>•Kundenanforderungen und Lösungsansätze im House of Quality (HoQ)</li><li>•Priorisierte Validierungsziele mit Unsicherheitsbewertung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Filter-Fidelity-Model (FFM)</li><li>•Testszenarien und Testpläne</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•CAD-Daten und techn. Zeichnungen von Produkt und Werkzeug</li><li>•Ergebnisse der Prozesssimulation</li><li>•Ergebnisse der struktur-mech. Simulation</li><li>•STL-Daten für AM</li></ul>
Phase 4	Phase 5	Phase 6
<ul style="list-style-type: none"><li>•Abmusterungsbericht</li><li>•Einstellparameter für die Spritzgießmaschine</li><li>•Testergebnisse</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Interpretation und Evaluation der Testergebnisse*</li><li>•Maßnahmenplan für Iterationen*</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Abschlusspräsentation</li><li>•Projektbericht</li></ul>

\*Dokumentiert in Form der Abschlusspräsentationen und der Projektberichte.

### 7.2.3 Studienergebnisse

Die zu Beginn des Live-Labs durchgeführte Umfrage zur Selbsteinschätzung der Workshopteilnehmer zeigt, dass die Teilnehmer ihre Kompetenzen in den befragten Bereichen im arithmetischen Mittel über alle Kategorien mit  $\bar{x} = 2,52$  von 6,0 möglichen Punkten zwischen „eher gering“ bis „durchschnittlich“ einstuften. Insbesondere in den Kategorien „Methoden und Tools“ und „Additive Fertigung“ wurde die geringste Selbsteinschätzung ermittelt, sodass hier ein stärkerer Fokus auf Schulung und Unterstützung der Teilnehmer gelegt wurde. Zudem zeigt eine Betrachtung der Standardabweichung, dass die Selbsteinschätzung der Teilnehmer mit  $\sigma = 0,99$  variiert. Die höchste Streuung liegt mit  $\sigma = 1,59$  in der Kategorie „Additive Fertigung“ vor Workshopbeginn vor. Nach Durchführung des Workshops stuften die Teilnehmer ihre Kompetenzen mit  $\bar{x} = 4,02$  als „eher gut“ ein. Aus gesamtheitlicher Sicht entspricht dies einer durchschnittlichen Verbesserung von ca. 60 %. Die größten Verbesserungen wurden dabei in den vor Workshopbeginn schwächsten Kategorien „Methoden und Tools“ (+ 88 %) und „Additive Fertigung“ (+ 86 %) erzielt. Zudem näherten sich die Teilnehmer einem einheitlicheren Kompetenzprofil an, was sich aus der nahezu halbierten Standardabweichung mit  $\sigma = 0,54$  erkennen lässt. Die Umfrageergebnisse beider Befragungen zur Selbsteinschätzung werden in Abbildung 7.10 dargestellt.

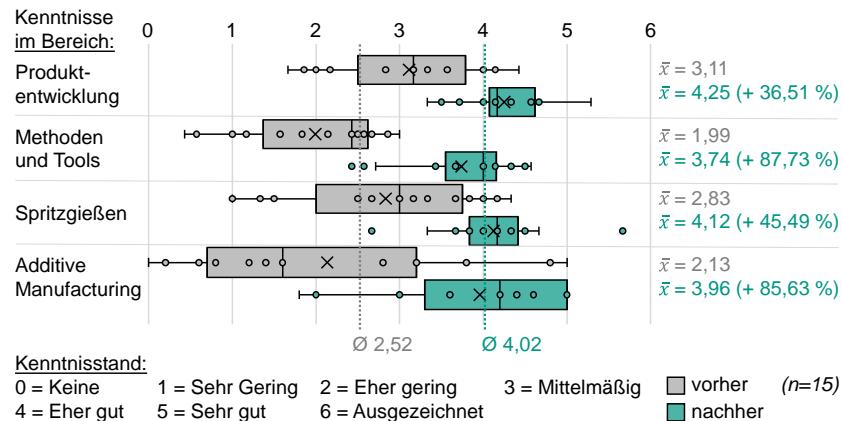


Abbildung 7.10: Selbsteinschätzung der Studienteilnehmer vor und nach dem Workshop „Additive Tooling“ (Schrock et al., 2023)

Wie gezeigt wurde, gelang es allen drei Teams, trotz der zunächst als „eher gering“ bis „durchschnittlich“ eingestuften Teilnehmerkompetenz, zu einem erfolgreichen Projektabschluss zu gelangen. So konnten in allen drei Fallstudien validierungsgeeignete Prototypen hergestellt, geplante Validierungsaktivitäten durchgeführt und damit die Unsicherheit<sup>5</sup> bezüglich des Erfüllungsgrads der Kundenanforderungen sowie der Realisierbarkeit der technischen Lösungskonzepte gesenkt werden. Zur Durchführung der Validierungsaktivitäten stellten die Teams zwischen 29 und 40 AT-Prototypen her, wobei Defekte oder Ausfälle der AT-Formeinsätze nur in geringem Umfang auftraten. Typische Abnutzungerscheinungen waren unter anderem das Ausbrechen von Ecken und Kanten sowie die Gelbfärbung der Formeinsätze an Hotspots, was auf eine Materialdegradierung durch Wärmeeintrag hindeutet. Lediglich der erste AT-Formeinsatz des Produktes „Eiskratzer“ versagte bereits nach fünf Zyklen. Hier wird vermutet, dass der Grund in einer fehlerhaft durchgeföhrten Nachbearbeitung der Bohrung für die Angussbuchse zu finden ist, da ein neu gefertigter Formeinsatz mit korrekter Durchführung der Nachbearbeitung intakt blieb.

Während der teilnehmenden Beobachtung, insbesondere während der Methodenschulung und daran anschließenden Projektmeetings wurde beobachtet, dass für einige Teilnehmer der Zweck einzelner Arbeitsschritte nicht sofort ersichtlich war. Dazu gehörte beispielsweise die Nutzung des HoQ zum Anforderungsmanagement und des FFM zur Bewertung und Auswahl passender Prototypen. Wie die initiale Selbsteinschätzung zeigt, lag zu Projektbeginn eine eher geringe Methodenkompetenz der Teilnehmer vor und das HoQ und das FFM waren nur unzureichend bekannt. Hauptsächlich zum Aufwand für die Erstellung des HoQ äußerten sich die Teilnehmer kritisch. Beide Methoden haben jedoch nach Aussage der Teilnehmer die Kommunikation im Team angeregt und verbessert. Darüber hinaus trugen sie dazu bei, ein gemeinsames Verständnis in Bezug auf das zu entwickelnde Produkt sowie in Bezug auf die Ziele und Probleme über die verschiedenen Rollen im Projekt hinweg zu entwickeln. Nach ihrer Anwendung wurden sowohl HoQ als auch das FFM positiv bewertet.

Nach Aussage der Teilnehmer war der AT-Konstruktionskatalog die zentrale Informationsquelle während des Entwicklungsprozesses für AT-spezifische Fragestellungen. Viele Gestaltungsempfehlungen konnten entweder direkt übernommen oder auf ihr Design übertragen werden. Gleicher gilt für die Referenzsystemelemente aus dem zur Verfügung gestellten Referenzwerkzeug „Zugprobe“ (vgl. Abschnitt 5.2). Probleme ergaben sich unter anderem aus mangelnder Erfahrung im Umgang mit der eingesetzten Software. So traten beispielsweise bei Team 3 Probleme beim Export der CAD-Daten auf, was zu Artefakten in der Druckdatei und zu verminderter Druckqualität führte. Eine Überprüfung der Daten vor der additiven

---

<sup>5</sup> Vgl. Unsicherheitsbewertung, siehe Abbildung 7.4, S. 183.

Fertigung, wie sie von erfahrenen Anwendern üblicherweise durchgeführt wird, hätte möglicherweise zu einer Identifikation dieser Artefakte geführt. Nach einer zwei- bis vierstündigen Schulung waren die Studierenden in der Lage, den eingesetzten 3D-Drucker zu bedienen und selbstständig AT-Formeinsätze herzustellen. Auf Basis dieser vergleichsweise leichten Erlernbarkeit lässt sich schließen, dass AT den Prozess zur Herstellung von Spritzgussformeinsätzen vereinfacht und somit auch für „Nicht-Experten“ zugänglich macht.

Die retrospektive Bewertung der Relevanz der sechs Phasen der AT-Systematik auf einer Likert-Skala von 0 („Stimme überhaupt nicht zu“) bis 3 („Stimme voll zu“) zeigt, dass diese von den Teilnehmern mit großer Zustimmung als überwiegend relevant eingestuft werden (siehe Abbildung 7.11).

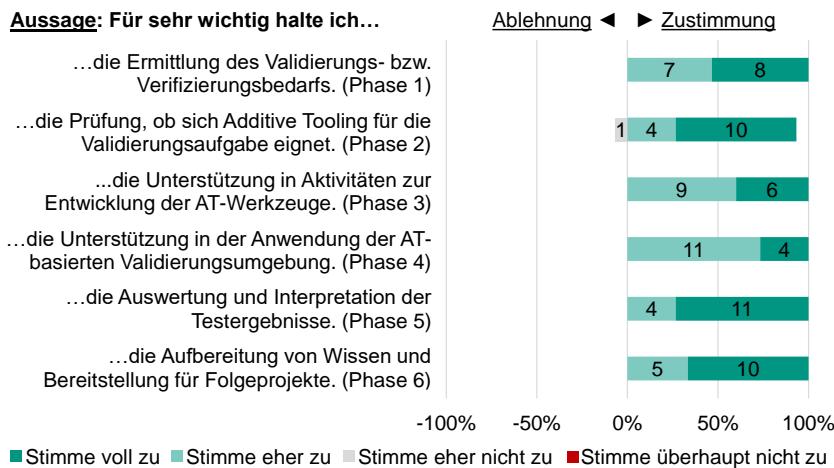


Abbildung 7.11: Retrospektive Bewertung der Relevanz der sechs Phasen der AT-Systematik aus Probandensicht (n = 15; Schrock et al., 2023)

Weiterhin erhielt die AT-Systematik überwiegend positive Resonanz hinsichtlich Unterstützungsleistung und Gestaltung. So gaben rund 87 % der Teilnehmer an, dass die AT-Systematik bei der Realisierung und Nutzung der Validierungsumgebung geholfen und wesentlich zum Projekterfolg beigetragen hat (siehe Abbildung 7.12). Zwar wurde die AT-Systematik retrospektiv als einfach zu verstehen und einfach anzuwenden bewertet, jedoch trug die durchgeführte Methodenschulung nach Angabe der Teilnehmer wesentlich zum Verständnis bei. Die Teilnehmer sehen Verbesserungspotenzial in der Gestaltung und visuellen Präsentation der AT-Systematik. Hier könnte eine Überarbeitung zu einer leichteren Zugänglichkeit und einem besseren Verständnis der durchzuführenden Phasen und Arbeitsschritte führen.

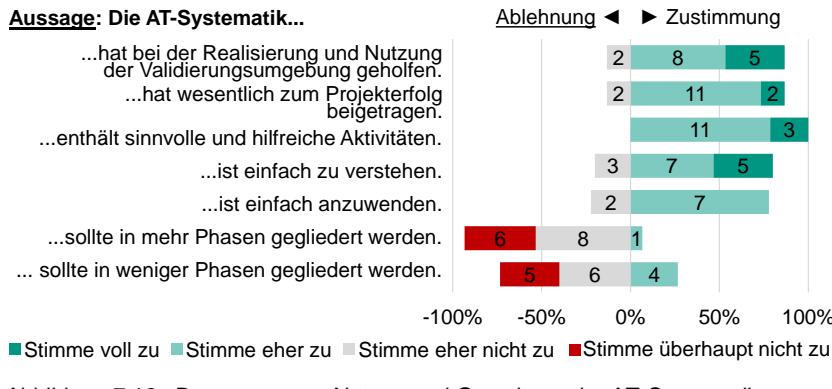


Abbildung 7.12: Bewertung von Nutzen und Gestaltung der AT-Systematik aus Probandensicht (n = 15; Schrock et al., 2023)

Da es sich beim „Workshop Additive Tooling“ um eine benotete Lehrveranstaltung handelte und bei insgesamt 15 teilnehmenden Studierenden nur drei Gruppen mit sinnvoller Gruppengröße gebildet werden konnten, war die Bildung von Kontrollgruppen nicht möglich. Somit lässt die Studie keine Aussage über den tatsächlichen Erfolgsbeitrag der AT-Systematik und der genutzten Hilfsmittel zu, da ein Vergleich mit und ohne Unterstützung nicht möglich ist. Jedoch bewerteten die Studienteilnehmer die AT-Systematik überwiegend positiv hinsichtlich ihrer Unterstützungsleistung und Anwendbarkeit. Aufgrund des praktischen Charakters des Live-Lab-Designs wird eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die industrielle Praxis erwartet. Eine Bewertung des Erfolgsbeitrages der AT-Systematik erfolgt anhand der Experteninterviews in Abschnitt 7.4 auf Basis dieser Live-Lab-Ergebnisse.

Im Anschluss an den Workshop wurde weiterhin ein retrospektiver Vergleich der Herstellkosten und Fertigungszeiten zwischen konventionellem Tooling (KT) und AT durchgeführt. Der Vergleich beruht auf einer Kosten- und Fertigungszeitschätzung des Projektpartners Braunform GmbH für das KT und der eigenständigen Kalkulation für das AT (die Kalkulation für das KT und AT kann Anhang G6 entnommen werden, kalkuliert wird ausschließlich die Fertigung der Formeinsätze ohne Zukaufteile). Daraus geht hervor, dass das AT in allen drei Fallstudien sowohl die kosten-günstigere (siehe Abbildung 7.13), als auch die schnellere (siehe Abbildung 7.14) Fertigungsalternative für die Formeinsätze darstellt. Wie ersichtlich wird, sind die Kosten für den Materialeinsatz für KT und AT in allen drei Fällen ähnlich hoch. Die Kostenunterschiede entstehen maßgeblich durch die höheren Fertigungskosten des KT. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die AT-Formeinsätze im Vergleich zu den KT-Varianten aus Stahl deutlich geringere Standzeiten aufweisen und nur mit

eingeschränkten Spritzgussparametern und Einschränkungen bei der Werkstoffauswahl eingesetzt werden können.

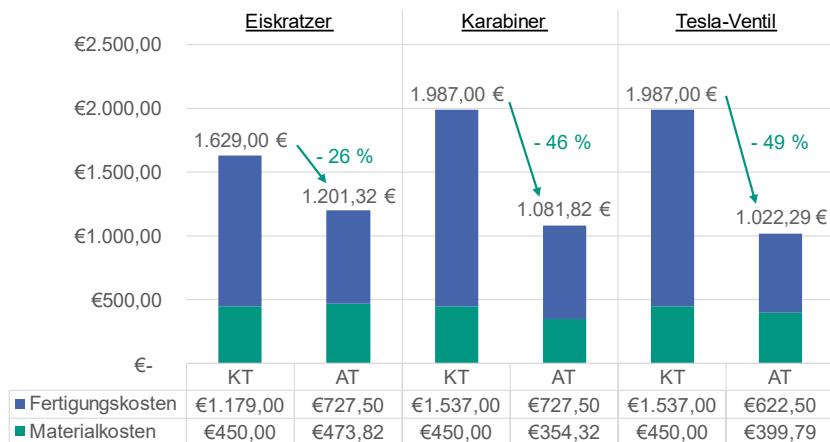


Abbildung 7.13: Vergleich der Herstellkosten zwischen konventionellem (KT) und additivem Tooling (AT) für die Fallstudien B bis D

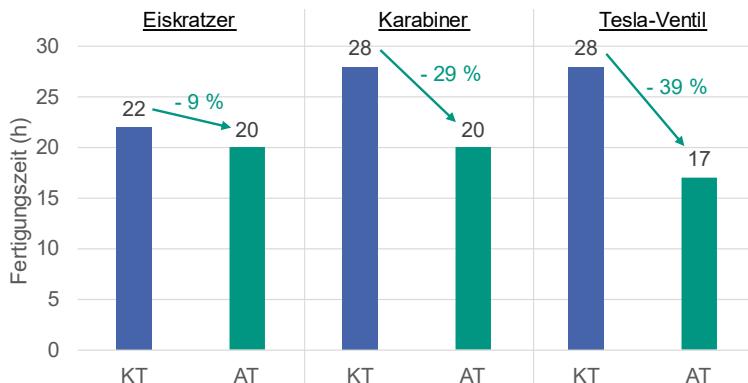


Abbildung 7.14: Vergleich der Fertigungszeiten zwischen konventionellem (KT) und additivem Tooling (AT) für die Fallstudien B bis D

## 7.3 Fallstudie E: „Benchmark-Bauteil“ und Interviewstudie 2

In Fallstudie E erfolgte eine praktische Anwendung der AT-Systematik im industriellen Entwicklungsumfeld, an die sich eine Interviewstudie anschloss. Die Fallstudie wurde zwischen dem 01.06.2022 und 01.09.2022 im Rahmen der studentischen, vom Verfasser co-betreuten Abschlussarbeit von Bühler (2022)<sup>6</sup> in Kooperation mit der Adolf Würth GmbH & Co. KG durchgeführt. Ziel der Fallstudie ist die Application- und Success-Evaluation der AT-Systematik durch praktische Methodenanwendung.

### 7.3.1 Studiendesign

Gegenüber dem Ziel der Methodenevaluation lag der Fokus der Adolf Würth GmbH & Co. KG (AWKG) im Wesentlichen darauf, die Eignung von AT als Prototyping-technologie für den internen Produktentwicklungsprozess (PEP) zu untersuchen. Ziel der AWKG ist also nicht die Durchführung einer Produktvalidierung, sondern die Evaluation von AT als Prototypingtechnologie für die Validierung im PEP. Um dies zu erreichen, war es notwendig, eine ganzheitliche Betrachtung der Ebenen *Produkt*, *Produktionssystem* und *Validierungssystem* vorzunehmen. Da die AWKG bislang noch wenig Erfahrung im Umgang mit AT besaß und einen systematischen Ansatz verfolgen wollte, wurde als Referenzprozess zur Durchführung der Entwicklungs- und Validierungsaktivitäten der in der AT-Systematik vorgeschlagene Referenzprozess herangezogen. Zur Durchführung der Studie wurde anstelle eines realen Produktes ein exemplarisches Musterbauteil („Benchmark-Bauteil“) entwickelt, mit dem die Umsetzung von für die AWKG relevanten Produkteigenschaften getestet werden konnten.

Üblicherweise wird der PEP innerhalb der AWKG derart umgesetzt, dass die Entwicklung des Produktes intern und die Entwicklung des Produktionssystems extern durchgeführt wird. Somit würden Tätigkeiten wie die Werkzeugkonstruktion, das Durchführen einer Prozess- oder Werkzeugsimulation, die Werkzeugfertigung, sowie die Abmusterung und Fertigung der Produkte oder Prototypen bei einem Dienstleister stattfinden. In dieser Studie wird jedoch die Bauteil- und Werkzeugkonstruktion, soweit möglich, AWKG-intern realisiert und operativ von Herrn Bühler durchgeführt. Die additive Fertigung der AT-Formeinsätze wird von der HS-Offenburg übernommen. Die Nachbearbeitung und Vermessung der Formeinsätze erfolgt innerhalb der AWKG. Während des Entwicklungsprozesses wird die AWKG von einem Dienstleister für Konstruktion, Werkzeugbau und Produktion unterstützt. Bei diesem Dienstleister wurde zudem in Kooperation die Werkzeug- und Prototypenfertigung durchgeführt.

---

<sup>6</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

Im Anschluss an die Anwendungsstudie wurden die Ergebnisse sowie die AT-Systematik mit Experten der AWKG (n = 5) diskutiert und von diesen innerhalb eines semi-strukturierten Interviews bewertet. Die Interviews wurden von Herrn Bühler gegen Ende seiner Abschlussarbeit geführt und richteten sich an Experten mit Erfahrung in der Entwicklung von Spritzgussbauteilen. In den semi-strukturierten Interviews waren sowohl offene Fragen für qualitative Antworten als auch zu bewertende Aussagen enthalten. Die Bewertung erfolgte jeweils auf einer vierstufigen Likert-Skala von „stimme überhaupt nicht zu“ bis „stimme voll und ganz zu“. Zudem war auch eine Enthaltung möglich. Vor der Bewertung wurden den Experten die AT-Systematik und die Arbeitsergebnisse der Fallstudie E vorgestellt. Daraufhin sollte die AT-Systematik hinsichtlich ihrer Relevanz, ihres Nutzens, ihrer Verständlichkeit und ihres Umfangs bewertet werden. Die Dokumentation der Interviews erfolgte in Form von schriftlichen Notizen während der Gespräche durch Herrn Bühler.

### 7.3.2 Studiendurchführung und Arbeitsergebnisse

Im Folgenden werden die Methodenanwendung und die relevanten Arbeitsergebnisse entlang der sechs Phasen der AT-Systematik anhand von Auszügen aus der Arbeit von Bühler (2022)<sup>7</sup> vorgestellt.

#### 7.3.2.1 Phase 1: Konkretisierung des Validierungsbedarfs

Im vorliegenden Fall war kein spezifisches Produkt zu entwickeln, sondern die Eignung von AT zur Validierung im PEP der AWKG im Allgemeinen zu prüfen. Daher wurde als genereller Validierungsbedarf die Untersuchung möglichst relevanter Produktmerkmale und -eigenschaften „typischer“ Produkte bzw. Formteile der AWKG mittels AT definiert. Dazu wurden zunächst Referenzprodukte aus dem Portfolio der AWKG ermittelt, hinsichtlich ihrer Gestalt analysiert und in den drei folgenden Kategorien mittels einer Nutzwertanalyse bewertet.

- 1) Konstruktionswissen: Stehen zur Realisierung des Merkmals bereits ausreichend Wissen oder Referenzen zur Verfügung?
- 2) Relevanz: Wie relevant ist das Merkmal für die internen Konstruktionsprozesse, gemessen an der Auftretenshäufigkeit des Merkmals?
- 3) Umsetzbarkeit: Wie sicher lässt sich das Merkmal mittels AT vermutlich realisieren?

Im Zuge der Bewertung wurden elf geometrische Merkmale, wie Schraubdome, Rippen und Beschriftungen identifiziert und die Materialien ABS und PP als besonders relevant eingestuft (Bühler, 2022, S. 19 f.). Die als relevant bewerteten Merkmale sollten im weiteren Verlauf konstruktiv in einem einzigen Bauteil abgebildet werden.

---

<sup>7</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

Das Ergebnis dieser Entwicklung ist das „Benchmark-Bauteil“ (im Folgenden auch als Formteil bezeichnet). Als zentrales Validierungsziel wurde die praktische Untersuchung der relevanten Merkmale hinsichtlich der generellen Realisierbarkeit, sowie die erreichbare Maßhaltigkeit, erreichbare Standzeiten und mögliche Fehlerbildder formuliert. Die Gestaltung von Test- und Prüfplänen wurde jedoch wenig konkret vorgenommen. Vielmehr bestand der Ansatz darin, auf Basis der experimentellen Untersuchung von AT explorativ Wissen über den AT-Prozess, die AT-Formeinsätze und die AT-Prototypen zu generieren.

### **7.3.2.2 Phase 2: Prüfung der Validierungsumgebung**

Da das zentrale Validierungsziel in der Evaluation von AT als Prototypingtechnologie lag, bestand nur eine eingeschränkte Notwendigkeit zur Durchführung von Phase 2. Eine Eignungsprüfung zur Absicherung von AT als geeignete Prototypingtechnologie, die initiale Bewertung der Wiedergabetreue und ein Vergleich zu anderen Prototypingtechnologien entfiel entsprechend. Stattdessen erfolgte die konstruktive Auslegung von Formteil und Werkzeug in Phase 3 entsprechend den Richtlinien und Informationen des AT-Konstruktionskataloges und der damit verknüpften Literaturdatenbank (siehe Abschnitte 6.3.2.1 & 6.3.2.3), sodass ein möglichst AT-gerechtes Design realisiert werden konnte. In den Fällen, in denen der AT-Konstruktionskatalog keine ausreichenden Informationen liefern konnte, wurde auf zusätzliche Literatur zurückgegriffen. Neben dem vermeintlich „idealen“ Design wurden zudem gezielt Abweichungen in das Formteil integriert, um „gutes“ und „schlechtes“ Design ermitteln zu können.

### **7.3.2.3 Phase 3: Aufbau der Validierungsumgebung**

Zum Aufbau der Validierungsumgebung stand der AWKG bereits ein Stammwerkzeug zur Verfügung. In einem ersten Schritt wurde daher mit der konstruktiven Anpassung dieses Stammwerkzeuges auf die aktuelle Aufgabenstellung begonnen. In die Planung und Konstruktion wurde auch das als Teil des Referenzsystems zur Verfügung stehende „Zugprobenwerkzeug“ der technischen Vorstudie (vgl. Abschnitt 5.2) miteinbezogen. Neben maßlichen Anpassungen wurde das vorhandene Werkzeug entsprechend dem Referenzwerkzeug um ein Auswerfersystem, eine An-gusshaltebuchse und Hinterlegeplatten zur Formeinsatzbefestigung ergänzt (Bühler, 2022, S. 25-28). Zu den angewandten Richtlinien aus dem AT-Konstruktionskatalog zählen unter anderem die Verwendung einer möglichst großen Entformschräge, die Beachtung des Aspektverhältnisses (Verhältnis von Höhe zu Durchmesser) von Schraubdomen, die Wandstärke von Rippen, sowie Empfehlungen für die Beschriftung (Bühler, 2022, S. 28-33). Das Formteildesign wurde anschließend durch eine Spritzgussprozesssimulation auf spritzgussgerechte Auslegung überprüft. Zudem wurden so bereits initiale Prozessparameter für den Spritzgussprozess ermittelt. Zur Konstruktion des AT-Formeinsatzes wurden unter

anderem Empfehlungen zur Dimensionierung des umlaufenden Randes, Aufmaße für Bohrungen und Bearbeitungszugaben für die mechanische Nacharbeit und das Anspritzen auf einen zentralen Auswerfer beachtet (Bühler, 2022, S. 33 f.). Eine strukturmechanische Simulation des Formeinsatzes zur Absicherung wurde aufgrund des als hoch eingeschätzten Aufwandes nicht durchgeführt. Stattdessen sollten Haltbarkeit und strukturelle Schwächen des AT-Formeinsatzes im praktischen Versuch ermittelt werden. Allerdings wurde zur Absicherung die auf den Formeinsatz wirkende mittlere Zuhaltkraft  $F_Z$  über Formel 6.1 berechnet (vgl. Absatz 6.2.3.1).

Daraus folgt für das Material *Polypropylen (PP)* (Bühler, 2022, S. 39; die vollständige Berechnung kann Anhang H entnommen werden):

$$F_Z \text{ (Mittel, PP)} = \left( \frac{3+6,5}{2} \right) \frac{kN}{cm^2} \times 48,36 \text{ cm}^2 \times 1 = 229,71 \text{ kN}$$

Da in den bis zu diesem Zeitpunkt bekannten Referenzprojekten Werkzeug-Zuhaltkräfte von bis zu 250 kN meist ohne Probleme auf die AT-Formeinsätze gewirkt haben, wurden die Erfolgsaussichten für das aktuelle Werkzeugdesign als gut eingeschätzt und auf eine weitere Eignungsprüfung verzichtet. Anschließend erfolgten die additive Fertigung der AT-Formeinsätze aus *Digital ABS* und die Durchführung erforderlicher Nacharbeitsschritte wie das Entgraten von Kanten und Reiben von Bohrungen (Bühler, 2022, S. 39-43). Parallel erfolgte die Anpassung des Stammwerkzeuges vom kooperierenden Dienstleister. Das finale Bauteil- und Werkzeugdesign ist in Abbildung 7.15 und Abbildung 7.16 dargestellt.

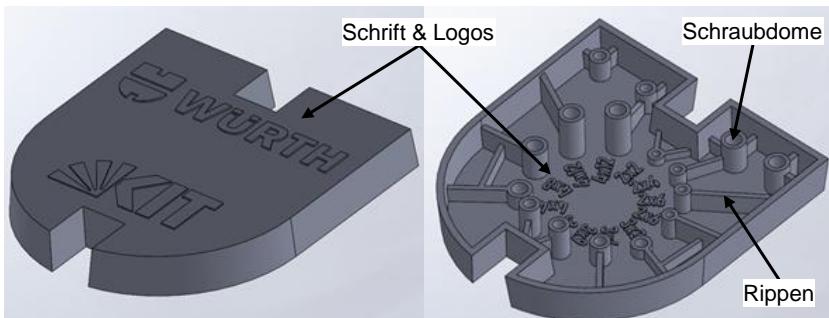


Abbildung 7.15: „Benchmark-Bauteil“ mit Darstellung der relevanten Untersuchungsmerkmale (in Anlehnung an Bühler, 2022)

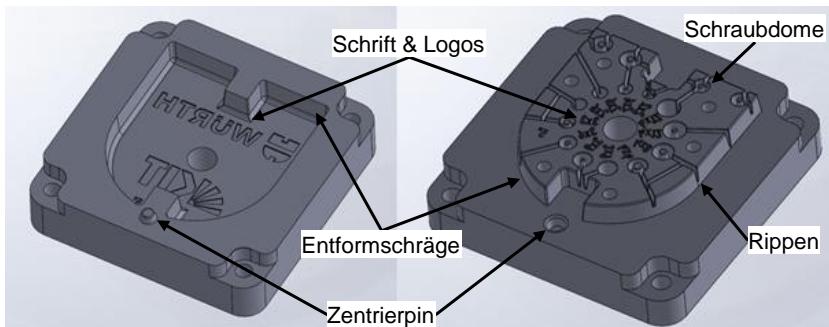


Abbildung 7.16: Werkzeugdesign mit Darstellung der relevanten Untersuchungsmerkmale (in Anlehnung an Bühler, 2022)

#### 7.3.2.4 Phase 4: Nutzung der Validierungsumgebung

Zur Vorbereitung auf den Spritzgussprozess wurden die Prozessparameter der Spritzgussprozesssimulation, sowie Werte und Parameter der Referenzprojekte aus dem AT-Konstruktionsleitfaden und einschlägiger Literatur herangezogen. Die Werkzeugkühlung erfolgte ausschließlich durch Druckluft. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7.17 dargestellt.

Nach dem Rüsten des Werkzeuges wurde zunächst eine praktische Füllstudie als Teil des Abmusterungsprozesses durchgeführt. Entsprechend den Empfehlungen aus dem Anwendungsteil des AT-Konstruktionskatalogs wurde ein schrittweises Herantasten an die gewünschte Bauteilqualität vorgenommen (Bühler, 2022, S. 45-47). Zu Prozessbeginn wurde zunächst die berechnete minimale Zuhaltkraft eingestellt. Zudem wurde mit einer Formfüllung von 30 % des ermittelten Bauteilvolumens begonnen. Für eine leichtere Entformung wurde vor dem ersten Schuss Trennmittel genutzt. Ab dem zweiten Schuss wurde das Einspritzvolumen schrittweise von 70 % auf 90 % erhöht, ehe mit geringem Nachdruck für eine kurze Nachdruckdauer begonnen wurde. Anschließend wurden Nachdruck und Nachdruckdauer so lange erhöht, bis eine zufriedenstellende Bauteilqualität erreicht wurde. Dabei wurde auch die Zuhaltkraft auf 250 kN erhöht. Die Ermittlung der Kühlzeiten fand mittels einer Thermographiekamera statt, wodurch auch die Ermittlung von Hot-Spots möglich war. Schließlich erfolgte die Produktion der Prototypenserie bei möglichst gleichbleibenden Prozessparametern. Insgesamt wurden 24 Teile aus PP hergestellt, wovon 19 für die weitere Vermessung verwendet und fünf Teile aufgrund unzureichender Füllung aussortiert wurden.

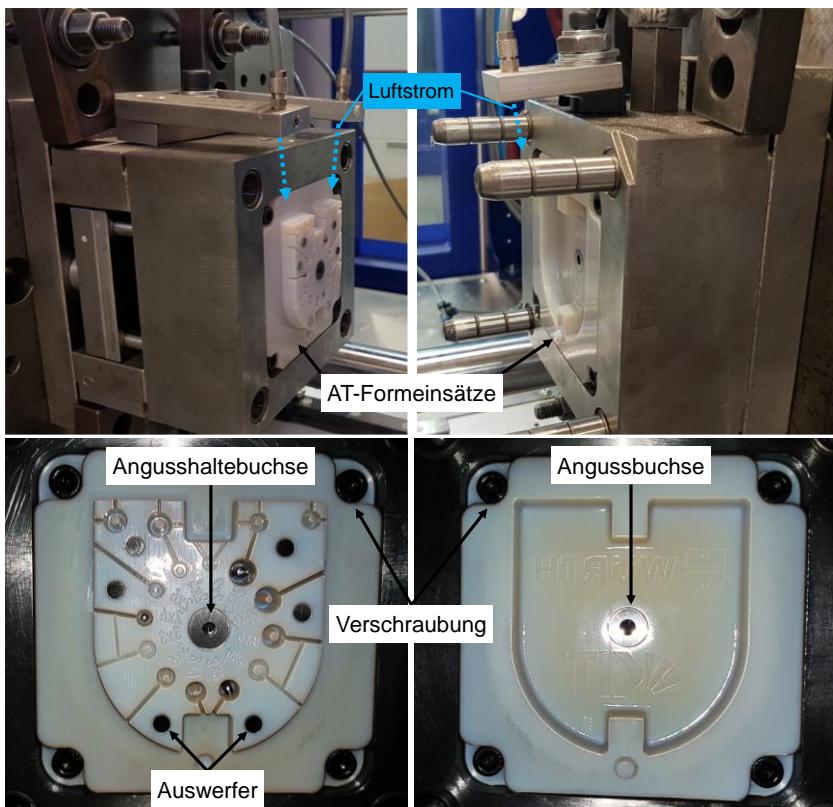


Abbildung 7.17: Gerüstetes Werkzeug mit AT-Formeinsätzen und Druckluftkühlung auf Auswerferseite (links) und Düsenseite (rechts) (in Anlehnung an Bühler, 2022)

### 7.3.2.5 Phase 5: Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Nach dem Spritzgießen der Prototypenserie fand die technische Bewertung der AT-Prototypen durch Sichtprüfung und Vermessen statt. Dabei wurde eine prinzipiell gute Realisierbarkeit der zu überprüfenden geometrischen Features mit Einschränkungen in der Maßhaltigkeit festgestellt. Zudem bildete sich die verhältnismäßig raue Oberflächenbeschaffenheit der AT-Formeinsätze auf den Formteilen ab. Dies führte zu hohen Entformungskräften und damit zu Weißbruch an der Angriffsfläche der Auswerferstifte. Abbildung 7.18 zeigt ein Exemplar aus der hergestellten Prototypenserie, an dem der Weißbruch deutlich zu erkennen ist.

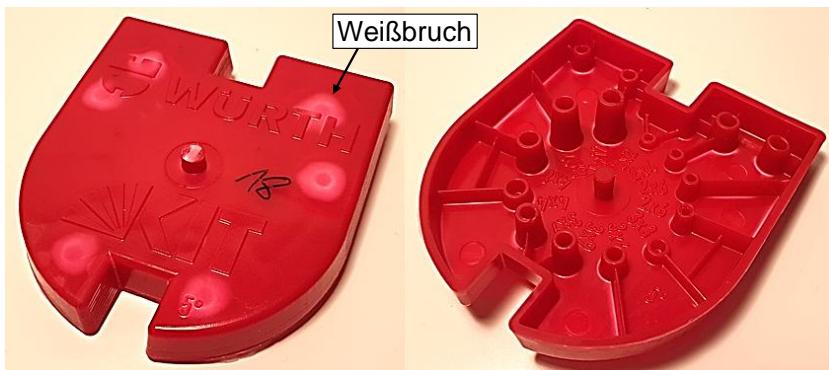


Abbildung 7.18: Mittels AT hergestellter „Benchmark-Bauteil“-Prototyp. Rechts: Düsenseite (A-Seite), Links: Auswerferseite (B-Seite)

### 7.3.2.6 Phase 6: Nachbereiten und Lernen

Die vollständige Dokumentation des Entwicklungsprozesses und der erzielten Ergebnisse erfolgte durch Verschriftlichung der Abschlussarbeit von Bühler (2022). Zudem wurden Projektdaten wie CAD-Dateien, Simulationsdaten, Fertigungssparameter usw. als Anhang übergeben, sodass diese für zukünftige Projekte als Referenz zur Verfügung stehen. Im Zuge der praktischen Anwendung und Untersuchung des AT wurden zahlreiche, insbesondere technische Beobachtungen und Probleme dokumentiert, zu denen teilweise bereits Verbesserungsmaßnahmen festgehalten wurden. Da diese hier nicht in Gänze aufgeführt werden können, werden im Folgenden exemplarisch zwei dieser Beobachtungen vorgestellt.

- Beobachtung 1: Durch den Einsatz der Thermographiekamera wurde erkannt, dass der nahezu parallel zur Formeinsatzoberfläche verlaufende Luftstrom der Druckluftkühlung kaum oder nur sehr schlecht in schmale und tiefe Formgeometrien eindringen konnte, wodurch es zur Bildung von Hot-Spots kam. Es wird angenommen, dass die Formeinsätze durch eine frontale Anströmung zuverlässiger gekühlt werden könnten. (Bühler, 2022, S. 46 & S. 53)
- Beobachtung 2: Der auftretende Weißbruch wird maßgeblich auf die notwendige Entformungskraft, aufgrund der zahlreichen Kerne und des durch die additive Fertigung entstandenen Treppenstufen-Effektes an den Wänden, zurückgeführt. Durch die Verwendung von Formtrennmittel konnte dieser jedoch bereits während der Versuchsdurchführung reduziert werden. (Bühler, 2022, S. 55)

### 7.3.3 Studienergebnisse

Die Beschreibung der Studiendurchführung und der Arbeitsergebnisse zeigt, dass, abweichend von Phase 2 „Validierungsumgebung prüfen“, im Kern alle Phasen der AT-Systematik durchlaufen wurden. Anhand der erzielten Arbeitsergebnisse wurde gezeigt, dass das AT im vorliegenden Fall erfolgreich eingesetzt werden konnte. Es wurden 24 Formteile, davon 19 validierungsgesuignete Prototypen, aus PP ohne Versagen des AT-Formeinsatzes hergestellt. Vom Anwender der AT-Systematik wurde folgende Äußerung festgehalten:

*„Das systematische Vorgehen anhand der AT-Systematik und die vorgestellten Methoden konnten bei der Umsetzung des Benchmarkteils unterstützen. Der Konstruktionsleitfaden und die dazugehörige Literaturdatenbank konnten sowohl während der Konstruktion als auch bei der nachfolgenden Werkzeugabmusterung durch die geordnete Darstellung relevanter Informationen Unterstützung bieten. Das zentrale Validierungsziel der AT-Systematik für den Durchlauf des fiktiven Entwicklungsprozesses, die Anwendbarkeit des AT-Prozesses zu untersuchen, konnte durch die erfolgreiche Umsetzung des Benchmarkteils erreicht werden.“ (Bühler, 2022, S. 57f.)*

Basierend auf dieser Einzelaussage bot die AT-Systematik eine ausreichende Anwenderunterstützung für die Nutzung des AT und das Erreichen des Validierungsziels. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass aus den zur Verfügung gestellten Hilfsmitteln und Referenzen zahlreiche Empfehlungen und Best-Practice-Lösungen übernommen werden konnten. Allerdings ist anzumerken, dass die operative Anwendung der AT-Systematik hier weitestgehend von einer studentischen Einzelperson vorgenommen wurde. Ausnahmen bilden jedoch Absprachen zu wichtigen Entscheidungen mit den Betreuern und Mitarbeitern der AWKG, die Werkzeugfertigung und die praktische Durchführung der Anwendung im Spritzgießen.

In der sich an die Anwendungsstudie anschließende Interviewstudie befragte Bühler fünf Experten (E1 bis E5) der AWKG aus dem Bereich der Spritzgussentwicklung (Bühler, 2022, S. 64-70). Aus der Befragung ergab sich, dass nur einer von fünf Experten (E5) bereits Erfahrungen mit AT vorweisen kann. Alle Experten schätzen, dass sie von den Möglichkeiten des AT zur Produktvalidierung profitieren könnten und können sich vorstellen, AT in einem zukünftigen Projekt einzusetzen (E1-E5). Dies begründet sich insbesondere darin, dass sich durch Simulation oder additiv gefertigte Prototypen bestimmte Produkteigenschaften, insbesondere Materialeigenschaften, nur unzureichend untersuchen lassen. Die wesentlichen Vorteile von AT sehen die Experten in der Verwendung des Zielmaterials (E1, E4), der Vermeidung initial hoher Investitionskosten für die seriennahe Prototypenfertigung (E1, E3) und zeitlicher Vorteile (E1, E3, E4).

Anhand der Befragung wurde ermittelt, dass die Experten das Durchlaufen aller sechs Phasen der AT-Systematik zur Durchführung von AT-Projekten zur Produktvalidierung überwiegend als relevant erachteten. Insbesondere die mit Phase 5 durchzuführende *Auswertung und Interpretation der Testergebnisse* erhielt volle Zustimmung (U5). Jeweils eine Enthaltung zu U2, U3 und U4 kam zustande, da die Phasen 2, 3 und 4 aus Sicht von E2 nicht AWKG-intern durchgeführt würden. Die Aufbereitung von Wissen (U6) wird ebenfalls überwiegend als wichtig erachtet, jedoch sieht E2 hier eher das persönliche Lernen anstelle einer spezifischen Dokumentation im Vordergrund und stimmt daher „eher nicht zu“. Die Aussagen zur Relevanz der sechs Phasen der AT-Systematik und ihre Bewertung sind in Tabelle 7.4 festgehalten.

Tabelle 7.4: Bewertung der Relevanz der sechs Phasen der AT-Systematik für die Durchführung von Fallstudie E (in Anlehnung an Bühler, 2022)

<u>Aussage:</u>	stimme überhaupt nicht zu (0)	stimme eher nicht zu (1)	stimme eher zu (2)	stimme voll und ganz zu (3)	Enthaltung
Für sehr wichtig halte ich die ...					
(U1) ... Ermittlung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs. (Phase 1)			••	•••	
(U2) ... Prüfung, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet. (Phase 2)			•	•••	○
(U3) ... Unterstützung in Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge. (Phase 3)		•		•••	○
(U4) ... Unterstützung in der Anwendung der Validierungsumgebung. (Phase 4)		•		•••	○
(U5) ... Auswertung und Beurteilung der Testergebnisse. (Phase 5)				••• ••	
(U6) ... Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte. (Phase 6)		•		••••	

(●/○ = abgegebene Stimme, n = 5)

Bis auf eine Enthaltung wird die AT-Systematik von allen Experten als hilfreich für den Aufbau und die Nutzung einer Validierungsumgebung mit AT-Anwendung sowie für die erfolgreiche Durchführung eines AT-Projektes angesehen (siehe Aussagen 1 und 2). Auch die empfohlenen Aktivitäten werden überwiegend positiv bewertet (siehe Aussage 3). E2 wünscht sich jedoch eine noch anwendungsspezifischere

Auslegung der Aktivitäten. Weiterhin wurde Kritik an der Verständlichkeit und Gestaltung geäußert, welche sich in einer zu komplexen Sprachwahl und Darstellung begründet (E1, E2, E4; siehe Aussage 4). Nach Ansicht der Befragten sollte die AT-Systematik nicht in mehr, sondern tendenziell eher in weniger Phasen gegliedert werden (siehe Aussagen 5 und 6). E2 meint, dass die Phasen 1 und 2 zusammengelegt werden sollten, sodass simultan zur Konkretisierung der Validierungsziele die Validierungstechnologie festgelegt wird. Weiterhin beschreibt Bühler (2022, S. 69), dass die Experten überwiegend keinen weiteren Unterstützungsbedarf sehen. Der mit der AT-Systematik vorgeschlagene Prozess sei schlüssig und stelle eine gute Möglichkeit zur Orientierung dar (E5). Die Bewertung der AT-Systematik durch die Experten anhand der von Bühler vorformulierten Aussagen ist in Tabelle 7.5 dargestellt.

Tabelle 7.5: Bewertung der AT-Systematik durch Experten im Kontext von Fallstudie E „Benchmark“ (in Anlehnung an Bühler, 2022)

<u>Aussage:</u>	stimme über-haupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme eher zu	stimme voll und ganz zu	Enthal-tung
(1) Die empfohlene systematische Vorgehensweise würde bei der Realisierung und Nutzung der Validierungsumgebung helfen.			••	••	○
(2) Die empfohlene systematische Vorgehensweise würde wesentlich zum Projekterfolg beitragen.			•	••••	
(3) Die in der Systematik empfohlenen Aktivitäten sind sinnvoll und hilfreich.		•	•••	•	
(4) Die Systematik ist einfach zu verstehen.	•	•	••	•	
(5) Die Systematik sollte in mehr Phasen gegliedert werden.	•	••••			
(6) Die Systematik sollte in weniger Phasen gegliedert werden.		••	••	•	

(•/○ = abgegebene Stimme, n = 5)

Es bleibt jedoch kritisch anzumerken, dass die Befragten der Interviewstudie die zu evaluierende AT-Systematik nicht selbst angewendet haben und anstelle einer ausführlichen Methodenschulung lediglich eine Einführung durch den Verfasser der Abschlussarbeit erhielten.

## 7.4 Interviewstudie 3 - Methodenevaluation

Die Interviewstudie zur Methodenevaluation wurde mit elf Experten aus den Bereichen Produktentwicklung, Werkzeug- und Formenbau, sowie Spritzguss und Kunststoffverarbeitung durchgeführt. Ziel der Studie war die Bewertung der AT-Systematik und der selbst generierten Hilfsmittel hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, ihrer Unterstützungsleistung und ihrem Erfolgsbeitrag in der industriellen Praxis. Zudem sollten mögliche Verbesserungspotenziale identifiziert werden.

### 7.4.1 Studiendesign

Die Interviewstudie zur Bewertung der AT-Systematik und der entwickelten Hilfsmittel wurde online in Form von Experteninterviews mit strukturierten und semi-strukturierten Anteilen durchgeführt. Die Befragung erfolgte durch den Verfasser dieser Arbeit. Vor der Befragung wurde den Befragten die AT-Systematik und die selbst entwickelten Hilfsmittel in Form einer 35-seitigen Präsentation vorgestellt. Nach einer allgemeinen Vorstellung der AT-Systematik, die eine Erläuterung von Zweck, Aufbau und Anwendungsbereich enthielt, erfolgte eine spezifische Vorstellung anhand von Praxisbeispielen. Dazu wurde das systematische Vorgehen innerhalb der AT-Systematik phasenweise anhand von Auszügen aus den Arbeitsergebnissen der Fallstudien A bis D (vgl. Abschnitte 6.4 & 7.2) erläutert. Damit wurde das Ziel verfolgt, den Experten einen ersten und zugleich möglichst umfangreichen Überblick über die Anwendung der AT-Systematik zu geben und sie damit in die Lage zu versetzen, eine möglichst fundierte Bewertung vornehmen zu können. Während der Präsentation waren Rückfragen durch den Befragten jederzeit möglich und explizit erwünscht.

Im Anschluss an den Vorstellungsteil folgte der Bewertungsteil. Als Bewertungsgrundlage wurden die in Abschnitt 6.1.2 definierten Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U1-U6), die Anwendbarkeit (A1-A7) und den Erfolgsbeitrag (E1-E4) herangezogen. Zur Bewertung wurden Aussagen vorformuliert, welche auf einer vierstufigen Likert-Skala von „stimme nicht zu“ (= 0) bis „stimme voll zu“ (= 3) zu bewerten waren. Weiterhin wurde nach einer Einschätzung der Chancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT zur Validierung in der Produktentwicklung ohne und mit der AT-Systematik gefragt. Zu bewerten war dies auf einer sechsstufigen Ordinalskala von „sehr schlecht“ (= 0) bis „sehr gut“ (= 5). Abschließend wurden offene Fragen zur AT-Systematik gestellt. Der genutzte Fragebogen kann Anhang I1 entnommen werden. Die Dokumentation der Interviews erfolgte in Form einer Audio- und Videoaufnahme.

Es ist explizit zu betonen, dass die Evaluation der AT-Systematik hier nicht auf der praktischen Anwendung durch den Befragten, sondern auf Basis der Methoden-Vorstellung durch den Verfasser erfolgt. Entsprechend kommt der Expertise des Befragten ein hoher Stellenwert zu. Angesichts dessen wurden nur Experten befragt, die über eine langjährige Berufserfahrung verfügen oder die AT bereits in der Praxis eingesetzt haben.

Neben der Bewertung der vorformulierten Aussagen wurden innerhalb der Interviews auch zusätzliche Kommentare und Anmerkungen von den Experten, wie Lob, Kritik und Verbesserungsvorschläge abgegeben, welche teilweise zu neuen Einsichten und zur Erschließung von Verbesserungspotenzialen führten. Diese wurden zur gesonderten Dokumentation entweder in vereinfachter Form transkribiert oder in zusammenfassende Aussagen überführt. Die aus Sicht des Verfassers relevantesten Aussagen werden im Rahmen der nachfolgenden Ergebnisbeschreibung sinngemäß wiedergegeben.

## 7.4.2 Studienergebnisse

Zwischen dem 05.12.2022 und 28.02.2023 wurden elf Experten (I1 bis I11) in zehn Interviews befragt<sup>8</sup>. Die Interviewdauer betrug zwischen etwa einer bis drei Stunden ( $\bar{\theta}$  1:48 h). Die Präsentationsdauer des Vorstellungsteils variierte je nach Umfang von Fragen und Diskussionen zwischen 36 und 85 Minuten. Eine Beschreibung des Expertenpanels mit Angabe der Branche, Art der Expertise und Berufserfahrung kann Anhang I2 entnommen werden.

### 7.4.2.1 Bewertung der Unterstützungsleistung (U)

Im ersten Abschnitt des Bewertungsteils erfolgte die Bewertung der Relevanz der sechs Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U), deren Ergebnisse bereits in Abschnitt 6.1.2.2 erwähnt wurden und die in Anhang E2 (siehe Abbildung E2.3) dargestellt sind. Alle Interviewten stimmten der Relevanz der Anforderungen an die Unterstützungsleistung „eher zu“ oder „voll zu“ (I1 bis I11).

Anschließend wurde von den Experten die Unterstützung der relevanten Anforderungen durch die AT-Systematik bewertet. Wie aus den in Abbildung 7.19 zusammengefassten Ergebnissen hervorgeht, stimmen die Experten den Aussagen zu U1 bis U4 „voll zu“ oder „eher zu“. Jedoch empfiehlt I10, die Materialauswahl für das Spritzgießen mit AT in den Phasen 2 und 3 konkret zu unterstützen. I4 und I8 sagen

---

<sup>8</sup> In einem Interview wurden aus Termingründen zwei Experten simultan befragt, die aber jeweils eine eigene Bewertung abgaben.

aus, dass der Unterstützungsbedarf unter anderem von der Komplexität des Produktes abhängt. Jeweils zwei Experten sehen keine ausreichende Unterstützungsleistung in den Anforderungen U5 und U6, was auf einen Verbesserungsbedarf in den Phasen 5 und 6 hindeutet. I6 schlägt vor, dass ein Bewertungstool zur Interpretation der Testergebnisse hilfreich wäre<sup>9</sup>. I8 bemängelt, dass keine spezifischen Maßnahmen oder Methoden zur Unterstützung von Phase 6 gegeben werden<sup>10</sup>. Gemäß dem Befragungsergebnis kann die Unterstützungsleistung der AT-Systematik als durchwegs gut eingestuft werden.

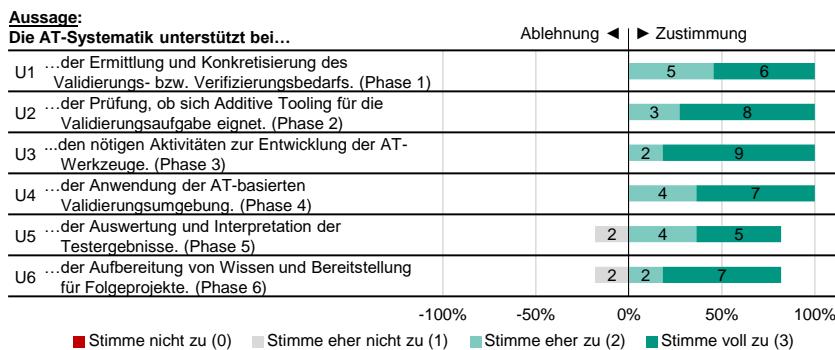


Abbildung 7.19: Bewertung der Unterstützungsleistung (U) der AT-Systematik

#### 7.4.2.2 Bewertung der Anwendbarkeit (A)

Hinsichtlich der Anwendbarkeit (A) der AT-Systematik wurde ebenfalls eine überwiegend positive Bewertung der Anforderungen A1 bis A7 ermittelt (siehe Abbildung 7.20). Bemängelt wurden jedoch teilweise die nicht einfache Verständlichkeit (A1) und das Aufwand-Nutzen-Verhältnis (A5) der AT-Systematik. I1 gibt an, dass die AT-Systematik „überladen“ wirkt, und empfiehlt die Entwicklung einer Hilfestellung zum einfacheren Einstieg (I1). I2 meint, dass der Detaillierungsgrad für die Anwendung durch Experten etwas „zu fein“ ist. Auch I6 rät von einer noch feineren Detaillierung ab. I7 und I11 sehen in der feinen Detaillierung jedoch den Vorteil, dass auch AT-Einsteiger mit AT zureckkommen. I2 geht zwar davon aus, dass für das leichte

<sup>9</sup> Als Maßnahme zur Berücksichtigung dieses Verbesserungsvorschlags wurde nachträglich das in Abschnitt 6.1.1.3 vorgestellte Template zur Abweichungsanalyse eingeführt (siehe Abbildung 6.10, S. 151).

<sup>10</sup> Aktuell sieht die AT-Systematik in Phase 6 bei Bedarf eine Optimierung des Referenzprozesses sowie die Pflege der Hilfsmittel AT-Checkliste, AT-DSM und AT-Konstruktionskatalog vor (vgl. Abschnitt 6.2.7).

Verstehen der AT-Systematik fachspezifisches Vorwissen notwendig ist, sieht die AT-Systematik aber dennoch als für Einsteiger geeignet an. I11 lobt den pyramidalen Aufbau der AT-Systematik, also dass diese vom überschaubaren Phasenmodell über die AT-Checkliste hin zu detaillierten Aktivitäten und Aufgaben führt. Ebenso wird die Rückverfolgbarkeit zur ursprünglichen Quelle des Wissens über die Literatur-Datenbank als positiv anerkannt (I11).

Mit am stärksten kommentiert wurde das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der AT-Systematik und damit einhergehend die Akzeptanz, wobei hier teils kontroverse Aussagen ermittelt wurden. Einige Experten sehen den Einarbeitungsaufwand in die vergleichsweise neue Anwendung des AT an sich, aber auch den erhöhten Aufwand für die Durchführung der vorgeschlagenen Prozessschritte, wie beispielsweise die Eignungsprüfung mittels Simulation oder die Parameteranalyse mittels AT-DSM als Faktoren, die die Akzeptanz von AT und der vorgestellten AT-Systematik in der industriellen Praxis senken (I3, I8, I9). I3 empfiehlt als Gegenmaßnahme entsprechende Schulungen, welche die Relevanz und den Nutzen der AT-Systematik und der Hilfsmittel aufzeigen. I8 sieht insbesondere das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der Simulation als unangemessen an, da auf Basis der aktuellen Datengrundlage keine ausreichende Validität der Simulationsergebnisse und somit nur eine geringe Aussagekraft bezüglich der erreichbaren Standzeit der AT-Werkzeuge erwartbar ist. Zudem schätzt I8 den Aufwand für die Durchführung der Simulation als ähnlich hoch ein, wie die Neufertigung eines AT-Formeinsatzes im Schadensfall. Entsprechend müsste zunächst eine Abwägung zwischen Trial-and-Error-Vorgehen und systematischer Eignungsprüfung stattfinden. I7 sieht jedoch einen großen Vorteil in der frühen Fehlerentdeckung und -eliminierung durch die Kopplung von Prozesssimulation und strukturmechanischer Simulation und vermutet, dass dadurch die Chancen für ein erfolgreiches AT gesteigert werden. I9 gibt an, dass die AT-Systematik gerade in der Integrationsphase des AT in ein Unternehmen eine umfassende Unterstützung bietet. I2 ist der Meinung, dass durch die Hilfestellung und die detaillierte Darstellung des Gesamtprozesses durch die AT-Systematik die Akzeptanz für AT erhöht wird.

Mit zunehmender Erfahrung der Anwender werden bestimmte Schritte und Werkzeuge, wie die Eignungsprüfung durch Simulation, ausgelassen (I9). Dies zeige sich nach Erfahrung von I9 auch in der industriellen Praxis beim konventionellen Tooling, wobei das Weglassen von Systematiken auf Basis von eigenen Erfahrungen wiederum zum Einschleichen von Fehlern führen kann. I9 vermutet, dass mit einer Verbesserung der AT-Technologie bestimmte Prozessschritte entfallen können und damit auch eine Verbesserung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses einhergeht.

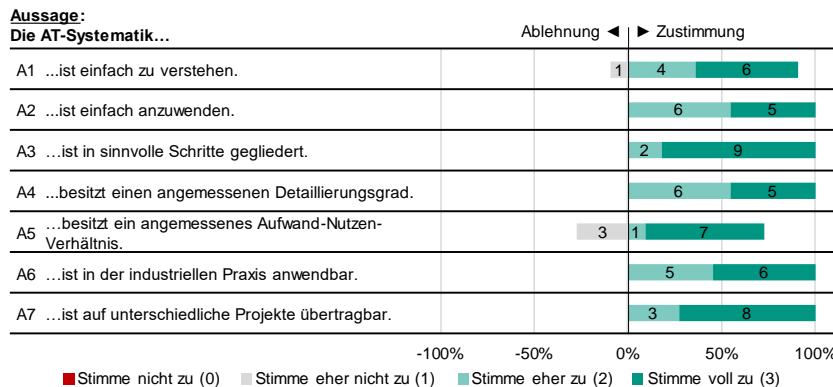


Abbildung 7.20: Bewertung der Anwendbarkeit (A) der AT-Systematik

#### 7.4.2.3 Bewertung des Erfolgsbeitrags (E)

Die Aussagen zur Erfüllung der Anforderungen an den Erfolgsbeitrag E1 bis E4 wurden zwar gänzlich mit Zustimmung bewertet (siehe Abbildung 7.21), allerdings wurden auch kritische Anmerkungen zur Erfüllung von E2 und E3 geäußert. So merkten I1, I8 und I11 an, dass es sicherlich noch weitere notwendige Aktivitäten oder notwendiges Wissen gibt, die noch nicht identifiziert wurden. Eine Angabe über die Vollständigkeit der notwendigen Aktivitäten oder des notwendigen Wissens für AT kann vor dem Hintergrund der zahlreichen möglichen Anwendungsfälle somit kaum gegeben werden. I2 betont die Wichtigkeit der AT-Systematik, da das AT einen neuen Gesamtprozess erfordert und sieht die AT-Checkliste, die AT-DSM und den AT-Konstruktionskatalog als wichtig für die Vermittlung des notwendigen Wissens an. Für I4 und I8 ist die Unterstützung in den Aktivitäten zur Entwicklung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung insbesondere bei geringen Vorkenntnissen erfolgsentscheidend, da ein schlecht konzipiertes AT-Werkzeug zum Scheitern aller weiteren Schritte führen kann. Insgesamt loben die Experten die systematische Vorgehensweise der AT-Systematik (I1, I2, I6, I9, I10). Sie sehen darin speziell den Vorteil, dass die Gefahr des Übersehens oder Übergehnens wichtiger für den Erfolg entscheidender Schritte verringert wird (I1, I2, I6, I9). I1 merkt positiv an, dass auch das Zusammenspiel verschiedener Konstruktions- und Fertigungsparameter berücksichtigt wird.

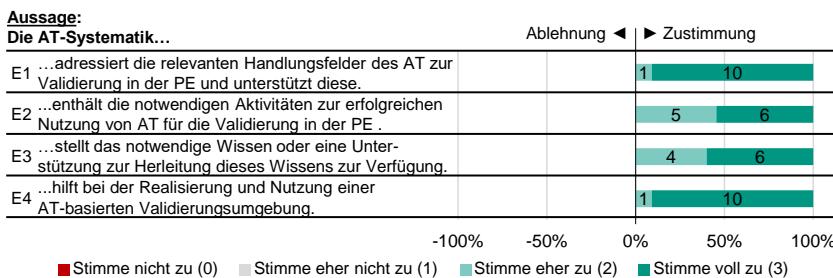


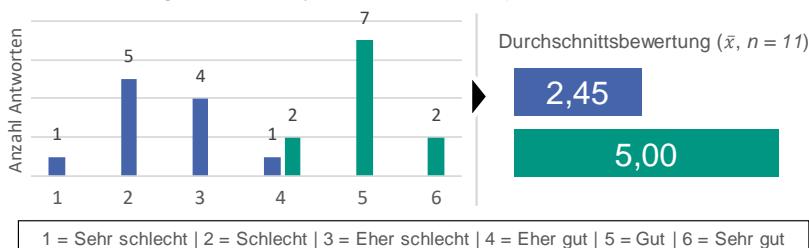
Abbildung 7.21: Bewertung des Erfolgsbeitrags (E) der AT-Systematik

Ohne eine Unterstützung schätzen die Experten ihre Erfolgschancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT im Durchschnitt ( $\bar{x} = 2,45$ ) als „eher schlecht“ bis „schlecht“ ein. I8 und I11 können dies mit eigenen Erfahrungen aus der Praxis begründen, da es bereits Versuche gegeben hat, AT in die Entwicklung zu integrieren. Dabei wurden einige Fehler gemacht, die nach Meinung der Experten durch ein Vorgehen nach der AT-Systematik ausgeschlossen oder vermieden worden wären. Zusammenfassend schätzen die Experten die Erfolgsaussichten mit der AT-Systematik und der empfohlenen Hilfsmittel zwischen „eher gut“ bis „sehr gut“ ein. Eine Übersicht zur Verteilung der Antworten und der Einschätzung der Erfolgschancen mit der AT-Systematik wird in Abbildung 7.22 gegeben.

Wie gut schätzen Sie Ihre Erfolgschancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT...

■ ...**ohne Unterstützung** ein?

■ ...**mit der vorgestellten AT-Systematik** und den empfohlenen Hilfsmitteln ein?

Abbildung 7.22: Experteneinschätzung zu Chancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT zur Validierung ohne und mit der AT-Systematik<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Streng genommen darf auf Basis ordinalskalierter Merkmale keine Durchschnittsberechnung stattfinden. Allerdings soll hier den ordinalskalierten Merkmalen ein gleichmäßiger Skalenabstand im Sinne einer Intervallskala zugrunde liegen (vgl. Schulnotensystem: Berechnung Notendurchschnitt).

#### 7.4.2.4 Bewertung der selbst generierten Hilfsmittel

Zur Bewertung der selbst generierten Hilfsmittel wurden die Experten gefragt, ob sie in dem jeweiligen Hilfsmittel einen Mehrwert sehen, ob sie es in der vorgestellten Form beibehalten oder verändern und ob sie es für den Einsatz von AT selbst nutzen würden. Wesentliche Kritikpunkte sehen die Experten generell in der zusätzlichen Integration weiterer Hilfsmittel in ihren Arbeitsalltag. Dennoch sehen die Experten mit überwiegender Zustimmung einen Mehrwert in den Hilfsmitteln und würden diese auch überwiegend für den Einsatz von AT nutzen (siehe Abbildung 7.23).

##### Aussage:

###### Ich bin der Meinung, dass...

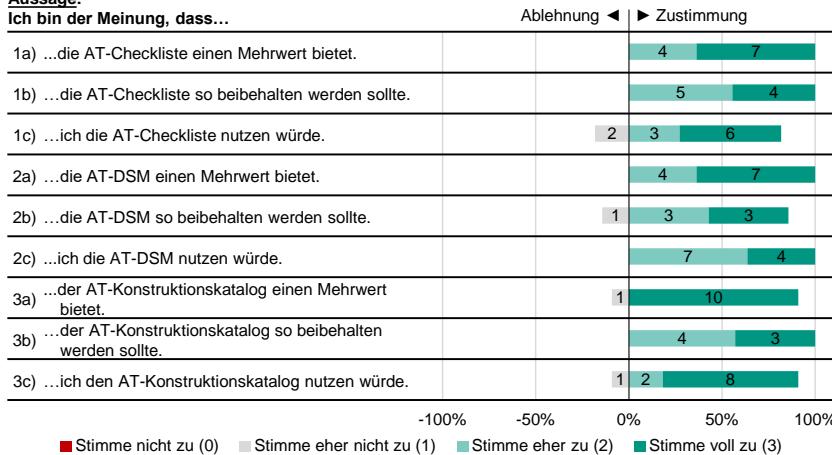


Abbildung 7.23: Bewertung der selbst generierten Hilfsmittel AT-Checkliste, AT-DSM und AT-Konstruktionskatalog (n=11)<sup>12</sup>

Der überwiegende Teil der Experten würde die Hilfsmittel in ihrer aktuellen Form beibehalten. I1, I3 und I11 merkten an, dass sich die Hilfsmittel im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses stets weiterentwickeln sollten. In der AT-Systematik wird dies bereits durch *Phase 6: Nachbereiten und Lernen* berücksichtigt. Auch wenn I9 die grundsätzliche Nutzbarkeit der AT-Systematik in der industriellen Praxis als gegeben ansieht, empfiehlt er, die Hilfsmittel in Anwendungen zu überführen, die einen geringeren Pflege- und Nutzungsaufwand aufweisen und projektübergreifend einsetzbar sind. I9 äußert dazu die Idee, Ansätze wie die AT-DSM weiterzuentwickeln und anstelle eines Excel-Tools eine vollwertige Applikation mit

<sup>12</sup> Aufgrund von Stimmenthaltungen wurden bei einigen Aussagen weniger als 11 Stimmen abgegeben.

Datenbank und einem lernenden System mit KI-Unterstützung zu entwickeln. Auf Basis der fortführend eingepflegten Daten könnte eine KI lernen und etwa Pfade und Datenverbindungen erkennen sowie Wahrscheinlichkeiten für Fehlermöglichkeiten und Probleme ermitteln. Die in MS-Excel umgesetzte AT-DSM wird bemängelt, da in der industriellen Praxis aus Sicht von I9 bereits zu viele Excel-Tabellen kursieren. I11 sieht die AT-DSM als hilfreich für die Auswertung und Interpretation der Testergebnisse an. I8 und I9 sehen den AT-Konstruktionskatalog aus Sicht der Konstruktionspraxis als sehr wichtig an. I8 vermutet weiterhin den Bedarf an zusätzlichen Konstruktionsrichtlinien. Als Verbesserungsmaßnahme für den AT-Konstruktionskatalog empfiehlt I9 eine dynamische, fallspezifische Darstellung der Konstruktionsempfehlungen. Lob erhielt die in Trello umgesetzte AT-Checkliste aufgrund der aus Expertensicht zeitgemäßen Darstellung und Funktion (I9, I10). Als entscheidenden Faktor für eine hohe Akzeptanz sieht I9 generell die leichte, unaufwändige Pflege und Nutzung potenzieller Hilfsmittel.

#### **7.4.2.5 Weitere Aussagen und Verbesserungsvorschläge**

I8 gibt an, dass die gezeigten Anwendungsbeispiele zwar interessant aber nicht sehr industrienah sind. Als Beispiele für diese Aussage führt I8 an, dass Bauteile in der Praxis oft deutlich komplexer sind, häufig Schieber zur Entformung zum Einsatz kommen und selten direkt angespritzt wird. Eine zusätzliche Unterstützungsmaßnahme wäre daher die Bereitstellung industrienaher Referenzprojekte, was jedoch aufgrund der Vielzahl möglicher Anwendungsfälle ein sehr aufwändiges Vorhaben darstellen würde.

I11 hält die AT-Systematik in der industriellen Praxis zwar prinzipiell für anwendbar, weist aber darauf hin, dass diese vermutlich auf die individuell bestehenden Entwicklungsprozesse angepasst werden muss. Er sieht die AT-Systematik als ein leistungsfähiges Grundgerüst, das von den Anwendern durch die Entwicklung von unternehmensinternen Referenzen, konkreten Parametern usw. in die Praxis integriert werden muss.

Als weitere unterstützende Methode schlagen I7 und I10 die Integration der in der industriellen Praxis weit verbreiteten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) vor. I9 und I11 sehen für eine weitere Ausgestaltung und Adaption der AT-Systematik jedoch die Unternehmen und Anwender in der Pflicht. I9 sieht die systematische Vorgehensweise der AT-Systematik im weiteren Sinne auch als passend für jede Form des Tooling.

## 7.5 Fazit zu Kapitel 7

In Kapitel 7 wurden die Ergebnisse der DS-II zur *Application- und Success-Evaluation* der AT-Systematik und ihrer Hilfsmittel vorgestellt. Die Evaluation wurde dabei im Rahmen von drei Anwendungsstudien mit anschließender Probandenbefragung (Fallstudien B - D, siehe Abschnitt 7.2), einer Anwendungsstudie mit anschließendem Experteninterview (Fallstudie E, siehe Abschnitt 7.3) sowie einem gesonderten Experteninterview (siehe Abschnitt 7.4) durchgeführt. Zur empirischen Bewertung wurden die in Abschnitt 6.1.2 definierten Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag* (E1-E4), die *Unterstützungsleistung* (U1-U6) und die *Anwendbarkeit* (A1-A7) herangezogen. Mit der Durchführung dieser Studien wurde die Forschungsfrage 3, sowie die untergliedernden Fragen FF3.1 bis FF3.3 beantwortet.

FF3: Welchen Beitrag leistet die erarbeitete Methode zur Nutzung der Potenziale des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung?

FF3.1: Ist die AT-Systematik praktisch anwendbar und wird sie vom Anwender akzeptiert? (gemessen an A1-A7)

FF3.2: Unterstützt die AT-Systematik in den relevanten Handlungsfeldern (H1-H3, siehe Abschnitt 6.1.1) des AT? (gemessen an U1-U6)

FF3.3: Unterstützt die AT-Systematik die erfolgreiche Anwendung von AT in der Produktvalidierung? (gemessen an E1-E4)

Im Folgenden werden die Knergebnisse der *Application- und Success-Evaluation* zusammengefasst und Limitierungen der Evaluationsstudien aufgezeigt.

In den vier Fallstudien B - E wurde gezeigt, dass die studentischen Probanden mit dem Vorgehen nach der AT-Systematik zu validierungsgeeigneten AT-Prototypen gelangten und ihre Validierungsziele erreichen konnten. Im Rahmen der Fallstudien B - D wurden innerhalb des *Live-Lab „Workshop Additive Tooling“* Entwicklungsprojekte mit realem Projektcharakter in Kooperation mit einem Industriepartner durchgeführt. Fallstudie E basiert auf einer studentischen Abschlussarbeit, welche direkt bei einem Industrieunternehmen durchgeführt wurde. Anhand praktischer Beispiele wurde gezeigt, wie die Probanden die AT-Systematik und die empfohlenen Hilfsmittel eingesetzt haben und wie diese im Zuge des systematischen Vorgehens die gestellte Entwicklungsaufgabe lösen und eine erfolgreiche Produktvalidierung durchführen konnten. Die Validität der Testergebnisse dieser Produktvalidierung konnte jedoch nicht überprüft werden, da dazu jeweils Vergleichsformteile mit Seriencharakteristik nötig gewesen wären.

Die überwiegend positive Bewertung der Anforderungen an den **Erfolgsbeitrag** (E1-F4) im Rahmen der Experteninterviews zeigt jedoch, dass die AT-Systematik aus Sicht der befragten Experten die erfolgreiche<sup>13</sup> Anwendung von AT in der Produktvalidierung in der industriellen Praxis unterstützt. In den Fallstudien B - D konnte weiterhin das Potenzial des AT für eine bis zu 39 % schnellere und bis zu 49 % kostengünstigere Formeinsatzfertigung aufgezeigt werden. Ob im Rahmen realer Entwicklungsprojekte tatsächlich diese Vorteile entstehen, kann durch diese Arbeit nicht beantwortet werden. Die Zeiten und Aufwände für die Anwendung der AT-Systematik flossen nicht in die Bewertung ein, da keine Vergleichsdaten zum konventionellen Vorgehen des KT vorlagen. Es kann jedoch angenommen werden, dass die Integration von AT in die Produktentwicklung und auch die ersten Anwendungsversuche mit der AT-Systematik einen zunächst erhöhten zeitlichen und finanziellen Aufwand verursachen. Wie bei jeder neuen Technologie und Methode ist auch bei der Anwendung von AT und der AT-Systematik eine gewisse Einarbeitungszeit erforderlich. Angesichts dessen erhielten die Studienteilnehmer auch eine Unterstützung durch den Autor dieser Arbeit. Diese wurde in Form von theoretischen Einweisungen und Schulungen zu AT und der AT-Systematik sowie der fortlaufenden Betreuung der Projektarbeiten gegeben. Es wird weiterhin deutlich, dass gerade bei ersten Anwendungen des AT die *Phase 6: „Nachbereiten und Lernen“* hohe Relevanz besitzt, da aufgrund der steilen Lernkurve ein großer Erkenntnisgewinn erzielt werden kann.

Mit der Bewertung der Anforderungen an die **Unterstützungsleistung** (U1-U6) wurde gezeigt, dass die AT-Systematik die relevanten Handlungsfelder *Eignung von AT sicherstellen* (H1), *Aufbau und Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung unterstützen* (H2) und *Interpretation der Testergebnisse unterstützen* (H3) weitestgehend unterstützt. Die Fallstudien zeigen, dass die Probanden sich weitestgehend an die zur Verfügung gestellte Vorgehensweise hielten und die empfohlenen Hilfsmittel einsetzten. Während der Interviews wurden vermehrt Aussagen aufgenommen, dass nicht nur die direkte Unterstützung der Handlungsfelder durch die sechs Phasen der AT-Systematik, sondern auch die systematische Vorgehensweise an sich die Anwendung von AT unterstützt. Die Bewertung der selbst generierten Hilfsmittel *AT-Checkliste*, *AT-DSM* und *AT-Konstruktionskatalog* ergab, dass die befragten Experten einen Mehrwert darin sehen und diese überwiegend auch selbst einsetzen würden.

Durch die Bewertung der Anforderungen an die **Anwendbarkeit** (A1-A7) wurde belegt, dass die AT-Systematik praktisch anwendbar ist und von den testenden Anwendern sowie von Experten weitestgehend akzeptiert wird. Neben der empirischen

---

<sup>13</sup> Vgl. Definition 6, Abschnitt 3.2, S. 79.

Bewertung durch die Befragung der Studienteilnehmer und Experten wird die Anwendbarkeit auch durch die erzielten Arbeitsergebnisse der Fallstudien A - E belegt. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Experten die AT-Systematik lediglich auf Basis einer Präsentation und Beispielen aus den Fallstudien bewerten konnten. Die Teilnehmer der Fallstudien B - E bewerteten die AT-Systematik und die empfohlenen Hilfsmittel überwiegend positiv und würden diese mehrheitlich auch wieder in ähnlichen Projekten anwenden. Kritisch anzumerken ist allerdings, dass aufgrund der Anzahl der Teilnehmer an den Studien die Bildung einer Kontrollgruppe nicht möglich gewesen ist. Zudem handelt es sich bei den Teilnehmern der Anwendungsstudien um Studierende mit teils geringer Praxiserfahrung. Es könnte argumentiert werden, dass die Studierenden weniger Erfahrung in der Durchführung von Entwicklungsprojekten und weniger Fachwissen vorweisen können als Entwickler mit langjähriger Berufs- und Praxiserfahrung, woraus sich ein anderer Unterstützungsbedarf gegenüber Anwendern aus der industriellen Praxis ergibt. Dass die studentischen Probanden trotz der geringen Erfahrung die angestrebten Entwicklungs- und Validierungsziele erreichen konnten, scheint allerdings für den Nutzen der AT-Systematik zu sprechen, da die Unterstützungsleistung umso höher sein müsste. Dies würde für einen zusätzlichen Mehrwert auf „Beginner“-Ebene sprechen. Zudem wurden Anwendbarkeit, Umfang, Nutzen und Aufbau der AT-Systematik auch von Experten als überwiegend positiv eingestuft. Die Befragung der Experten fand dabei in Form von semi-strukturierten Interviews statt.

Während der Interviewstudien wurden zudem verschiedene **Verbesserungspotenziale** identifiziert. Dazu gehört unter anderem die verbesserungswürdige Unterstützung in der Interpretation der Testergebnisse, woraufhin ein Template zur Analyse und Bewertung der Wiedergabetreue entwickelt wurde (vgl. Abschnitt 6.2.3.3, Abbildung 6.10). Aufgenommene Kritik bezog sich überwiegend auf die Verständlichkeit und das Aufwand-Nutzen-Verhältnis der AT-Systematik. Zur Verbesserung der Verständlichkeit wurde das Trello-Board der *AT-Checkliste* (siehe Abschnitt 6.3.1) um zusätzliche Erläuterungen ergänzt. Es wurde auch immer wieder festgestellt, dass die Befragten intuitiv auch die Anwendung des AT an sich und nicht nur die AT-Systematik bewerten wollten. Dabei sahen die Befragten das AT oft ebenso im Fokus der Befragung, wodurch sich eine fehlerhafte Bewertung der AT-Systematik ergeben hätte. Um dem entgegenzuwirken, erfolgte eine entsprechende Aufklärung durch den Interviewenden, dass die Möglichkeiten und Grenzen von AT durch den aktuellen Stand der Technik gegeben sind. Die Experten äußerten weiterhin, dass aufgrund der Vielzahl möglicher Anwendungsfälle beziehungsweise konstruktiver Gestaltungsmöglichkeiten keine vollständige Unterstützung des AT angeboten werden kann. Hier kann nach Ansicht des Verfassers nur durch permanente Erforschung des Forschungsfeldes „Additive Tooling“ und durch konstante Verbesserung und Pflege der zur Verfügung gestellten Hilfsmittel über einen längeren Zeitraum

nachgebessert werden. Die AT-Systematik ist in diesem Zusammenhang als systematisches Rahmenwerk zu sehen, welches einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess unterliegen sollte.

Aufgrund des Umfangs realer Entwicklungsprojekte und des damit verbundenen Aufwandes konnten bislang keine Feldstudien durchgeführt werden. Zudem konnten in den *Live-Lab* Studien aufgrund der Notenvergabe und unzureichender Teilnehmerzahlen keine Kontrollgruppen gebildet werden. Weiterhin unterscheiden sich die Entwicklungsaufgaben der studentischen Teams, sodass auch hier kaum eine Vergleichbarkeit der Gruppen möglich ist. Für eine genauere Evaluation der AT-Systematik könnte eine Wiederholung der Entwicklungsaufgaben, idealerweise mit Kontrollgruppen, sinnvoll sein, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Es wird auch empfohlen, die AT-Systematik auf lange Sicht in Feldstudien im Rahmen industrieller Entwicklungsprojekte zu evaluieren, wobei mit einem höheren Evaluationsaufwand zu rechnen ist. Da die Evaluation bislang weder in Feldstudien noch mit Kontrollgruppen vorgenommen wurde, ist sie als *initial* zu bezeichnen.<sup>14</sup>

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die AT-Systematik die erfolgreiche Anwendung von AT in der Produktvalidierung unterstützt. In den Fallstudien B - D wurde gezeigt, dass eine schnellere und kostengünstigere Werkzeug- und Prototypenfertigung erfolgen konnte. Durch das Studiendesign im *Live-Lab*-Format, die Einbindung von Kooperationspartnern aus der Spritzgussbranche und aufgrund der Aussagen von Experten wird eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die industrielle Praxis erwartet. Somit ist von einem positiven Beitrag zu einer effizienteren Produktvalidierung auszugehen.

Die dem Forschungsziel zugrunde gelegte **Forschungsthese** lässt sich auf Basis der zum aktuellen Stand lediglich *initialen* Evaluation und aufgrund der genannten Einschränkungen nicht gesichert verifizieren. Zwar zeigen die Ergebnisse der initialen Evaluation eine deutliche Tendenz in Richtung der Verifizierung der Forschungsthese, allerdings stellen insbesondere das Fehlen von Kontrollgruppen und die aus zeitlichen Gründen nicht durchführbare Evaluation in der betrieblichen Praxis eine erhebliche Unsicherheit dar. Für eine gesicherte Verifizierung wird daher zusätzlich eine *umfassende* Evaluation mit Kontrollgruppen und in Feldstudien empfohlen.

---

<sup>14</sup> „Eine initiale DS-II enthält alle Schritte einer umfassenden DS-II, jedoch in geringerem Umfang oder in weniger detaillierter Form.“ (Blessing und Chakrabarti (2009, S. 195 f.).

**Forschungsthese:** Die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten AT-Systematik unterstützt den Einsatz von Additive Tooling (AT) als Prototypingtechnologie in der Entwicklung von Spritzgussprodukten und fördert so die effiziente und kontinuierliche Validierung im Modell der SGE – System-generationsentwicklung.

# 8 Diskussion und Ausblick

In diesem letzten Kapitel werden zunächst die zentralen Arbeiten und Ergebnisse dieser Forschungsarbeit zusammengefasst und diskutiert (siehe Abschnitt 8.1). Anschließend wird in einem Ausblick auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten hingewiesen (siehe Abschnitt 8.2).

## 8.1 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Mit dem Stand der Forschung wurden zunächst wichtige Grundlagen und aktuelle Forschungsergebnisse der Forschungsfelder *Produktentwicklung*, *Spritzgießen* und *Additive Tooling (AT)* vorgestellt (Kapitel 2). Dabei wurde erläutert, dass die Validierung die zentrale Aktivität zur Wissensgenerierung innerhalb der Produktentwicklung darstellt und von Beginn an und kontinuierlich erfolgen muss. Zur Durchführung der Validierung werden Prototypen benötigt, die jedoch immer gewissen Einschränkungen unterliegen. Entsprechend dem Validierungsbedarf muss daher auf eine situationsadäquate Wiedergabetreue geachtet werden. Jedoch stehen in der Entwicklung von Spritzgussprodukten Prototypen mit einer hohen, seriennahen Wiedergabetreue in der Regel erst spät im Entwicklungsprozess zur Verfügung, was die frühe und kontinuierliche Validierung erschwert. Das AT ermöglicht, Prototypen im Zielmaterial und in der Ziel-Fertigungstechnologie herzustellen, wobei für das AT prinzipiell verschiedene AM-Technologien zur Verfügung stehen, die auf grundsätzlich unterschiedlichen Verfahrensprinzipien beruhen. Zur Eingrenzung wurde in dieser Arbeit daher der Fokus auf AM-Verfahren des lichtreaktiven Photopolymer-Aushärtens gelegt. Diese Verfahren bieten das Potenzial, Prototypen kostengünstiger und schneller als mittels konventionell gefertigter Werkzeuge und mit einer höheren Wiedergabetreue als mittels Rapid Prototyping herzustellen.

Wie die vorgestellten Studien zeigen, führt das AT jedoch auch zu diversen technischen Herausforderungen. So unterscheidet sich der Herstellprozess zwischen der konventionellen, in der Regel subtraktiven, Werkzeugherstellung und dem AT grundlegend. Weiterhin führen die beim AT eingesetzten Photopolymere zu geringeren Werkzeugstandzeiten, zumeist abweichenden Spritzgießparametern und damit unter Umständen auch zu abweichenden Formeileigenschaften gegenüber dem konventionellen Tooling (KT). Die bisherige Forschung zu AT hat sich mit verschiedenen wirtschaftlichen und technischen Untersuchungsschwerpunkten befasst, ist jedoch fragmentiert und ihre Ergebnisse basieren vorwiegend auf spezifischen Anwendungsfällen oder Experimenten (siehe Abschnitt 2.3.4). Allerdings stellen diese

Forschungsergebnisse wertvolle und relevante Referenzsystemelemente im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung dar.

Ein ganzheitlicher, systematischer und zugleich generischer Ansatz zur Unterstützung potenzieller Anwender bei der Nutzung von AT für die Validierung in der Produktentwicklung existierte bisher nicht. Weiterhin wurde deutlich, dass für eine erfolgreiche Anwendung von AT spezifisches Fachwissen erforderlich ist. Andernfalls ist es schwierig, AT technisch und wirtschaftlich sinnvoll einzusetzen, und es besteht die Gefahr, die Validierungsergebnisse falsch zu interpretieren. Entsprechende Fachliteratur zu AT für eine praxisnahe Anwenderunterstützung oder eine Sammlung von aufbereiteten Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien waren bisher ebenfalls nicht verfügbar.

Aus diesen Erkenntnissen wurde das folgende **Forschungsziel** abgeleitet:

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Unterstützung der erfolgreichen Anwendung von Additive Tooling als Prototypingtechnologie, um die effiziente und kontinuierliche Validierung im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung zu fördern.

Zur Operationalisierung des Forschungsziels wurden die drei folgenden **Forschungsfragen** gestellt:

- **Forschungsfrage 1:** Welche Potenziale besitzt Additive Tooling im Hinblick auf eine effiziente Validierung physischer Prototypen im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung und welchen Herausforderungen in Bezug auf dessen Anwendung stehen Entwickelnde gegenüber?
- **Forschungsfrage 2:** Wie ist eine Methode zu gestalten, mit der Entwickelnde das Potenzial des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung heben können?
- **Forschungsfrage 3:** Welchen Beitrag leistet die erarbeitete Methode zur Nutzung der Potenziale des Additive Tooling im Modell der SGE – Systemgenerationsentwicklung?

Für die Beantwortung der Forschungsfragen wurde ein **Forschungsvorgehen** in Anlehnung an die *DRM* genutzt, welche das Forschungsvorhaben in die vier Stadien *Klärung des Forschungsbedarfs*, *deskriptive Studie I*, *präskriptive Studie* und *deskriptive Studie II* gliedert (siehe Abschnitt 4.1). Die **Klärung des Forschungsbedarfs** erfolgte auf Basis des Forschungsstandes (Kapitel 2) und wurde mit der Herleitung und Beschreibung des Forschungsbedarfs und des Forschungsziels in Kapitel 3 dargelegt.

Mit der Durchführung der **deskriptiven Studie I (DS-I)** erfolgte die Beantwortung von *Forschungsfrage 1*. Dazu wurde zunächst ein tiefergehendes Verständnis für das AT durch die Durchführung einer *Markt- und Beschaffungsstudie* (siehe Abschnitt 5.1), sowie einer *technischen Vorstudie* (siehe Abschnitt 5.2) geschaffen. Die Markt- und Beschaffungsstudie zeigt, dass AT nicht immer die zeitlich schnellere oder kostengünstigere Fertigungsalternative gegenüber dem KT darstellt und dass insbesondere die geometrische Komplexität auf Seiten des KT, sowie das zu verarbeitende Materialvolumen auf Seiten des AT wesentliche Kostentreiber darstellen. Mit der technischen Vorstudie wurde der Grundstein für die eigene Anwendung des AT sowie für den Aufbau einer Versuchsumgebung für praktische Anwendungsversuche und die Durchführung der Evaluationsstudien gelegt. Weiterhin wurde im Zuge der praktischen Umsetzung ein zielführender Gesamtprozess zur Anwendung des AT aufgezeigt. Durch eine anschließende Interviewstudie wurden unter anderem Unterstützungsbedarfe in der Anwendung von AT aus Expertensicht ermittelt (siehe Abschnitt 5.3).

Als Ergebnis und als Antwort auf *Forschungsfrage 1* zeigt die DS-I, dass die Anwendung von AT nur in geeigneten Anwendungsfällen und unter bestimmten Voraussetzungen das Potenzial besitzt, Prototypen mit hoher, seriennaher Wiedergabetreue kostengünstiger und schneller als mittels konventionell gefertigter Werkzeuge zur Verfügung zu stellen (siehe Abschnitt 5.4). Folglich ergibt sich für Produktentwickelnde zwar die Chance, Validierungsaktivitäten effizienter und früher durchzuführen, wodurch ein früherer und schnellerer Erkenntnisgewinn erzielt und agiler auf Validierungsbedarfe reagiert werden kann. Allerdings wurden auch Risiken des AT aufgezeigt, welche insbesondere durch die besonderen Eigenschaften der aus Photopolymeren hergestellten AT-Formeinsätze resultieren. So sind die AT-Formeinsätze vergleichsweise empfindlich, sodass eine ungeeignete Formteil- und Werkzeugauslegung oder unpassende Prozessparameter zu einem frühen Versagen der AT-Werkzeuge führen können (siehe Abschnitt 5.2.2.1). Das Validierungsziel kann dann unter Umständen nicht erreicht werden. Weiterhin können sich vom Serienbauteil abweichende Formteileigenschaften der AT-Prototypen ergeben, die bei der Interpretation der Testergebnisse zu berücksichtigen sind. Dies wurde bereits mit den Ausführungen zum Stand der Forschung deutlich und zudem anhand der Zugversuche innerhalb der technischen Vorstudie bestätigt (siehe Abschnitt 5.2.2.2). Im Rahmen von fünf Experteninterviews wurde festgestellt, dass hauptsächlich das Fehlen geeigneter Referenzen, Konstruktions- und Anwendungsrichtlinien, sowie einer methodischen Unterstützung eine Hürde in der Anwendung von AT in der industriellen Praxis darstellt (siehe Abschnitt 5.3).

Eine Zusammenfassung der im Rahmen der DS-I durchgeführten Studien mit dem Ziel der Identifikation von Potenzialen und Hürden der Anwendung von AT in der Produktentwicklung ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

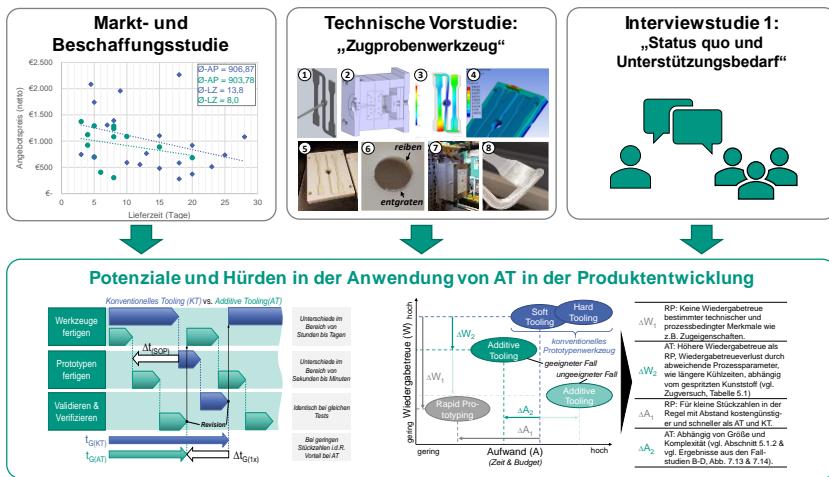


Abbildung 8.1: Übersicht zu den Studien der DS-I zur Ermittlung von Potenzialen und Hürden von AT in der Produktentwicklung mit symbolischer Darstellung der Studieninhalte

Zur Beantwortung von *Forschungsfrage 2* wurde zu Beginn der **präskriptiven Studie (PS)** das Zielsystem an die zu entwickelnde Unterstützung konkretisiert. Dazu wurde der bisher identifizierte Unterstützungsbedarf in die drei Handlungsfelder *Eignung von AT sicherstellen (H1)*, *Aufbau und Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung unterstützen (H2)* und *Interpretation der Testergebnisse unterstützen (H3)* untergliedert und näher beschrieben (siehe Abschnitt 6.1.1). Zudem wurden Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag (E1-E4)*, die *Unterstützungsleistung (U1-U6)* und die *Anwendbarkeit (A1-A7)* der zu entwickelnden Unterstützung definiert (siehe Abschnitt 6.1.2). Schließlich wurde die *AT-Systematik* vorgestellt, welche die Unterstützung der drei Handlungsfelder unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen zum Ziel hat (siehe Abschnitt 6.2). Die AT-Systematik bildet das strukturelle Rahmenwerk zur Nutzung des AT innerhalb der Produktentwicklung und untergliedert den Prozess, wie in Abbildung 8.2 dargestellt, in sechs Phasen, welche durch zusätzliche Hilfsmittel und Methoden unterstützt werden. Dabei wurde die AT-Systematik so gestaltet, dass sie möglichst flexibel und damit auf eine möglichst hohe Zahl von Anwendungsfällen anpassbar ist. Die empfohlenen Aufgaben, Methoden und Hilfsmittel können vom Anwender weitestgehend auf den spezifischen Unterstützungsbedarf hin adaptiert und genutzt werden, sodass ein möglichst angemessenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis erzielt werden kann.

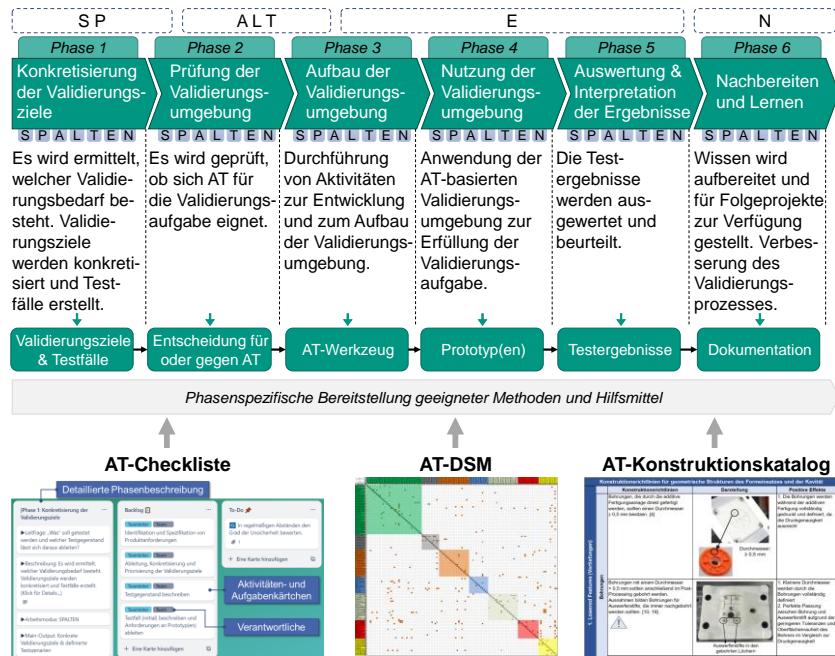


Abbildung 8.2: Die sechs Phasen der AT-Systematik (Schrock et al., 2022) und die AT-spezifischen Hilfsmittel AT-Checkliste, AT-DSM sowie AT-Konstruktionskatalog

Im Sinne der integrierten Produktentwicklung wurde die AT-Systematik als zusätzliche Methode zur Unterstützung der Aktivitäten „Prototyp aufbauen“ und „Validieren und Verifizieren“ innerhalb des integrierten Produktentstehungsmodells (iPeM, siehe Abschnitt 2.1.2.3) verortet (siehe Abschnitt 6.2.1). Zur operativen Nutzung wird dem Anwender das systematische Vorgehensmodell der AT-Systematik in Form der *AT-Checkliste* zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 6.3.1). Darin sind notwendige oder hilfreiche Aktivitäten und Aufgaben entlang der sechs Phasen der AT-Systematik enthalten, die in Form eines Kanban-Boards dargestellt werden.

Als weitere Hilfsmittel wurden die *AT-DSM* und der *AT-Konstruktionskatalog* eingeführt (siehe Abschnitt 6.3). Mit der *AT-DSM* können Beziehungen von Parametern und deren Wechselwirkungen modelliert und analysiert werden. Der *AT-Konstruktionskatalog* enthält Richtlinien zur Auslegung und Konstruktion von AT-Werkzeugen und deren Anwendung. Beide Hilfsmittel wurden auf Basis von Referenzen aus dem

Stand der Forschung und Forschungsergebnissen aus der DS-I entwickelt und während der Durchführung der DS-II stetig um neue Erkenntnisse ergänzt. Da jedoch jedes Entwicklungsprojekt einzigartig ist und die Datenlage zu AT derzeit bislang nicht vollständig ist, sollten beide Hilfsmittel explizit als initiale Ausgangsbasis betrachtet und kontinuierlich erweitert und aktualisiert werden.

Um Abweichungen zwischen Serien- und Prototypingprozess und damit einhergehende Unterschiede in der Wiedergabetreu von AT-Prototypen zu analysieren, wurde ein Template<sup>1</sup> erstellt. Zudem wurde das Filter-Fidelity-Modell nach Kohler et al. (2013) für eine Anwendung innerhalb der AT-Systematik angepasst, sodass auf Basis der erwartbaren Wiedergabetreu und anhand der relevanten Wiedergabedimensionen eine geeignete Prototypingtechnologie ausgewählt werden kann. Beide Hilfsmittel dienen der Eignungsprüfung von AT sowie der Interpretation der Testergebnisse und werden in Abbildung 8.3 dargestellt.

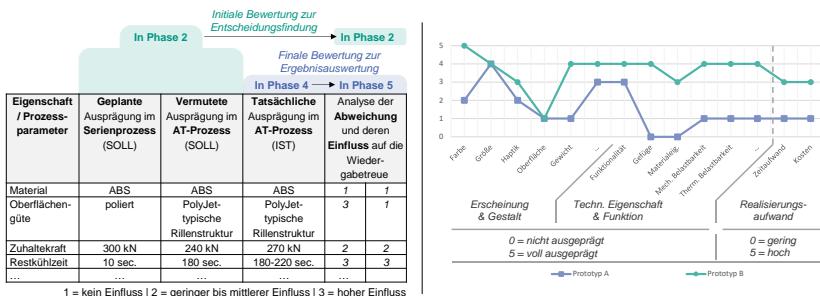


Abbildung 8.3: Template zur Analyse von Abweichungen zur Bewertung der Wiedergabetreu (links) und angepasstes Filter-Fidelity-Modell zur Auswahl einer geeigneten Prototypingtechnologie auf Basis relevanter Wiedergabedimensionen (rechts)

Die prinzipielle Funktionsfähigkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Unterstützung wurde durch die *Support-Evaluation* im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit bestätigt (siehe Abschnitt 6.4). Im Modell der SGE stellen die Studien der DS-I und PS sowie die erstellten Hilfsmittel Elemente eines Referenzsystems dar. Diese werden im Rahmen der Evaluationsstudien der DS-II genutzt, indem sie durch entsprechende Variation auf das zu entwickelnde System übertragen werden (siehe Abbildung 6.5, S. 138).

<sup>1</sup> Das Template wurde im Anschluss an die Evaluationsstudien (siehe Kapitel 7) zur Umsetzung von Verbesserungspotenzialen erstellt.

Im Rahmen der **deskriptiven Studie II (DS-II)** erfolgte abschließend die *Applikation*- und *Success-Evaluation* der entwickelten Unterstützung und die Beantwortung von *Forschungsfrage 3*. Dazu wurde die AT-Systematik in drei Anwendungsstudien im *Live-Lab-Format* (Fallstudien B-D, siehe Abschnitt 7.2), einer feldnahen Anwendungsstudie im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit mit anschließender Interviewstudie (Fallstudie E, siehe Abschnitt 7.3), sowie einem Experteninterview auf Basis der zuvor durchgeführten Anwendungsstudien (siehe Abschnitt 7.4) evaluiert. Die empirische Bewertung erfolgte anhand der zuvor definierten Anforderungen an den *Erfolgsbeitrag* (E1-E4), die *Unterstützungsleistung* (U1-U6) und die *Anwendbarkeit* (A1-A7). Einen Überblick über die im Rahmen der DS-II durchgeführten Evaluationsstudien gibt Abbildung 8.4.

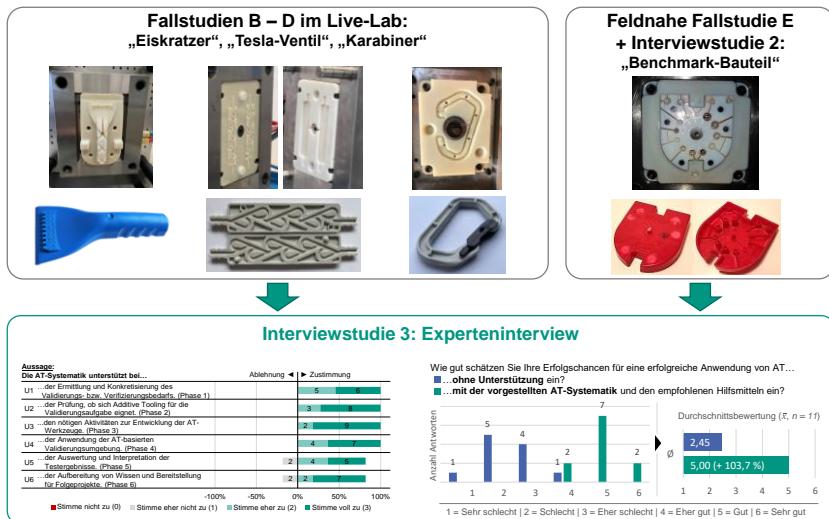


Abbildung 8.4: Studien der DS-II mit symbolischer Darstellung der Studieninhalte

Die Fallstudien B-E zeigen, dass die studentischen Probanden zu validierungsgeeigneten AT-Prototypen gelangten und die gestellte Entwicklungsaufgabe lösen, sowie eine erfolgreiche Produktvalidierung durchführen konnten. Zudem wurde in den Fällen B-D gezeigt, dass durch das AT eine bis zu 39 % schnellere und bis zu 49 % kostengünstigere Formeinsatzfertigung möglich war, was einen Schritt hin zu einer effizienteren Validierung darstellt. Jedoch bestehen auch Limitierungen der jeweiligen Evaluationsstudien. So erfolgte die praktische Anwendung der AT-Systematik bislang nur durch studentische Probanden und es konnten innerhalb der Studien

keine Kontrollgruppen gebildet werden. Zudem konnten aufgrund des hohen Aufwandes keine Feldstudien im realen Entwicklungsumfeld durchgeführt werden. Angesichts dieser Einschränkungen ist die Evaluation der entwickelten Unterstützung als initial zu bezeichnen.

Sowohl die Befragung der studentischen Probanden in den Fallstudien B-D als auch der Experten in den Interviewstudien 2 und 3 ergab eine mehrheitliche Zustimmung zur Erfüllung der definierten Anforderungen E1-E4, U1-U6 und A1-A7. Die Chancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT in der Produktvalidierung ohne Unterstützung werden von den elf Experten aus der industriellen Praxis, die im Rahmen der Interviewstudie 3 befragt wurden, auf einer fünfstufigen Likert-Skala von „sehr schlecht (1)“ bis „sehr gut (6)“ mit durchschnittlich 2,45 Punkten als „schlecht (2)“ bis „eher schlecht (3)“ bewertet. Mit Unterstützung durch die AT-Systematik und den darin empfohlenen Hilfsmitteln werden die Chancen hingegen als „gut (5)“ bewertet. Da die Anwendung und Evaluation der AT-Systematik in den Fallstudien B-E in einer praxisnahen Umgebung erfolgten und die Arbeitsergebnisse sowie die AT-Systematik anschließend von Experten aus der industriellen Praxis bewertet wurden, kann von einer guten Übertragbarkeit der Evaluationsergebnisse auf die Praxis ausgegangen werden.

Die dem Forschungsziel zugrunde gelegte **Forschungsthese** kann auf Basis der zum aktuellen Stand lediglich *initialen*<sup>2</sup> Evaluation und aufgrund der genannten Einschränkungen nicht gesichert verifiziert werden. Zwar zeigen die Ergebnisse der initialen Evaluation eine deutliche Tendenz in Richtung der Verifizierung der Forschungsthese, allerdings stellen insbesondere das Fehlen von Kontrollgruppen und die aus zeitlichen Gründen nicht durchführbare Evaluation in der betrieblichen Praxis eine erhebliche Unsicherheit dar. Für eine gesicherte Verifizierung wird daher eine weiterführende, *umfassende* Evaluation mit Kontrollgruppen und in Feldstudien empfohlen.

**Forschungsthese:** Die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten AT-Systematik unterstützt den Einsatz von Additive Tooling (AT) als Prototypingtechnologie in der Entwicklung von Spritzgussprodukten und fördert so die effiziente und kontinuierliche Validierung im Modell der SGE – System-generationsentwicklung.

Kritik und Verbesserungspotenziale wurden unter anderem in Bezug auf die Verständlichkeit der AT-Systematik identifiziert. Infolgedessen wurde die AT-Checkliste

---

<sup>2</sup> „Eine initiale DS-II enthält alle Schritte einer umfassenden DS-II, jedoch in geringerem Umfang oder in weniger detaillierter Form.“ (Blessing und Chakrabarti (2009, S. 195 f.).

um eine Einführung in die AT-Systematik und um eine Einleitung in die Handhabung der Checkliste selbst erweitert. Als zusätzliche Verbesserungsmaßnahme wurde das Template zur Unterstützung der Abweichungsanalyse und der Bewertung der Wiedergabetreue erstellt (siehe Abbildung 6.10, S. 151).

Weiterhin kann zusammengefasst werden, dass für die erfolgreiche Anwendung von AT zur Validierung in der Produktentwicklung einerseits ein umfassendes Verständnis für die Produktvalidierung, das Spritzgießen und das Additive Manufacturing erforderlich ist. Andererseits ist, aufgrund der Einzigartigkeit von Entwicklungsprojekten, eine gewisse Problemlösekompetenz notwendig. Der positive Beitrag der AT-Systematik wird daher insbesondere in der ganzheitlichen und an das AT angepassten systematischen Vorgehensweise, sowie in der Bereitstellung von AT-spezifischen Hilfsmitteln und Referenzen gesehen. Das in den Fallstudien vorgestellte Vorgehen nach der AT-Systematik, die erarbeiteten Lösungsansätze und die erfolgreich genutzten Prozessparameter können zudem als Elemente eines Referenzsystems im Modell der SGE genutzt und so auf weitere Projekte übertragen werden.

Allerdings muss der Einsatz von AT-Werkzeugen auf Photopolymerbasis in der industriellen Praxis derzeit noch kritisch hinterfragt werden. Zwar kann das AT ein potenziell adäquates Mittel für eine frühe, schnelle und kostengünstige Prototypenerstellung darstellen und damit zu einer effizienteren Herstellung von Spritzgussprototypen beitragen, allerdings müssen die Risiken und der zusätzliche Aufwand für die Eignungsprüfung und die Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden. Auch die Integration von AT in die Produktentwicklung, die Umstrukturierung von Prozessen und der nötige Wissensaufbau stellen initiale Hürden dar. So sollte bei geometrisch filigranen Werkzeugen sowie bei für das AT anspruchsvollen Prozessparametern mit anfänglichen Fehlschlägen gerechnet werden. Zusätzlich besteht zwischen AT und KT in vielen Fällen nur ein marginaler Unterschied hinsichtlich der Bereitstellungszeiten und -kosten (siehe Abschnitt 5.1).

Dennoch wurden Fälle aufgezeigt, in denen AT-Formeinsätze kostengünstiger und schneller gefertigt wurden (siehe Abschnitt 7.2.3 sowie Abbildung 7.13, S. 195 und Abbildung 7.14, S. 195). Da der additive Bauprozess der AT-Formeinsätze vergleichsweise einfach abläuft, schnell erlernbar ist und eine nahezu werkzeuglose Fertigung ermöglicht, kann das AT zudem als „Enabler“ für Entwickler und Unternehmen gesehen werden, die keine Möglichkeiten für eine eigene Werkzeugfertigung besitzen. Darüber hinaus sieht der Autor dieser Arbeit - basierend auf jahrelanger Berufserfahrung auf diesem Gebiet - einen ungebrochenen Trend in der Erforschung und Entwicklung von leistungsfähigeren AM-Verfahren und AM-Werkstoffen, sodass die Vorteile des AT in Zukunft gesteigert und die Nachteile reduziert werden könnten. Mit einer besseren Leistungsfähigkeit von AT könnten einerseits die bislang notwendigen Schritte zur Realisierung und Anwendung des AT reduziert

werden (z.B. Entfall der aufwändigen Eignungsprüfung), wodurch sich die in dieser Arbeit vorgestellte *AT-Systematik* verschlanken ließe. Andererseits könnte eine höhere Validität der mittels AT-Prototypen erzielten Testergebnisse erreicht werden (z.B. durch Abkühlzeiten wie bei konventionellen Werkzeugen und damit gleichwertigen Materialeigenschaften der Formteile). Somit könnte der Validierungsprozess mit AT ein besseres Aufwand-Nutzen-Verhältnis erreichen und die Effizienz der Produktdokumentation steigern.

## 8.2 Ausblick und weiterführende Forschung

Auf Basis der in dieser Forschungsarbeit erlangten Erkenntnisse werden im Folgenden drei weiterführende Forschungsmöglichkeiten beschrieben. Dabei wurden bewusst Forschungsthemen ausgewählt, von denen aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit potenzielle Anwender des AT in naher Zukunft am stärksten profitieren könnten.

**Forschungsthema 1 - Umfassende Evaluation und Weiterentwicklung der AT-Systematik:** Im Rahmen dieser Arbeit konnte die entwickelte AT-Systematik innerhalb von Anwendungsstudien und Experteninterviews untersucht und ihre Wirksamkeit und ihr Mehrwert initial bestätigt werden. Allerdings konnte keine vollumfängliche Evaluation der entwickelten Unterstützung im Sinne der DRM durchgeführt werden (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 195 ff.). Daher besteht weiterer Forschungsbedarf, um insbesondere den Nutzen und die Auswirkungen auf reale Produktentwicklungsprozesse in der industriellen Praxis zu untersuchen. Zudem sollten weitere Anwendungsstudien durchgeführt werden, in denen Kontrollgruppen gebildet werden. So könnte näher untersucht werden, welchen Einfluss die Unterstützung im Ganzen, aber auch die einzelnen Aktivitäten, Methodenbausteine und Tools auf den Erfolg in der Anwendung des AT aufweisen. Als Ergebnis könnte eine Stärkung der erfolgsrelevanten Bereiche oder eine Reduzierung in den untergeordneten Bereichen ermöglicht werden, um so ein besseres Aufwand-Nutzen-Verhältnis der Unterstützung zu erzielen. Ebenfalls könnten Aufbau und Darstellungsform der AT-Systematik und der Hilfsmittel näher untersucht und eventuell anwenderfreundlicher gestaltet werden.

Weiterhin wurde während der Experteninterviews der Wunsch nach weiteren Referenzen geäußert (siehe Abschnitt 7.4.2.5). Dazu zählen industrienähe Referenzprojekte und Referenzwerkzeuge, welche komplexere Formen, ein indirektes Ansprechen und die Entformung von Hinterschneidungen berücksichtigen. Zudem sollten weitere Konstruktionsrichtlinien entwickelt, sowie bestehende Richtlinien weiter konkretisiert und detailliert werden. Mit der *AT-DSM* und dem *AT-Konstruktionskatalog* wird zwar eine initiale Wissensbasis zur Verfügung gestellt, jedoch basieren diese

Hilfsmittel auf einer Sammlung unterschiedlicher, meist wissenschaftlicher Quellen. Das daraus resultierende Gesamtkonstrukt wurde jedoch bislang nicht validiert. Ferner könnten weitere Methoden zur Analyse und Modellierung der Wirkbeziehungen getestet werden, wie der Contact-and-Channel-Approach (C&C<sup>2</sup>-A) nach Albers und Wintergerst (2014) oder das Model-Based-Systems-Engineering (MBSE). Zwar wurde in die AT-Systematik das Verständnis des Modells der SGE – Systemgenerationsentwicklung integriert, eine genauere Betrachtung, z.B. hinsichtlich der Auswirkungen dieses Modells auf den Entwicklungserfolg in AT-Projekten oder das Verhältnis der Variationsanteile erfolgte bislang nicht und könnte ebenfalls näher untersucht werden.

Wie die Studienlage zeigt, ist auch eine intensivere Grundlagenforschung zur Beurteilung der mittels AT-Prototypen erreichbaren Wiedergabetreue bzw. zur Validität der mittels AT-Prototypen erzielten Testergebnisse notwendig (vgl. Abschnitte 2.3.4.2 & 5.2.2). Dazu sollte eine genauere Untersuchung der thermomechanischen Eigenschaften der AT-Werkzeuge, sowie zu den Wirkbeziehungen verschiedener Prozessgrößen und deren Einfluss auf die Eigenschaften der Formteile durchgeführt werden.

**Forschungsthema 2 - Optimierung von AM-Verfahren und AM-Materialien für das AT:** Wie gezeigt wurde unterliegen die aus Photopolymeren hergestellten AT-Werkzeuge verschiedenen Einschränkungen, woraus sich unterschiedliche Nachteile ergeben (siehe Abschnitt 2.3.4). Zum einen sind AT-Werkzeuge empfindlich gegenüber den hohen thermischen Belastungen, Kräften und Drücken, die üblicherweise beim Spritzgießen auftreten (Mendible et al., 2017). Andererseits führt die geringe Wärmeleitfähigkeit zu langen Abkühlzeiten und damit bei bestimmten Kunststoffen zu abweichenden Formeigenschaften im Vergleich zu Serienwerkzeugen aus Stahl (siehe Abschnitt 5.2). Durch eine Optimierung der eingesetzten AM-Materialien könnten diese Nachteile reduziert werden. So zeigen Hu et al. (2019), dass durch die Zugabe von Nanofüllern die Wärmeleitfähigkeit eines kommerziell erhältlichen SLA-Materials signifikant gesteigert werden konnte. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass noch weitere Forschungsarbeit notwendig ist, bevor dieses Material für den Zweck des AT eingesetzt werden kann. Die Zugabe von Additiven in ein AM-Material bedarf unter Umständen eine Anpassung des AM-Verfahrens, bietet aber auch zusätzliche Möglichkeiten, wie das Verfahren *Digital Composite Manufacturing (DCM)*<sup>3</sup> zeigt. DCM ist ein AM-Verfahren, welches speziell auf die Verwendung von Photopolymer-Kompositen ausgelegt ist. Durch die Zugabe magnetischer Füllstoffe und deren gezielte Ausrichtung während des Bauvorgangs wird unter anderem eine höhere Wärmeformbeständigkeit und eine höhere

---

<sup>3</sup> Patentiert durch 3DFortify, Inc., siehe <https://3dfortify.com/>.

Festigkeit erzielt, wobei die Füllstoffe zudem eine höhere Wärmeleitfähigkeit bewirken. Bislang sind allerdings keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu der Anwendung von DCM für das AT bekannt. Mit dem ZIM-Projekt „Thermoleitende operable Photopolymere für die additive Fertigung von Spritzgussformen (ToPaS)“ sollen an der Hochschule Offenburg neue AM-Verfahren und AM-Materialien für die Anwendung des AT untersucht werden, wobei ebenfalls das Ziel verfolgt wird, die bisherigen technischen, technologischen und wirtschaftlichen Nachteile zu reduzieren. Eine Verbesserung der Belastbarkeit und Wärmeleitfähigkeit könnte neben einer höheren Standzeit und einer Steigerung der möglichen Wiedergabekreislaufzeit von AT-Prototypen auch zu einer Reduktion des planerischen Aufwandes führen. Dadurch würde das AT für eine höhere Anzahl an Anwendungsfällen in Frage kommen und auch das Interesse für die industrielle Nutzung könnte steigen.

**Forschungsthema 3 - Untersuchung und Verbesserung des Einsatzes von Methoden der Simulation:** AT-Formeinsätze aus AM-Materialien unterscheiden sich aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften erheblich von konventionell gefertigten Stahl- oder Aluminiumformeinsätzen (siehe Abschnitt 2.3.4). Beispielsweise führt die geringere Wärmeleitfähigkeit von Photopolymeren mit  $\lambda = 0,199\text{--}0,429 \text{ W/mK}$  zu längeren Zykluszeiten (Mendible et al., 2017, S. 346; Mitterlehner et al., 2020). Zudem verschlechtern sich die mechanischen Eigenschaften von Photopolymeren bei zunehmender thermischer Belastung drastisch, wie Mendible et al. (2017, S. 346–347) am Beispiel des AM-Materials *Digital ABS* zeigen. Entsprechend können AT-Werkzeuge aufgrund der thermomechanischen Belastungen versagen. Daher wird in dieser Arbeit ein Ansatz zur Eignungsprüfung von AT vorgeschlagen, bei dem zunächst relevante Prozessparameter mittels Spritzgussprozesssimulation generiert werden, die dann als Eingangsparameter für eine strukturmechanische FEM-Analyse zur Bewertung der Werkzeugfestigkeit dienen (siehe Abschnitt 6.2.3.1).

Für die Erzeugung aussagekräftiger Simulationsergebnisse sind jedoch vollständige und valide Materialmodelle für das zu untersuchende AM-Material erforderlich, welche das Materialverhalten unter verschiedenen Zuständen enthalten. Während für die Spritzgussprozesssimulation im Wesentlichen die Wärmeleitfähigkeit des AM-Materials von Interesse ist, müssen für die strukturmechanische Simulation eines AT-Werkzeuges mehrere Materialeigenschaften berücksichtigt werden. Zu den relevanten Daten gehören insbesondere der Elastizitätsmodul, der Schermodul, das Poisson-Verhältnis und die spezifische Festigkeit (z. B. Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Scherfestigkeit). Ebenso müssen das Kriech- und Relaxationsverhalten, die durch die additive Bauweise bedingte Anisotropie sowie die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Da es sich beim Spritzgießen um einen zyklischen Prozess handelt, bei dem sowohl Drücke, Kräfte und Temperaturen als zyklische Belastungen auftreten, ist ebenfalls das Hysterese-Verhalten des Materials zu berücksichtigen.

Durch weitere Forschung könnten diese Materialmodelle erzeugt, in den beschriebenen Simulationsansatz integriert und das Simulationsmodell validiert werden. Je präziser das Simulationsmodell den realen Spritzgussprozess und das eingesetzte AT-Werkzeug abbildet, desto genauer könnten Schwachstellen und die erwartbare Standzeit des AT-Werkzeuges vorhergesagt werden. Idealerweise sollten dabei nicht nur die Werkzeugschließkraft, der Einspritz- und Nachdruck sowie die Prozesswärme, sondern auch die durch den Schmelzefluss verursachten Kräfte berücksichtigt werden. Diese könnten bspw. filigrane Elemente innerhalb der AT-Formeinsätze, wie Stifte oder dünne Wände, beschädigen. Auf dieser Basis könnte das Design von AT-Werkzeugen frühzeitig im Entwicklungsprozess überprüft und ggf. optimiert bzw. über die Eignung von AT entschieden werden.



# Literaturverzeichnis

- Albers, A. (2010). Five hypotheses about engineering processes and their consequences. *Proceedings of the TMCE 2010, April 12–16, 2010, Ancona, Italy, Edited by I. Horváth, F. Mandorli and Z. Rusák.*
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Hanser.  
<https://doi.org/10.3139/9783446445819.019>
- Albers, A., Behrendt, M., Schroeter, J., Ott, S. & Klingler, S. (2013). X-in-the-loop: A framework for supporting central engineering activities and contracting complexity in product engineering processes. *Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13), Design for Harmonies, Vol.6: Design Information and Knowledge, Seoul, Korea, 19-22.08.2013*, 391–400.
- Albers, A. & Braun, A. (2011a). A generalised framework to compass and to support complex product engineering processes. *International Journal of Product Development*, 15(1/2/3), 6–25.
- Albers, A. & Braun, A. (2011b). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau* (S. 3–30). Hanser Verlag.
- Albers, A., Burkhardt, N., Meboldt, M. & Saak, M. (2005). SPALTEN problem solving methodology in the product development. *Proceedings ICED 05, the 15th International Conference on Engineering Design, The Design Society, Melbourne, Australia*, full paper no. DS35\_317.49.
- Albers, A., Bursac, N. & Rapp, S. (2017). PGE – Produktgenerationsentwicklung am Beispiel des Zweimassenschwungrads. *Forschung im Ingenieurwesen*, 81(1), 13–31. <https://doi.org/10.1007/s10010-016-0210-0>
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015a). Product Generation Development – Importance and Challenges from a Design Research Perspective. In N. E.

- Mastorakis (Hrsg.), *Proceedings of the International Conference on Theoretical Mechanics and Applied Mechanics (TMAM 2015)*.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015b). Produktgenerationsentwicklung – Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2015. Entwicklung smarter Produkte für die Zukunft* (Bd. 5, S. 1–10). Fraunhofer IAO.
- Albers, A. & Düser, T. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. *FISITA 2010 World Automotive Congress, 30 May - 4 June, Budapest, Hungary*.
- Albers, A., Ebertz, J., Rapp, S., Heimicke, J., Kürten, C., Zimmermann, V. et al. (2020). Produktgeneration 1 im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Verständnis, Zusammenhänge und Auswirkungen in der Produktentwicklung. 2194-1629. <https://doi.org/10.5445/IR/1000127971>
- Albers, A. & Gausemeier, J. (2012). Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur Vorausschauenden und Systemorientierten Produktentstehung. In R. Anderl, M. Eigner, U. Sendler & R. Stark (Hrsg.), *Smart Engineering* (S. 17–29). Berlin, Heidelberg: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29372-6\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29372-6_3)
- Albers, A., Heimicke, J., Walter, B., Basedow, G. N., Reiß, N., Heitger, N. et al. (2018). Product Profiles: Modelling customer benefits as a foundation to bring inventions to innovations. *Procedia CIRP*, 70, 253–258. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.02.044>
- Albers, A., Klingler, S. & Wagner, D. (2014). Prioritization of Validation Activities in Product Development Processes. In Marjanovic Dorian, Storga Mario, Pavkovic Neven, Bojcetic Nenad (Hrsg.), *DS 77: Proceedings of the DESIGN 2014 13th International Design Conference* (pp. 81–90).
- Albers, A., Lanza, G., Klippert, M., Schäfer, L., Frey, A., Hellweg, F. et al. (2022). Product-Production-CoDesign: An Approach on Integrated Product and Production Engineering Across Generations and Life Cycles. *Procedia CIRP*, 109, 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.231>
- Albers, A., Lohmeyer, Q. & Ebel, B. (2011). Dimensions of objectives in interdisciplinary product development projects. *Impacting Society Through Engineering*

- Design: ICED 11 København. Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design, Copenhagen, Denmark, August 15th-18th, 2011. Vol. 2: Design Theory and Research Methodology. Ed.: S. Culley, 256–265.*
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung – Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *VDI Konstruktion*, (Juni 6-2015), 74–81.
- Albers, A. & Rapp, S. (2022). Model of SGE: System Generation Engineering as Basis for Structured Planning and Management of Development. In D. Krause & E. Heyden (Eds.), *Design Methodology for Future Products. Data Driven, Agile and Flexible* (Springer eBook Collection, S. 27–46). Cham: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78368-6_2)
- Albers, A., Rapp, S., Birk, C. & Bursac, N. (2017). Die Frühe Phase der PGE – Produktgenerationsentwicklung. In H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath & D. Roth (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017. Produktentwicklung im disruptiven Umfeld*. Stuttgart: IRB Mediendienstleistungen.
- Albers, A., Rapp, S., Spadinger, M., Richter, T., Birk, C., Marthaler, F. et al. (2019). The Reference System in the Model of PGE: Proposing a Generalized Description of Reference Products and their Interrelations. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1693–1702. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.175>
- Albers, A., Reinemann, J., Hirschter, T., Fahl, J. & Heitger, N. (Hrsg.). (2019). *Validation-Driven Design in the Early Phase of Product Development. Procedia 29th CIRP Design Conference*.
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Breitschuh, J. (2016). 15 Years of SPALTEN Problem Solving Methodology in Product Development. In C. Boks, J. Sigurjonsson, M. Steinert, C. Vis & A. Wulvik (Hrsg.), *DS 85-1: Proceedings of NordDesign 2016, Volume 1, Trondheim, Norway, 10th - 12th August 2016* (S. 411–420).
- Albers, A., Reiss, N., Bursac, N. & Richter, T. (2016). iPeM – Integrated Product Engineering Model in Context of Product Generation Engineering. *Procedia CIRP*, 50, 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.168>

- Albers, A., Walter, B., Wilmsen, M. & Bursac, N. (2018). Live-Labs as Real-World Validation Environments for Design Methods. *International Design Conference - DESIGN 2018*, 13–24. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0303>
- Albers, A. & Wintergerst, E. (2014). The Contact and Channel Approach (C&C2-A): Relating a System's Physical Structure to Its Functionality. In A. Chakrabarti & L. T. M. Blessing (Eds.), *An anthology of theories and models of design. Philosophy, approaches and empirical explorations* (S. 151–171). London: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_8)
- Bagalkot, A., Pons, D., Clucas, D. & Symons, D. (2019). A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts. *Rapid Prototyping Journal*, 25(9), 1493–1505. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2017-0217>
- Bender, B. & Gericke, K. [Kilian] (Hrsg.). (2021). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl. 2021). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Blessing, L. T. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bogaerts, L., Vogeler, F., Geyskens, K., Verspreet, J., Moens, D. & Faes, M. (2018). Breakout analysis of plastic material jetted moulds for injection moulding. In *Proceedings of the International Conference on Polymers and Moulds Innovations (PMI)* (S. 18). Guimaraes, Portugal.
- Bonten, C. (2020). *Kunststofftechnik. Einführung und Grundlagen* (3., aktualisierte Auflage). München, 2020: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446465381>
- Boos, W., Salmen, M., Kelzenberg, C., Lange, J. de & Stracke, F. (2017). *Corporate Tooling. Agile Tool Development* (1. Auflage). Aachen: RWTH Aachen Werkzeugmaschinenlabor.
- Burggräf, P., Bergweiler, G., Abrams, J. A. & Dunst, A. (2022). Additive Surface Graining in Prototype Tooling for Injection Molding. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(3), 1–11. <https://doi.org/10.3390/jmmp6030054>
- Bursac, N. (2016). Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsent-

- wicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 93). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000054484>
- Cooper, R. G. (1990). Stage-gate systems: A new tool for managing new products. *Business Horizons*, 33(3), 44–54. [https://doi.org/10.1016/0007-6813\(90\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0007-6813(90)90040-1)
- Cooper, R. G. (1994). Third-Generation New Product Processes. *Journal of Product Innovation Management*, 11(1), 3–14. <https://doi.org/10.1111/1540-5885.1110003>
- Daft, R. & Lengel, R. (1983). Information Richness. A New Approach to Managerial Behavior and Organization Design. *Research in Organizational Behavior*. Verfügbar unter: <https://www.semanticscholar.org/paper/Information-Richness.-A-New-Approach-to-Managerial-Daft-Lengel/aebced7c062997106dc3a180ccc6782639c23782>
- Davoudinejad, A., Bayat, M., Pedersen, D. B., Zhang, Y., Hattel, J. H. & Tosello, G. (2019). Experimental investigation and thermo-mechanical modelling for tool life evaluation of photopolymer additively manufactured mould inserts in different injection moulding conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(1-4), 403–420. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3163-7>
- Dempsey, D., McDonald, S., Masato, D. & Barry, C. (2020). Characterization of Stereolithography Printed Soft Tooling for Micro Injection Molding. *Micromachines*, 11(9), 1–20. <https://doi.org/10.3390/mi11090819>
- Diefenbach, S., Christoforakos, L., Maisch, B. & Kohler, K. (2019). The State of Prototyping Practice in the Industrial Setting: Potential, Challenges and Implications. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1, 1703–1712. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.176>
- DIN EN ISO 527-1/-2 (2012). *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO/ASTM 52900 (2017). *Additive Fertigung- Grundlagen - Terminologie*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- Dörner, D. (1987). *Problemlösen als Informationsverarbeitung* (Kohlhammer-Standards Psychologie Basisbücher und Studentexte, 3. Aufl.). Stuttgart: Kohlhammer.
- Dühr, K. (2023). EDiT - Enabling Distributed Teams: Eine Methode zur Identifikation und Erschließung von Verbesserungspotenzialen in der standortverteilten Produktentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 160). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000155028>
- Ebel, B. (2015). Modellierung von Zielsystemen in der interdisziplinären Produktentstehung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 85). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000048334>
- Eckert, C. M., Alink, T. & Albers, A. (2010). Issue driven analysis of an existing product at different levels of abstraction. In D. Marjanović (Ed.), *Design 2010. 11th International Design Conference, Dubrovnik - Croatia, May 17 - 20, 2010* (S. 673–682). Zagreb.
- Ehrlenspiel, K. & Meerkamm, H. (2017). *Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.3139/9783446449084>
- Emmerich, U. (2014). *Spritzgießwerkzeuge mit SolidWorks effektiv konstruieren. Mit realem Projekt Eiskratzer* (2., aktualisierte und erw. Aufl.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Equbal, A., Sood, A. K. & Shamim, M. (2015). Rapid tooling: A major shift in tooling practice. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, (14(3-4):), 1–9. <https://doi.org/10.12776/mie.v14i3-4.325>
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. [Karl-Heinrich] (Hrsg.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8., vollständig überarbeitete Auflage). Berlin: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0>

- Ferraris, S. D. (2023). *The Role of Prototypes in Design Research. Overview and Cases Studies* (PoliMI SpringerBriefs, 1st ed. 2023). Cham: Springer Nature Switzerland; Imprint Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-24549-7>
- Formlabs. (2023). Guide to Low-Volume Injection Molding. Verfügbar unter: [https://formlabs.com/blog/low-volume-injection-molding/?utm\\_source=fa-ce-book&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=launch-sis-guide&fbclid=IwAR3w9\\_N2hfMS7vDVP\\_np9rUa4hwCJG8PnODySbjg-bhaGZi1IWzSNX7GgnE](https://formlabs.com/blog/low-volume-injection-molding/?utm_source=fa-ce-book&utm_medium=social&utm_campaign=launch-sis-guide&fbclid=IwAR3w9_N2hfMS7vDVP_np9rUa4hwCJG8PnODySbjg-bhaGZi1IWzSNX7GgnE)
- Gebhardt, A. (2016). *Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion* (5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). München: Hanser. Verfügbar unter: <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446444010>
- Gebhardt, A., Kessler, J. & Schwarz, A. (2019). *Produktgestaltung für die Additive Fertigung*. München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446461338>
- Gebhardt, A., Kessler, J. & Thurn, L. (2019). *3D printing. Understanding additive manufacturing* (2nd Edition). Munich, Cincinnati: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9781569907030>
- Gericke, K. [Kilian], Bender, B., Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K.-H. [Karl-Heinrich] (2021). Grundlagen methodischen Vorgehens in der Produktentwicklung. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9. Aufl. 2021, S. 27–55). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_3)
- Gheisari, R., Bártoł, P., Goddard, N. & Domingos, M. A. d. N. (2017). An experimental study to investigate the micro-stereolithography tools for micro injection molding. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 711–719. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2015-0152>
- GKV-Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie. (2023). *Branchenstatistik der Kunststoffverarbeitung in Deutschland*. Verfügbar unter: <https://www.gkv.de/de/statistik/>
- Hochreuter, T., Kohler, K. & Maurer, M. (2013). Prototypen im Kontext begreifbarer Interaktion besser verstehen. *Mensch & Computer* 2013, 169–180. <https://doi.org/10.1524/9783486781229.169>

- Hofstätter, T., Bey, N., Mischkot, M., Lunzer, A., Pedersen, D. B. & Hansen, H. N. (2016). Comparison of conventional Injection Mould Inserts to Additively Manufactured Inserts using Life Cycle Assessment. In *Proceedings of euspen's 16th International Conference & Exhibition*.
- Hofstätter, T., Mischkot, M., Pedersen, D. B., Tosello, G. & Hansen, H. N. Evolution of Surface Texture and Cracks During Injection Molding of Fiber-Reinforced, Additively-Manufactured, Injection Molding Inserts. In *Proceedings of ASPE Summer Topical Meeting 2016. Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing*. ASPE – The American Society for Precision Engineering.
- Hopmann, C., Greif, H. & Wolters, L. (2021). *Technologie der Kunststoffe. Lern- und Arbeitsbuch für die Aus- und Weiterbildung* (5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). München: Hanser.
- Hopmann, C., Menges, G., Michaeli, W. & Mohren, P. (2018). *Spritzgießwerkzeuge. Auslegung, Bau, Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9783446453906>
- Hopmann, C., Michaeli, W., Greif, H. & Ehrig, F. (2017). *Technologie des Spritzgießens. Lern- und Arbeitsbuch* (4. Aufl.). München: Carl Hanser Fachbuchverlag. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.3139/9783446452961>
- Hu, G., Cao, Z., Hopkins, M., Lyons, J. G., Brennan-Fournet, M. & Devine, D. M. (2019). Nanofillers can be used to enhance the thermal conductivity of commercially available SLA resins. *Procedia Manufacturing*, 38, 1236–1243. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.215>
- IPEK Glossar. (2021). *IPEK Definition: Innovation*. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/mkl/index.php?title=Innovation>
- IPEK Glossar. (2024a). *IPEK Definition: Modell der SGE - Systemgenerationsentwicklung*. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/11511.php>
- IPEK Glossar. (2024b). *IPEK-Definition: Methode*. Verfügbar unter: <https://www.ipek.kit.edu/11507.php>
- Jaroschek, C. (2018). *Spritzgussteile konstruieren*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9783446456327>

- Kampker, A., Ayvaz, P. & Lukas, G. (2020). Direct Polymer Additive Tooling - Economic Analysis of Additive Manufacturing Technologies for Fabrication of Polymer Tools for Injection Molding. *Key Engineering Materials*, 843, 9–18. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.843.9>
- Kampker, A., Förstmann, R., Ordung, M. & Haunreiter, A. (2016). Prototypen im agilen Entwicklungsmanagement. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 118(7-8), 72–77. <https://doi.org/10.1007/s35148-016-0065-6>
- Kampker, A., Triebs, J., Alves, B., Kawollek, S. & Ayvaz, P. (2018). Potential analysis of additive manufacturing technologies for fabrication of polymer tools for injection moulding – A comparative study. In *2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)* (S. 49–52).
- Kampker, A., Triebs, J., Kawollek, S. & Ayvaz, P. (2018). Direct Polymer Additive Tooling – Verwendung von Polymerwerkzeugen für den Einsatz im Kleinserien Spritzguss. In M. Kynast, M. Eichmann & G. Witt (Hrsg.), *Rapid.Tech + Fab-Con 3.D – International Trade Show + Conference for Additive Manufacturing* (S. 45–62). München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. <https://doi.org/10.3139/9783446458123.003>
- Kampker, A., Triebs, J., Kawollek, S., Ayvaz, P. & Beyer, T. (2019). Direct polymer additive tooling – effect of additive manufactured polymer tools on part material properties for injection moulding. *Rapid Prototyping Journal*, 25(10), 1575–1584. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0161>
- Klingler, S. (2016). Eine Methode zur effizienten und effektiven Unterstützung der kontinuierlichen Validierung im Kontext der PGE - Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 101). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000073864>
- Kohler, K., Hochreuter, T., Diefenbach, S., Lenz, E. & Hassenzahl, M. (2013). Durch schnelles Scheitern zum Erfolg: Eine Frage des passenden Prototypen? *Tagungsband UP13. Stuttgart: German UPA e.V.*, 78–84.
- Kumar, S. & Singh, A. K. (2020). Volumetric shrinkage estimation of benchmark parts developed by rapid tooling mold insert. *Sādhanā*, 45(1). <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01373-7>

- Lichius, U. & Schmidt, L. (1986). *Rechnergestütztes Konstruieren von Spritzgießwerkzeugen. Systematisches Entwickeln von Betriebsmitteln, Aufbau und Funktion von Spritzgießwerkzeugen* (Vogel-Fachbuch Technik Kunststoffverarbeitung, 1. Aufl.). Würzburg: Vogel.
- Lim, Y.-K., Stolterman, E. & Tenenberg, J. (2008). The anatomy of prototypes. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 15(2), 1–27. <https://doi.org/10.1145/1375761.1375762>
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>
- Lozano, A. B., Álvarez, S. H., Isaza, C. V. & Montealegre-Rubio, W. (2022). Analysis and Advances in Additive Manufacturing as a New Technology to Make Polymer Injection Molds for World-Class Production Systems. *Polymers*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/polym14091646>
- Marthaler, F., Orsolani, E., Uhlig, P., Kühlfuss, D., Siebe, A., Bursac, N. et al. (2019). Strategische Potentialfindung zur generationsübergreifenden Produktentwicklung mit langfristigem Zeithorizont: Eine qualitative Studie im Live-Lab IP-Integrierte Produktentwicklung. In H.-G. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, O. Riedel, D. Spath, D. Roth et al. (Hrsg.), *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019. Agilität und kognitives Engineering*. Stuttgart: Universität Stuttgart.
- Marxen, L. (2014). A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Eds.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (vol. 74). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000045823>
- Mendible, G. A., Rulander, J. A. & Johnston, S. P. (2017). Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 344–352. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2016-0013>
- Meyer, B.-R. & Falke, D. (2013). *Maßhaltige Kunststoff-Formteile. Toleranzen und Formteilengineering* (Hanser eLibrary). München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446436893>
- Mischkot, M., Davoudinejad, A., Charalambis, A., Hofstätter, T., Tosello, G., Pedersen, D. B. et al. (2017). Dimensional accuracy of Acrylonitrile Butadiene

- Styrene injection molded parts produced in a pilot production with an additively manufactured insert. *Paper presented at 33rd Annual Meeting of the Polymer Processing Society (PPS33), Cancun, Mexico.*
- Mischkot, M., Tosello, G., Nielsen, D., Pedersen, D. B., Zhang, Y., Hofstätter, T. et al. (2017). Injection Moulding Pilot Production: Performance Assessment of Tooling Process Chains Based on Tool Inserts Made from Brass and A 3d Printed Photopolymer. *Conference: ANTEC 2017, Anaheim, CA*, 1898–1902.
- Mitterlehner, T. (2020). *Auslegung und Charakterisierung additiv gefertigter Formeinsätze für Spritzgießwerkzeuge*. Dissertation. Johannes Kepler Universität Linz. Verfügbar unter: <https://epub.jku.at/obvulihs/content/titleinfo/5343221>
- Mitterlehner, T., Praherm Bernhard & Steinbichler, G. (2020). Additiv gefertigte Formeinsätze für Spritzgiesswerkzeuge. *WAK Jahresmagazin Kunststofftechnik*, 2020, 64–69. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/345167742>
- Oerding, J. (2009). *Ein Beitrag zum Modellverständnis der Produktentstehung - Strukturierung von Zielsystemen mittels C&CM*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. <https://doi.org/10.5445/IR/1000013689>
- Pahl, G. & Beitz, W. (1977). *Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02288-7>
- PlasticsEurope. (2023). Weltweite und europäische Kunststoffproduktion in den Jahren von 1950 bis 2022 (in Millionen Tonnen) [Graph]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167099/umfrage/weltproduktion-von-kunststoff-seit-1950/>
- Putnik, G. D. & Putnik, Z. (2019). Defining Sequential Engineering (SeqE), Simultaneous Engineering (SE), Concurrent Engineering (CE) and Collaborative Engineering (CoE): On similarities and differences. *Procedia CIRP*, 84, 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.07.005>
- Reinemann, J. (2020). Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 133). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000128685>

- Ritter, S. (2017). *Polyman. Referenz für eine spritzgießgerechte Gestaltung von Kunststoffbauteilen* (1. Auflage). Schwendi: Verband Deutscher Werkzeug- und Formenbauer.
- Ropohl, G. (Hrsg.). (1975). *Systemtechnik - Grundlagen und Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag. <https://doi.org/10.1002/cite.330471315>
- Schmidt, T., Wallisch, A., Böhmer, A., Paetzold, K. & Lindemann, U. (2017). Media Richness Theory in Agile Development: Choosing Appropriate Kinds of Prototypes to Obtain Reliable Feedback. Conference: *23th International ICE Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE'17)*. <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8279930>
- Schork, S., Güttinger, K. & Kirchner, E. (2020). Eigenschaftsanalyse zur Entwicklung additiv gefertigter Prototypen – Das House of Properties. *Forschung im Ingenieurwesen*, 84(4), 293–303. <https://doi.org/10.1007/s10010-020-00412-3>
- Schötz, A. (2013). *Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen. Strukturierte und analytische Vorgehensweise*. München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446436114>
- Schötz, A. (2019). *Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen. Strukturierte und analytische Vorgehensweise* (3., aktualisierte und erweiterte Auflage). <https://doi.org/10.3139/9783446461321>
- Schuh, G., Bergweiler, G., Lukas, G. & Abrams, J. A. (2020). Feasibility and Process capability of polymer additive injection molds with slide technology. *Procedia CIRP*, 93, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.057>
- Schuh, G., Bergweiler, G., Lukas, G. & Oly, M. (2020). Towards Temperature Control Measures for Polymer Additive Injection Molds. *Procedia CIRP*, 93, 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.050>
- Schuh, G., Salmen, M., Kelzenberg, C. & de Lange, J. (2018). Integration of Tool Making into Agile Product Development using Industry 4.0 Technologies and Additive Manufacturing Technologies. In *2018 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)* (S. 1–9).
- Schuh, G., Salmen, M., Kuhlmann, T. & Wiese, J. (2017). Highly Iterative Product Development Within The Tool and Die Making Industry. *Procedia CIRP*, 61, 576–581. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.259>

- Schumpeter, J. A. (1939). *Business Cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. Verfügbar unter: [https://discoverssocial-sciences.com/wp-content/uploads/2018/03/schumpeter\\_businesscycles\\_fels.pdf](https://discoverssocial-sciences.com/wp-content/uploads/2018/03/schumpeter_businesscycles_fels.pdf)
- Schwaber, K. & Sutherland, J. (2020). *The Scrum Guide. The Definitive Guide to Scrum: The Rules of the Game*. Verfügbar unter: <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf>
- Simpson, P., Zakula, A. D., Nelson, J., Dworshak, J. K., Johnson, E. M. & Ulven, C. A. (2019). Injection molding with an additive manufactured tool. *Polymer Engineering & Science*, 59(9), 1911–1918.  
<https://doi.org/10.1002/pen.25192>
- Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer Verlag. Verfügbar unter: <https://archive.org/details/Stachowiak1973AllgemeineModelltheorie>
- Timofeeva, O. S., Andreev, Y. S. & Yablochnikov, E. I. (2019, 22.–25. Juli). Simulation of injection molding process and 3D-printing of forming parts for small-batch production. In *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (S. 1631–1637). IEEE.
- Tosello, G., Charalambis, A., Kerbache, L., Mischkot, M., Pedersen, D. B., Calaon, M. et al. (2019). Value chain and production cost optimization by integrating additive manufacturing in injection molding process chain. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1-4), 783–795.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2762-7>
- VDWF (Verband Deutscher Werkzeug- und Formenbauer e.V., Hrsg.). (2023, 15. Mai). *Polyman - VDWF*. Verfügbar unter: <https://www.vdwf.de/polyman.html>
- VDI-Richtlinie 2206 (2004). *VDI 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie 3405 (2014). *VDI 3405 - Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1 (2019). *VDI 2221 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- Vieten, T., Stahl, D., Schilling, P., Civelek, F. & Zimmermann, A. (2021). Feasibility Study of Soft Tooling Inserts for Injection Molding with Integrated Automated Slides. *Micromachines*, 12(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/mi12070730>
- Volpato, N., Solis, D. M. & Costa, C. A. (2016). An analysis of Digital ABS as a rapid tooling material for polymer injection moulding. *International Journal of Materials and Product Technology*, 52(1/2), 3–16. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2016.073616>
- Walter, B., Albers, A., Benesch, G. & Bursac, N. (2017). ProVIL - Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor. Anwendungs- und Implementierungsmodell eines Live-Labs. 4. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP) : Produktentwicklung im disruptiven Umfeld, Stuttgart, Deutschland, 28-29 Juni 2017*. Hrsg.: H. Binz.
- Walter, B., Albers, A., Haupt, F. & Bursac, N. (2016). Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor – Konzipierung und Implementierung eines Live-Lab. In D. Krause, K. P. Dieter Krause, M. Eisele, S. Schoch, R. Puls, A. Albers et al. (Hrsg.), *Priorisierung von Aktivitäten zur Konkretisierung von Produkteigenschaften am Beispiel einer Batteriemodulentwicklung. Design for X* (S. 283–295).
- Zhang, Y., Pedersen, D. B., Mischkot, M., Calaon, M., Baruffi, F. & Tosello, G. (2018). A Soft Tooling Process Chain for Injection Molding of a 3D Component with Micro Pillars. *Journal of Visualized Experiments : JoVE*, (138). <https://doi.org/10.3791/57335>
- Zimmermann, V. (2023). Methoden der initialen Zielsystementwicklung zur Unterstützung beim Umgang mit Marktunsicherheiten in der Entwicklung von anlagentechnischem Brandschutz im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung. Dissertation. In A. Albers & S. Matthiesen (Hrsg.), *Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung. Systeme, Methoden, Prozesse* (Bd. 167). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/IR/1000161065>
- Zong, X., Ruan, J., Liu, H., Sun, W. & Liu, Y. (2019). Rapid injection moulding process of polyether ether ketone based on stereolithography. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1385-4>

**Studentische Abschlussarbeiten, die im Kontext dieser Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Hochschule Offenburg vom Autor co-betreut wurden:**

- Bühler, A. (2022). *Experimentelle Untersuchung additiv hergestellter Spritzgussformmeinsätze*. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Chang, F.-W. (2020). *Verfahrensvergleich zwischen additiver und konventioneller Fertigung von Spritzgussformmeinsätzen. Technische und wirtschaftliche Bewertung des Additive Tooling*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Dogan, E. (2022). *Ermittlung von Anforderungen an eine Methode zur Unterstützung des Additive Tooling*. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kaltenbach, E. (2021). *Wirtschaftliche Analyse von additiv und konventionell hergestellten Spritzgießwerkzeugen im Kontext der Produktentwicklung*. Bachelorarbeit. Hochschule Offenburg, Offenburg.
- Proksch, A. (2020a). *Additive Tooling für Spritzgießprozesse*. Masterthesis. Hochschule Offenburg, Offenburg.
- Proksch, A. (2020b). *Untersuchung additiv hergestellter Spritzgussformmeinsätze*. Seminararbeit. Hochschule Offenburg, Offenburg.
- Schmieder, N. (2022). *Entwicklung eines Konstruktionsleitfadens für das Additive Tooling von Spritzgießformmeinsätzen mittels Polymerisationsverfahren*. Masterarbeit. Hochschule Offenburg, Offenburg.
- Wolfinger, K. (2022, April). *Evaluation einer Systematik zum Additive Tooling von Spritzgießwerkzeugen*. Masterthesis. Hochschule Offenburg, Offenburg.

**Des Weiteren wird auf nachfolgende studentische Arbeiten referenziert, die nicht durch den Autor dieser Arbeit co-betreut wurden:**

Müller, K. (2017). *Spritzgusswerkzeug mit Wechseleinsatz*. Bachelorthesis. Hochschule Offenburg, Offenburg.

**Veröffentlichungen, die unter Mitautorenschaft des Autors dieser Arbeit entstanden sind:**

Junk, S., Schrock, S. & Schmieder, N. (2024). Review and Development of Design Guidelines for Additive Tooling of Injection Molds Using PolyJet Modelling. In C. Klahn, M. Meboldt & J. Ferchow (Hrsg.), *Industrializing Additive Manufacturing. Proceedings of AMPA2023* (Springer Tracts in Additive Manufacturing, S. 35–45). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42983-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42983-5_3)

Schrock, S., Chang, F.-W., Junk, S. & Albers, A. (2020). Potentiale des Additive Tooling zur Steigerung der Effizienz und Agilität von Validierungsaktivitäten in der frühen Phase der Produktentwicklung. In B. Corves, K. Gericke, K.-H. Grote, A. Lohrengel, M. Löwer, A. Nagarajah et al. (Hrsg.), *18. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2020: Nachhaltige Produktentwicklung: KT 2020* (S. 259–270). Duisburg. <https://doi.org/10.17185/duepublico/73094>

Schrock, S., Junk, S. & Albers, A. (2022). A Method for Additive Tooling in Integrated Product Development. In N. H. Mortensen, C. T. Hansen & M. Deininger (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2022*. Copenhagen, Denmark: The Design Society. <https://doi.org/10.35199/NORDDESIGN2022.16>

Schrock, S., Junk, S. & Albers, A. (2023). Evaluation of a method for the additive tooling of injection mould inserts. *Rapid Prototyping Journal*, 2 January 2024, 30 (1), 161–176. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0139>

Schrock, S., Proksch, A., Rapp, S., Junk, S. & Albers, A. (2021). Systematische Erfassung von Einflussfaktoren für das Additive Tooling von Spritzgusswerkzeugen. In D. Krause, K. Paetzold & S. Wartzack (Hrsg.), *Proceedings of the 32nd Symposium Design for X (DFX2021)*. <https://doi.org/10.35199/dfx2021.09>

# Glossar

<b>Additive Tooling (AT)</b>	Additive Tooling (AT) wird in dieser Arbeit als Bezeichnung für die direkte, additive Fertigung photopolymerbasierter Spritzgusswerkzeuge bzw. Spritzgussformeinsätze verwendet. Demgegenüber steht das konventionelle Tooling (KT), also die subtraktive Werkzeugfertigung. (siehe S. 53)
<b>AT-Prototyp</b>	Als AT-Prototyp werden in dieser Arbeit mittels AT-Werkzeugen bzw. AT-Formeinsätzen hergestellte Formteile bezeichnet, wenn diese der Validierung dienen. (siehe S. 35)
<b>Frühe Phase im Modell der PGE &amp; SGE</b>	„Die ‚Frühe Phase‘ der Produktgenerationsentwicklung ist eine Phase im Entwicklungsprozess einer neuen Produktgeneration, die mit der Initiierung eines Projektes beginnt und mit einer bewerteten technischen Lösung endet, die schließlich das initiale Zielsystem hinsichtlich seiner wesentlichen Elementen abdeckt. Die zur technischen Lösung gehörende Produktspezifikation als Teil des Zielsystems enthält u.a. Informationen bzgl. der verwendeten Technologien und Subsysteme sowie deren Übernahme- und Neuentwicklungsanteile. Sie ermöglicht eine valide Bewertung des zu entwickelnden technischen Systems hinsichtlich der relevanten Parameter wie beispielsweise der Produzierbarkeit, der notwendigen Ressourcen oder des technischen und ökonomischen Risikos.“ (Albers, Rapp et al., 2017, S. 4)
<b>Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro)</b>	Die Karlsruher Schule für Produktentwicklung (KaSPro) beinhaltet die grundlegenden Forschungsmethoden und Ansätze, welche am IPEK angewendet werden und stellt somit die „Grundpfeiler“ der Forschung am IPEK dar.
<b>Konventionelles Tooling (KT)</b>	Konventionelles Tooling (KT) wird in dieser Arbeit als Beschreibung für die subtraktive Werkzeugfertigung genutzt. Demgegenüber steht das Additive Tooling (AT), also die additive Werkzeugfertigung. (siehe S. 53)

<b>Live-Lab</b>	„Ein Live-Lab im Kontext der Produktentwicklung ist eine Untersuchungsumgebung, die es ermöglicht, Methoden und Prozesse der Produktentwicklung in einem möglichst realen Entwicklungsprozess zu erforschen und gleichzeitig die Randbedingungen in hohem Maße gestalten zu können. Ziel hierbei ist es, Entwicklungsmethoden, Prozesselemente, Werkzeuge und Arbeitsweisen weiterzuentwickeln und zu evaluieren, um diese mehrwertstiftend der Praxis in Industrieunternehmen bereitstellen zu können.“ (Walter, Albers, Haupt & Burzac, 2016, S. 5)
<b>Methode</b>	Methoden beschreiben ein „planmäßiges Vorgehen in einer Abfolge von Tätigkeiten zum Erreichen eines bestimmten Ziels“ (in Anlehnung an Ehrlenspiel & Meerkamm, 2017 zitiert nach VDI-Richtlinie 2221, Blatt 1, S. 7). Methoden haben einen deskriptiven Charakter, bilden das verallgemeinerte Wissen zu bestimmten Anwendungsfällen ab und der Ausgang ihrer Anwendung ist offen (Oerding, 2009; zitiert nach IPEK Glossar, 2024b).
<b>Modell der SGE - Systemgenerationsentwicklung</b>	Als Systemgenerationsentwicklung wird die Entwicklung sozio-technischer Systeme verstanden, die sowohl durch die Anpassung von Teilsystemen (...) als Übernahmevariation (...) als auch durch eine Neuentwicklung von Teilsystemen charakterisiert ist. Darin eingeschlossen sind sowohl die Entwicklung einer neuen Produktgeneration, als auch deren Derivate bzw. Varianten. Die Anteile technischer Neuentwicklungen einzelner Funktionseinheiten können sowohl durch die Aktivität Ausprägungsvariation (...) als auch durch die Variation von Lösungsprinzipien – (...) als Aktivität Prinzipvariation (...) bezeichnet – erfolgen. Neue Systemgenerationen basieren immer auf Referenzen, die große Bereiche der grundsätzlichen Struktur vorgeben. Wird das zu entwickelnde System als Produkt wahrgenommen, spricht man auch von PGE - Produktgenerationsentwicklung. (IPEK Glossar, 2024a)
<b>Photopolymerisation</b>	Als Photopolymerisation (auch als Polyreaktion oder Polymerbildungsreaktion) wird eine Kettenreaktion bezeichnet, bei der die „selektive Verfestigung eines flüssigen monomeren Harzes (des Epoxid-, Acryl- oder Vinylether-Typs) mittels ultravioletter (UV-)Strahlung“ stattfindet (Gebhardt, Kessler & Schwarz, 2019, S. 53).

<b>Prototyp</b>	Ein Prototyp ist eine „physikalische Darstellung eines gesamten Produkts oder einer Komponente davon, die mit Einschränkungen für Analyse, Design und Auswertung verwendet werden kann“, wobei die Anforderungen vom konkreten Analyse- und Auswertungsbedarf abhängt (DIN EN ISO/ASTM 52900, S. 18). Ein Prototyp entspricht nicht dem Produkt, sondern hat einen idealerweise hohen Abstraktionsgrad, so dass er nur die zu evaluierenden Funktionalitäten aufweist (Gebhardt, 2016; Lim et al., 2008).
<b>Referenzsystem</b>	Das Referenzsystem für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration ist ein System, dessen Elemente bereits existierenden oder zuvor geplanten sozio-technischen Systemen und der zugehörigen Dokumentation entstammen und Grundlage und Ausgangspunkt der Entwicklung der neuen Produktgeneration sind (Albers, Rapp et al., 2019).
<b>Spritzguss-formeinsatz</b>	Ein Spritzgussformeinsatz (kurz: Formeinsatz) ist eine Komponente eines Spritzgusswerkzeuges. Er enthält die formgebende Kontur zur Erstellung eines Formteils.
<b>Spritzgussformteil</b>	Ein Spritzgussformteil (kurz: Formteil) wird durch das Einspritzen von geschmolzenem Kunststoff in eine Spritzgussform hergestellt, die die gewünschte Form und Struktur des Endprodukts definiert. Die Spritzgussform besteht normalerweise aus zwei Hälften, zwischen denen der geschmolzene Kunststoff eingespritzt wird. Sobald der Kunststoff abgekühlt und ausgehärtet ist, wird die Form geöffnet, und das fertige Spritzgussformteil wird entformt.
<b>Stammwerkzeug</b>	Ein Stammwerkzeug ist ein Werkzeug, welches durch Anpassungen zur Herstellung verschiedener Formteile genutzt werden kann. Üblicherweise werden dazu verschiedenartige Spritzgussformeinsätze in das Stammwerkzeug eingebracht. Das Stammwerkzeug wird häufig auch als Stammform oder Master-Unit-Die (MUD) bezeichnet.
<b>Test</b>	Ein Test ermittelt „Systemeigenschaften eines [zu untersuchenden] Systems [...] und liefert Erkenntnisse über das System, insbesondere ob das System zuvor definierte Ziele, Anforderungen oder Hypothesen ganz, teilweise oder nicht erfüllt.“ (Ebel, 2015; zitiert nach Albers, Behrendt et al., 2016, S. 554). Dabei besteht der Test

immer aus einem *Testfall*, einer *Testumgebung* und einer *Testinterpretation* (Ebel, 2015, S. 136).

**Validierung und Verifikation**

Validierung bezeichnet bezogen auf technische Systeme die „Prüfung [...], ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt“ (VDI-Richtlinie 2206, S. 39). Die Validierung geht damit über die Verifikation, also den formalen Abgleich der technischen Lösung mit der Spezifikation, hinaus. Die Validierung beantwortet die Frage, ob das richtige Produkt entwickelt wird, während die Verifikation die Antwort auf die Frage liefert, ob ein korrektes Produkt entwickelt wird (Albers, Behrendt et al., 2016).

**Validierungsumgebung**

Eine Validierungsumgebung bezeichnet eine „konkrete Ausprägung des Handlungssystems zur Validierung in Bezug auf Methoden und das Ressourcensystem für eine oder mehrere Kombinationen aus einem Produkt, einem Punkt im Produktlebenszyklus und einem Validierungsziel“. Sie stellt damit eine Auswahl der Elemente des Validierungssystems dar, die für die Erreichung eines bestimmten Validierungsziels benötigt werden. (Albers, Behrendt et al., 2016, S. 547)

**Werkzeugstandzeit**

Die Werkzeugstandzeit (kurz: Standzeit) bezeichnet die Zeitspanne, während der ein Werkzeug effektiv und wirtschaftlich arbeitet, bevor es gewartet, repariert oder ersetzt werden muss.

**Wiedergabetreue**

Die Wiedergabetreue (eng. fidelity) bezeichnet den Grad der Gleichheit eines Prototyps mit dem späteren Produkt (Klingler, 2016, S. 80), welche differenziert nach verschiedenen Wiedergabedimensionen beschrieben werden kann (Hochreuter et al., 2013).

**Zielsystem**

Ein Zielsystem beinhaltet alle expliziten Ziele eines zu entwickelnden Produktes, einschließlich derer Abhängigkeiten und Randbedingungen, innerhalb eines definierten Interessenbereichs zu einem bestimmten Zeitpunkt (Albers & Braun, 2011a).

# Anhang A – Produktprofil-Schema

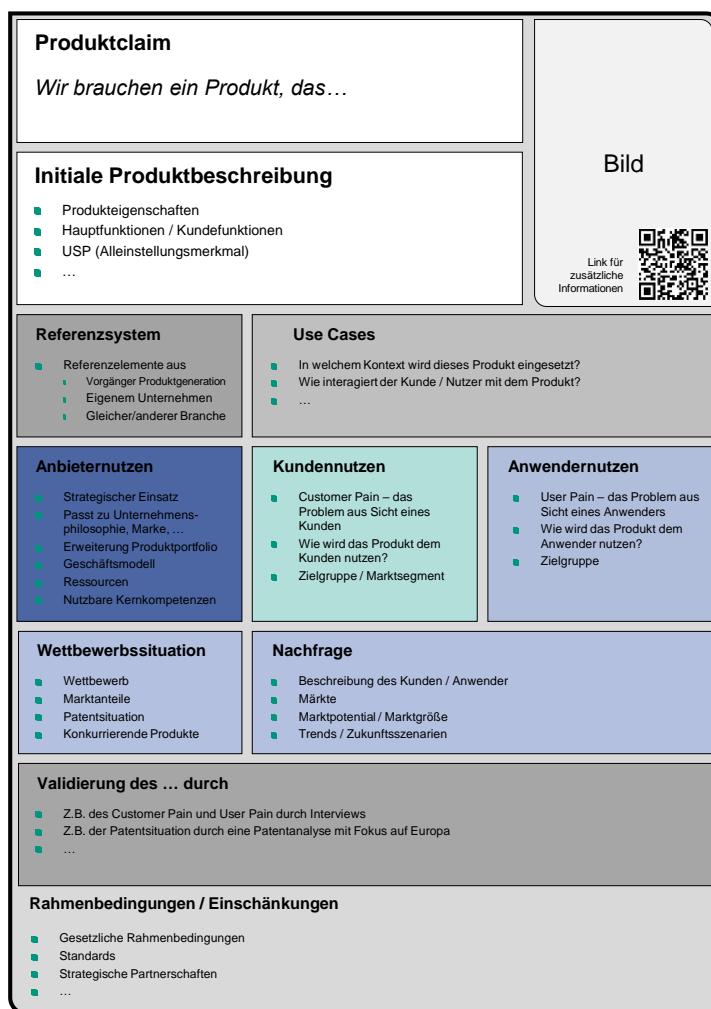


Abbildung A.1: Produktprofil-Schema zur Darstellung von Produktprofilen nach Albers und Heimicke et al. (2018, S. 257)



# Anhang B – Daten zur Forschungsumgebung

## B1 – 3D-Drucker: Stratasys J750

Für die additive Fertigung von AT-Formeinsätzen wird der 3D-Drucker „J750“ der Firma *Stratasys Ltd.* eingesetzt, der dem Labor Rapid Prototyping der Hochschule Offenburg zur Verfügung steht. Dabei handelt es sich um einen Multi-Material-Photopolymerdrucker, der nach dem *Poly-Jet* Verfahren (vgl. Abschnitt 2.3.3.3) arbeitet. Während eines Druckvorgangs lassen sich damit bis zu sechs verschiedene Photopolymere simultan verarbeiten, wobei Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung stehen. Aufgrund der guten thermomechanischen Eigenschaften wird das Material „Digital ABSplus“ zur Herstellung von AT-Formeinsätzen genutzt. Wichtige technische Daten und Eigenschaften der eingesetzten AM-Anlage und des verwendeten AM-Materials können Tabelle B1.1 entnommen werden.

Tabelle B1.1: Wichtige Eigenschaften und Einstellungen der eingesetzten AM-Anlage und des verwendeten AM-Materials<sup>1</sup>

AM-Anlage:	J750 (Stratasys Ltd.)
Modell-Material	Digital ABSplus (RGD 515 + RGD 531)
Support-Material	SUP706
Bauraumgröße (X/Y/Z)	490 x 390 x 200 mm
Druckmodus	High Quality (HQ)
Schichtstärke	14 µm
Genauigkeit	Features unter 50 mm: 20-85 µm, darüber bis volle Größe: bis zu 200 µm
Oberflächenmodus	Glossy
AM-Material:	Digital ABSplus (RGD 515 + RGD 531)
Zugfestigkeit <sup>1</sup>	55 - 60 MPa
Bruchdehnung <sup>2</sup>	25 - 40 %
E-Modul <sup>3</sup>	2.600 - 3.000 MPa
HDT <sup>4</sup>	58 - 68 °C
Testmethode nach ASTM:	<sup>1</sup> D-638-03   <sup>2</sup> D-638-05   <sup>3</sup> D-638-04   <sup>4</sup> D-648-06

<sup>1</sup> Quelle: Produktdatenblätter der Stratasys Ltd.: *PSS\_PJ\_Stratasys J750\_0117c* und *MSS\_PJ\_DigitalABSPlus\_0318a*.

## B2 – Werkzeug-Stammform

Im Rahmen dieser Arbeit wurden AT-Formeinsätze in Kombination mit einer Stammform - auch Master-Unit-Die (MUD) genannt - verwendet (siehe Abschnitte 5.2, 6.4 & 7.2). Als Basisaufbau wurde das Werkzeugschnellwechselsystem *K3500* der Firma HASCO Hasenclever GmbH & Co. KG verwendet. Dieses Werkzeugsystem erlaubt die Aufnahme von Formeinsätzen mit einer Grundfläche von bis zu 200 x 140 mm. Die minimale Höhe des Formeinsatzpaars muss mindestens 80 mm betragen um die Kavität vollständig schließen zu können. Relevante Vorarbeiten zur Planung des Werkzeuges wurden im Zuge der studentischen Abschlussarbeit von Müller (2017)<sup>2</sup> und der studentischen Seminararbeit von Proksch (2020b)<sup>3</sup> geleistet. Für die Anwendung in dieser Arbeit wurden jeweils für die Düsen- und Auswerferseite Hinterlegeplatten aus Stahl eingesetzt. Diese dienten als ebene Auflagefläche und Stütze für die verhältnismäßig empfindlichen AT-Formeinsätze aus *Digital ABSplus* und enthielten Gewinde zur Befestigung der Formeinsätze, des Auswerferpaketes, sowie des Zusammenbaus des Schnellwechselpaktes innerhalb des Stammaufbaus. In Abbildung B2.1 wird eine Schnittdarstellung des Werkzeuges mit der Konfiguration aus der technischen Vorstudie „Zugprobe“ (siehe Abschnitt 5.2) gezeigt.

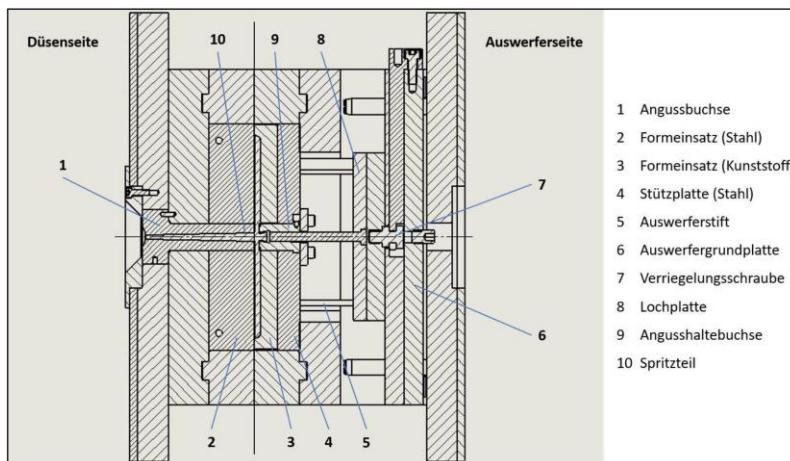


Abbildung B2.1: Aufbau der genutzten Werkzeugstammform mit Zugproben-Form-einsatz in Schnittdarstellung (Proksch, 2020b, S. 16)

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit.

<sup>3</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

## Anhang C – Markt- und Beschaffungsstudie

Tabelle C.1: Vom Verfasser zusammengefasste Angebotspreise des ersten Stu-  
dienteils auf Grundlage von Chang (2020)<sup>1</sup>.

Fertigungsverfahren	CNC			HSC			AT		
Formeinsatz ↓	min.	Ȑ	max.	min.	Ȑ	max.	min.	Ȑ	max.
Eiskratzer DS-G1	194,07	532,03	1680,00	132,07	287,41	550,00	127,81	277,58	494,35
Eiskratzer DS-G2	291,35	722,25	1780,00	285,20	508,48	750,00	694,88	2106,97	4097,36
Eiskratzer DS-G3	411,55	1141,96	1980,00	370,80	712,73	1091,79	1427,07	3663,43	5147,25
Eiskratzer AS-G1	176,38	523,83	1580,00	141,96	330,52	750,00	137,09	289,07	486,27
Eiskratzer AS-G2	315,03	860,65	1880,00	257,39	609,01	950,00	770,78	1852,24	2582,41
Eiskratzer AS-G3	495,10	1232,83	2007,61	435,93	819,09	1175,62	2006,68	6781,18	13394,30
Oring DS-V1-G1	136,62	314,19	692,37	125,75	261,26	550,00	105,17	222,20	402,62
Oring DS-V1-G2	218,10	585,60	1560,60	209,78	455,41	750,00	660,08	1568,31	3397,02
Oring DS-V1-G3	375,02	568,50	696,80	270,26	618,77	950,00	1520,12	3936,35	5722,31
Oring DS-V2-G1	138,99	308,50	661,64	124,46	259,29	550,00	101,56	221,96	404,32
Oring DS-V2-G2	205,95	587,58	1575,06	193,00	447,66	750,00	531,29	1311,30	2000,62
Oring DS-V2-G3	369,39	568,11	696,80	259,38	612,19	950,00	1516,84	3935,22	5720,80
Oring AS-V1-G1	140,90	295,74	672,46	130,45	263,44	550,00	101,80	221,03	398,49
Oring AS-V1-G2	226,39	553,60	1526,24	203,13	449,10	750,00	531,88	1311,98	2002,58
Oring AS-V1-G3	369,71	534,80	612,93	264,54	615,84	950,00	1520,21	3935,27	5723,00
Oring AS-V2-G1	141,40	289,64	643,56	128,16	260,47	550,00	101,50	221,82	403,49
Oring AS-V2-G2	200,29	561,20	1569,65	186,49	443,99	750,00	530,93	1311,76	2002,39
Oring AS-V2-G3	371,10	535,79	611,78	259,52	609,84	950,00	1516,35	3935,68	5723,00
Zugprobe DS-G1	105,53	247,97	538,60	91,53	213,37	550,00	97,05	239,86	397,69
Zugprobe DS-G2	174,28	433,81	1330,84	153,29	356,63	750,00	506,65	1289,19	2010,11
Zugprobe DS-G3	330,58	414,53	526,05	227,56	542,23	950,00	1457,35	3685,45	5727,65
Zugprobe AS-m.K.-G1	207,97	421,08	817,21	163,21	349,04	950,00	108,45	240,02	397,69
Zugprobe AS-m.K.-G2	406,39	942,22	2148,86	248,15	631,63	1150,00	586,81	1453,87	2884,48
Zugprobe AS-m.K.-G3	614,43	768,41	875,00	310,52	734,88	1350,00	1598,48	4138,11	7072,80
Zugprobe AS-o.K.-G1	155,01	326,21	649,86	107,93	308,06	800,00	100,85	241,45	405,70
Zugprobe AS-o.K.-G2	260,21	658,22	1560,60	219,67	525,85	1000,00	529,00	1313,67	2164,74
Zugprobe AS-o.K.-G3	416,46	557,42	667,80	410,40	713,76	1200,00	1501,29	3726,98	5638,19

- Alle Preise in € zzgl. MwSt.
- DS: Düsenseite
- AS: Auswerferseite
- V: Variante
- m.K.: mit Kühlkanal
- o.K.: ohne Kühlkanal
- G1: 100x70x20 mm
- G2: 200x140x40 mm
- G3: 300x210x60 mm
- Günstigstes
- Teuerstes
- Dazwischen

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

Tabelle C.2: Vom Verfasser zusammengefasste Daten des zweiten Studienteils auf Grundlage von Kaltenbach (2021)<sup>2</sup>.

Formeinsatz-Nr.	Formeinsatz 4	Formeinsatz 5	Formeinsatz 6
Bezeichnung	Hülse	Hülse mit Gewinde	Schraube
Anzahl an Elementen	2	3	4
Größe der Elemente [mm] (Bounding-Box)	100 x 70 x 40,3	60 x 60 x 20,3	100 x 37 x 20,3
	100 x 70 x 40,3	100 x 70 x 20,3	100 x 37 x 20,3
		100 x 70 x 20,3	100 x 28,5 x 30
			100 x 36,5 x 30
Zu zerspanendes Volumen [mm <sup>3</sup> ]	165.300	83.110	143.220
Endvolumen [mm <sup>3</sup> ]	257.900	132.070	202.000
Hinterschneidung	Nein, einfaches Auf-Zu-Werkzeug	Ja, manuelle Auflösung der Hinterschneidung bei Entnahme	Ja, automatische Auflösung der Hinterschneidung durch Schieberelemente
Angebotspreis (Lieferzeit [Tage])	Min.	KT	<b>124,35 € (18)</b>
		AT	<b>349,48 € (8)</b>
	$\bar{x}$	KT	357,82 €
		AT	995,01 €
Lieferzeit [Tage] (Preis)	Min.	KT	<b>3 (558,95 €)</b>
		AT	<b>3 (1.278,25 €)</b>
	$\bar{x}$	KT	13,8
		AT	8,0

KT = Konventionelles Tooling  
AT= Additive Tooling

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

## Anhang D – Technische Vorstudie

### D1 – Daten und Parameter der technischen Vorstudie „Zugprobe“

Tabelle D1.1: Fertigungsparameter für die AT-Formeinsätze der technischen Vorstudie (siehe Abschnitt 5.2)

<b>AM-Anlage</b>	J750 (Stratasys)
<b>AM-Material</b>	Digital ABSplus (RGD515 + RGD531)
<b>Druckmodus</b>	High Quality
<b>Schichtstärke</b>	14 µm
<b>Oberflächenmodus</b>	Glossy

Tabelle D1.2: Fertigungsparameter für die Zugstäbe der technischen Vorstudie (siehe Abschnitt 5.2)

<b>Material:</b>	<b>ABS</b>		<b>PP</b>		<b>PBT</b>	
	<b>Werkzeug:</b>	<b>AT</b>	<b>Stahl</b>	<b>AT</b>	<b>Stahl</b>	<b>AT</b>
Zuhaltkraft (kN)	200	500	150	500	250	700
Einspritzdruck (bar)	430	800	240	470	430	728
Einspritzgeschw. (cm <sup>3</sup> /s)	10	30	10	30	10	10
Einspritzvolumen (cm <sup>3</sup> )	31	-	31	-	35	-
Einspritztemp. (°C)	255	250	220	220	255	255
Einspritzzeit (s)	3,45	1,29	3,43	1,29	4,28	3,83
Nachdruck (bar)	200	450	100	200	100	600
Nachdruckzeit (s)	10	10,3	10	10	10	16
Restkühlzeit (s)	150	20	150	20	150	20
Pausenzeit (s)*	200-220	0	200	0	180-220	0
Zykluszeit, ca. (s)	373	40	363	40	364	70

\*Druckluftkühlung für AT-Formeinsätze bis Werkzeugwandtemperatur <= 35°C

## D2 – Versuchsaufbau

Im Zuge der technischen Vorstudie (siehe Abschnitt 5.2) wurde das Abkühlverhalten der eingesetzten AT-Formeinsätze und die Formeinsatzstauchung untersucht. Dazu wurden Video-Wärmebildaufnahmen mit einer Thermografie-Kamera (IR-Kamera) aufgenommen und ausgewertet. Neben der Temperaturverteilung stand insbesondere die Abkühlzeit mit und ohne Druckluftkühlung im globalen Formnest-Hotspot im Fokus der Untersuchung. Die Werkzeugstauchung unter verschiedenen Schließkrafteinstellungen wurde mittels Messuhr ermittelt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung D2.1 dargestellt.

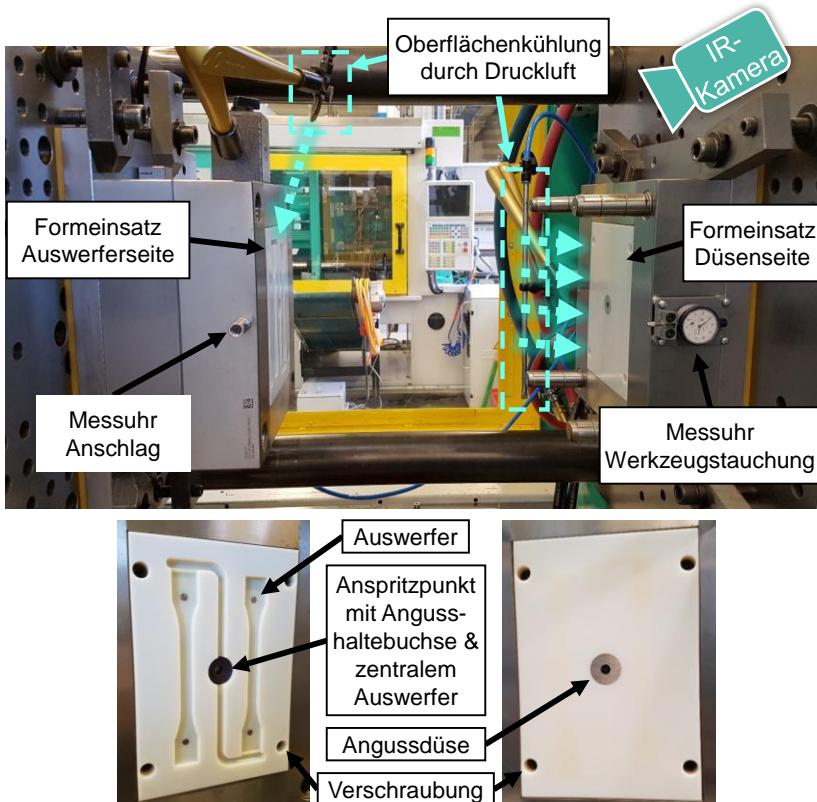


Abbildung D2.1: Versuchsaufbau der technischen Vorstudie „Zugprobe“

### D3 – Versuchsauswertung

Um eine möglichst lange Werkzeugstandzeit zu erreichen, wurde eine maximale Werkzeugwandtemperatur von ca. 40 °C vor Beginn des nächsten Spritzgießzyklus definiert. Die Temperatur im Hotspot direkt nach dem Entformen der Zugproben aus PP betrug zwischen ca. 100 °C bis 110 °C. Abbildung D3.1 zeigt die ausgewerteten Messstellen.

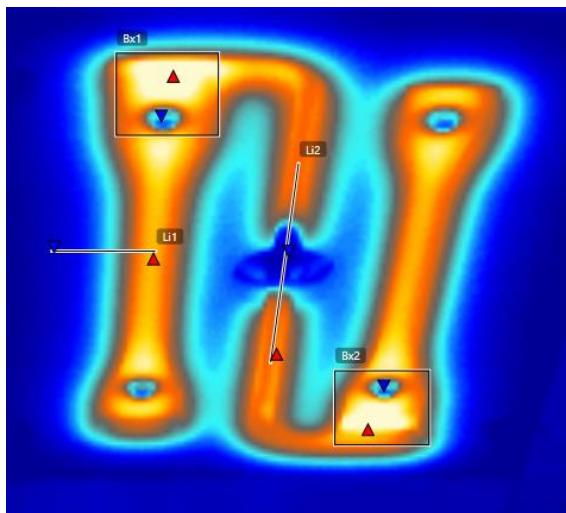


Abbildung D3.1: Messstellen zur Auswertung der Wärmebildaufnahmen. Betrachtet wurden die Temperaturminima (blau) und -maxima (rot) innerhalb der Messboxen Bx1 und Bx2, sowie auf den Messlinien Li1 und Li2.

Die Zeit bis zum Erreichen der selbst definierten Werkzeugwandtemperatur im Hotspot ca. 40 °C mit Druckluftkühlung liegt bei ca. 2 Minuten (siehe Abbildung D3.2). Ohne Druckluftkühlung beträgt die Zeit ca. 7 Minuten, also etwa dreieinhalbmal so lange (siehe Abbildung D3.3).

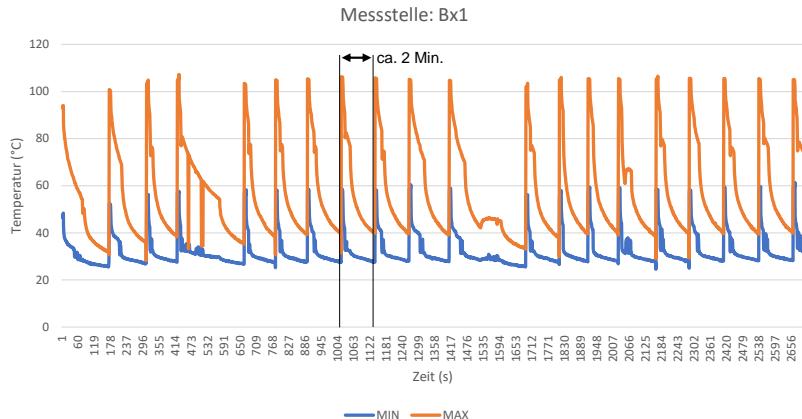


Abbildung D3.2: Abkühlzeit der AT-Werkzeugwand mit Druckluftkühlung auf ca. 40 °C (Hinweis: Der Chart stellt pro Zyklus nur die Zeit vom Öffnen bis zum Schließen des Werkzeuges dar.)



Abbildung D3.3: Abkühlzeit der AT-Werkzeugwand ohne Druckluftkühlung auf ca. 40 °C (Hinweis: Der Chart stellt pro Zyklus nur die Zeit vom Öffnen bis zum Schließen des Werkzeuges dar.)

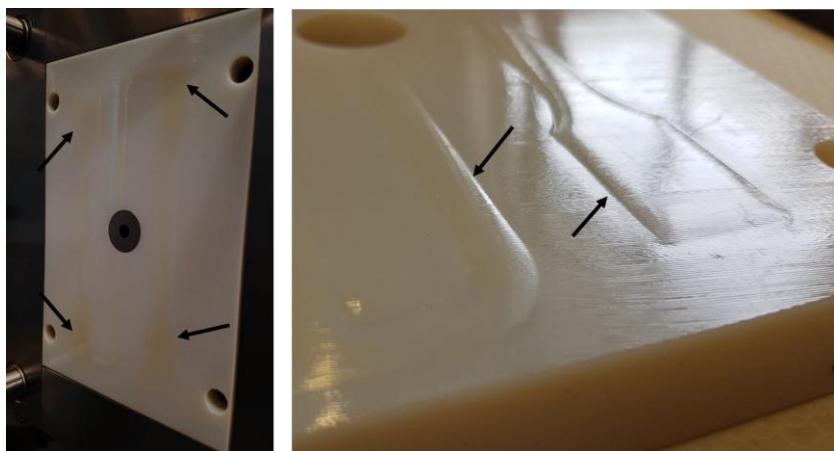


Abbildung D3.4: Veränderungen am AT-Formeinsatz nach mehreren Zyklen.  
Links: Gelbfärbung als Zeichen für Materialschädigung durch Wärmeeinwirkung. Rechts: Abdrücke durch Werkzeugschließkraft.

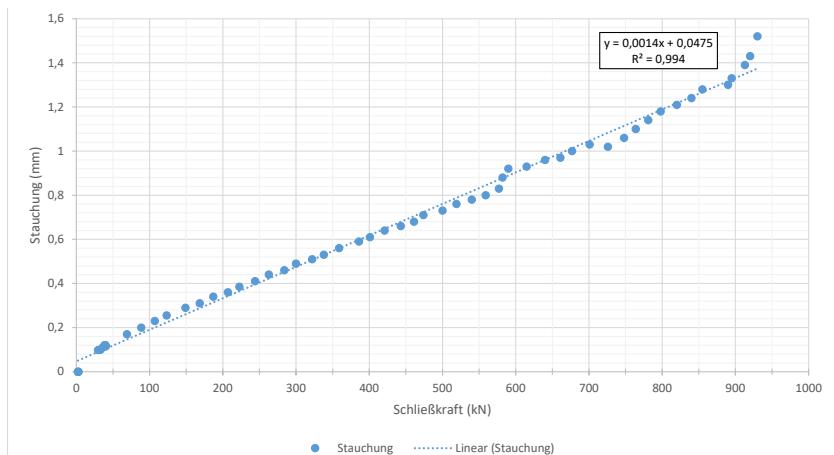


Abbildung D3.5: Schließkraft-Stauchungs-Diagramm für den AT-Formeinsatz „Zugprobe“. Aufgrund des hohen Bestimmtheitsmaßes von  $R^2 = 0,994$  kann die Formeinsatzstauchung annähernd linear berechnet werden.

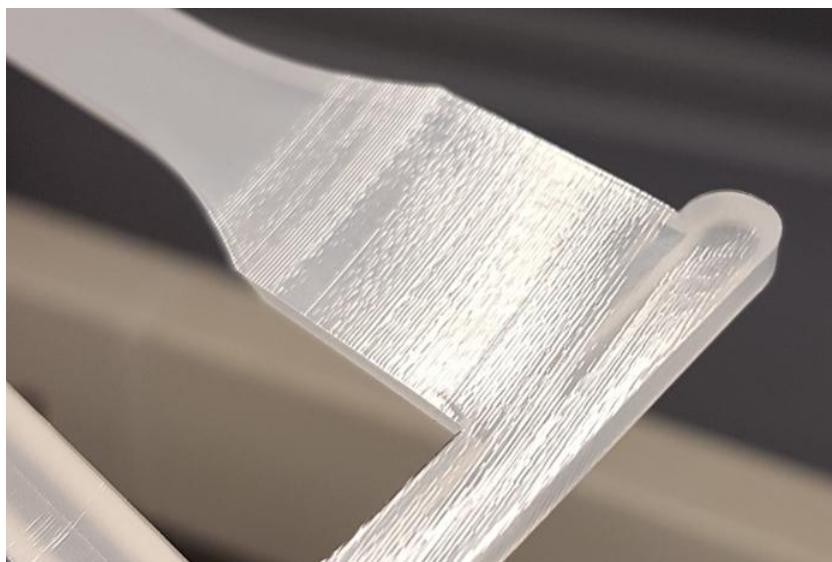


Abbildung D3.6: Sichtbare Oberflächenbeschaffenheit der AT-Formteile mit PolyJet-typischer, riefiger Oberfläche.

## D4 – Prozess-Modell der Vorstudie „Zugprobe“

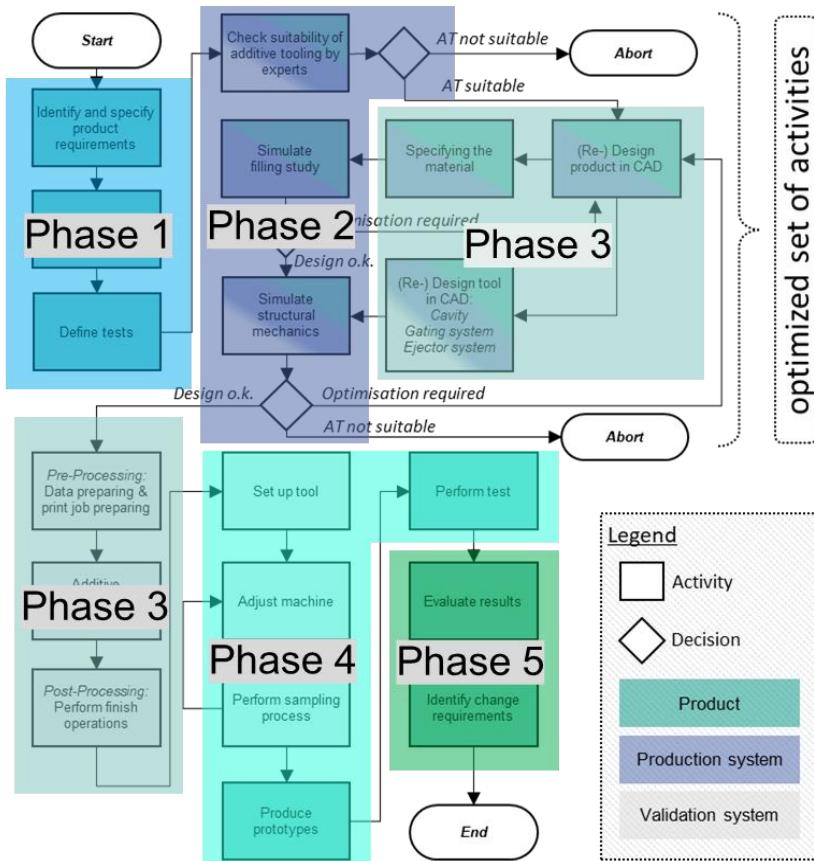


Abbildung D4.1: Optimiertes Prozessmodell der Vorstudie „Zugprobenwerkzeug“ (siehe Abschnitt 5.2) auf das die AT-Systematik (siehe Abschnitt 6.2) aufbaut (in Anlehnung an Schrock et al., 2022).

## D5 – Zugversuch-Prüfprotokoll: ABS, AT-Formeinsatz

Prüfnorm : DIN EN ISO 527-1  
 Art und Bezeichnung : Zugversuch an Kunststoffzugstab  
 Werkstoff : ABS HG 0760 GP  
 Probenentnahme : Schulterstab spritzgegossen / Kunststoffeinsatz  
 Probentyp : Schulterstab Typ 1A  
 Vorbehandlung : Keine  
 Prüfer : Gernot Dufner  
 Bemerkung :

Vorkraft : 0,05 MPa  
 Geschwindigkeit Zugmodul : 0,5 mm/min  
 Prüfgeschwindigkeit : 20 mm/min

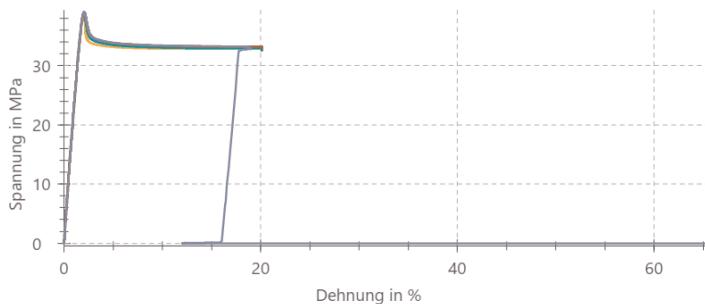
### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	L <sub>0</sub>	h	b	E <sub>t</sub>	μ	σ <sub>Y</sub>	ε <sub>Y</sub>	σ <sub>M</sub>	ε <sub>M</sub>
		mm	mm	mm	MPa		MPa	%	MPa	%
■	1	50,09	3,66	9,624	2390	0,31	38,6	2,0	38,6	2,0
■	2	50,08	3,66	9,624	2380	0,30	38,7	2,0	38,7	2,0
■	3	50,09	3,66	9,624	2390	0,36	39,0	2,0	39,0	2,0
■	4	50,09	3,66	9,624	2370	0,37	39,0	2,0	39,0	2,0
■	5	50,09	3,66	9,624	2390	0,37	39,0	2,0	39,0	2,0
■	6	50,09	3,66	9,624	2370	0,36	39,0	2,0	39,0	2,0
■	7	50,09	3,66	9,624	2370	0,37	39,1	2,0	39,1	2,0

### Statistik:

RT	L <sub>0</sub>	h	b	E <sub>t</sub>	μ	σ <sub>Y</sub>	ε <sub>Y</sub>	σ <sub>M</sub>	ε <sub>M</sub>	
n = 7	mm	mm	mm	MPa		MPa	%	MPa	%	
x	50,09	3,66	9,624	2380	0,35	38,9	2,0	38,9	2,0	
s	0,00	0,000	0,000		9,16	0,03	0,192	0,0	0,192	0,0
V [%]	0,01	0,00	0,00		0,38	8,85	0,49	0,84	0,49	0,84

### Seriengrafik:



## D6 – Zugversuch-Prüfprotokoll: ABS, Stahl-Formeinsatz

Prüfnorm : DIN EN ISO 527-1  
 Art und Bezeichnung : Zugversuch an Kunststoffzugstab  
 Werkstoff : ABS HG 0760 GP  
 Probenentnahme : Schulterstab spritzgegossen / Stahleinsatz  
 Probenotyp : Schulterstab Typ 1A  
 Vorbehandlung : Keine  
 Prüfer : Gernot Dufner  
 Bemerkung :  
 Vorkraft : 0,05 MPa  
 Geschwindigkeit Zugmodul : 0,5 mm/min  
 Prüfgeschwindigkeit : 20 mm/min

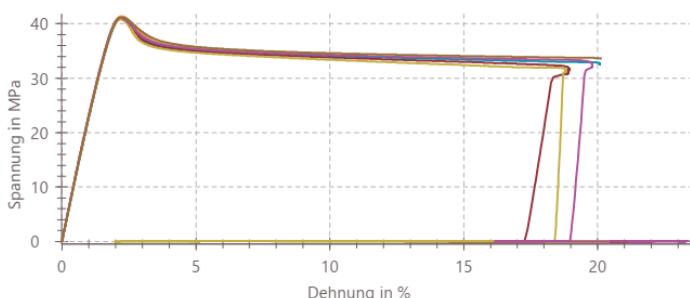
### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	$L_0$ mm	$h$ mm	$b$ mm	$E_t$ MPa	$\mu$	$\sigma_y$ MPa	$\varepsilon_y$ %	$\sigma_m$ MPa	$\varepsilon_m$ %
■	1	50,09	3,975	9,835	2360	0,29	41,4	2,2	41,4	2,2
■	2	50,09	3,975	9,835	2360	0,30	41,1	2,2	41,1	2,2
■	3	50,09	3,975	9,835	2350	0,30	41,1	2,2	41,1	2,2
■	4	50,09	3,975	9,835	2360	0,31	40,9	2,2	40,9	2,2
○	5	50,09	3,975	9,835	2370	0,34	41,2	2,2	41,2	2,2
○	6	50,09	3,975	9,835	2350	0,28	41,0	2,2	41,0	2,2
■	7	50,09	3,975	9,835	2400	0,32	41,1	2,2	41,1	2,2
■	8	50,09	3,975	9,835	2350	0,29	41,2	2,2	41,2	2,2

### Statistik:

RT	$L_0$ mm	$h$ mm	$b$ mm	$E_t$ MPa	$\mu$	$\sigma_y$ MPa	$\varepsilon_y$ %	$\sigma_m$ MPa	$\varepsilon_m$ %
$n = 6$									
x	50,09	3,975	9,835	2360	0,30	41,1	2,2	41,1	2,2
s	0,00	0,000	0,000	20,8	0,01	0,177	0,0	0,177	0,0
V [%]	0,01	0,00	0,00	0,88	3,17	0,43	0,87	0,43	0,87

### Seriengrafik:



**D7 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PP, AT-Formeinsatz**

Prüfnorm : DIN EN ISO 527-1  
 Art und Bezeichnung : Zugversuch an Kunststoffzugstab  
 Werkstoff : PP EA648P  
 Probenentnahme : Schulterstab spritzgegossen / Kunststoffeinsatz  
 Probentyp : Schulterstab Typ 1A  
 Vorbehandlung : Keine  
 Prüfer : Gernot Dufner  
 Bemerkung :

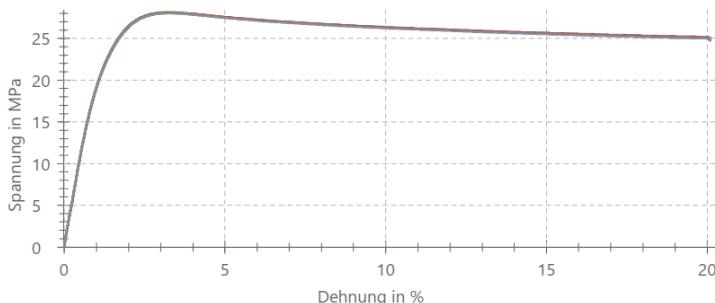
Vorkraft : 0,05 MPa  
 Geschwindigkeit Zugmodul : 0,5 mm/min  
 Prüfgeschwindigkeit : 20 mm/min

**Prüfergebnisse:**

Legende	Nr	Lo	$\sigma_B$	$\varepsilon_B$	h	b	$E_t$	$\mu$	$\sigma_Y$	$\varepsilon_Y$	$\sigma_M$	$\varepsilon_M$
		mm	MPa	%	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	
1	50,08	-	-	3,403	9,395	2100	0,39	28,1	3,3	28,1	3,3	
2	50,09	-	-	3,403	9,395	2090	0,39	28,0	3,2	28,0	3,2	
3	50,09	-	-	3,403	9,395	2110	0,40	28,1	3,2	28,1	3,2	
4	50,09	-	-	3,403	9,395	2130	0,40	28,1	3,2	28,1	3,2	
5	50,09	-	-	3,403	9,395	2110	0,39	28,1	3,2	28,1	3,2	
6	50,09	-	-	3,403	9,395	2110	0,40	28,1	3,2	28,1	3,2	
7	50,09	-	-	3,403	9,395	2110	0,41	28,0	3,2	28,0	3,2	

**Statistik:**

RT	Lo	$\sigma_B$	$\varepsilon_B$	h	b	$E_t$	$\mu$	$\sigma_Y$	$\varepsilon_Y$	$\sigma_M$	$\varepsilon_M$	
n = 7	mm	MPa	%	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%
x	50,09	-	-	3,403	9,395	2110	0,40	28,1	3,2	28,1	3,2	
s	0,00	-	-	0,000	0,000	10,7	0,01	0,0393	0,0	0,0393	0,0	
V [%]	0,01	-	-	0,00	0,00	0,51	1,66	0,14	0,92	0,14	0,92	

**Seriengrafik:**

## D8 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PP, Stahl-Formeinsatz

Prüfnorm : DIN EN ISO 527-1  
 Art und Bezeichnung : Zugversuch an Kunststoffzugstab  
 Werkstoff : PP EA648P  
 Probenentnahme : Schulterstab spritzgegossen / Stahleinsatz  
 Probentyp : Schulterstab Typ 1A  
 Vorbehandlung : Keine  
 Prüfer : Gernot Dufner  
 Bemerkung :  
 Vorkraft : 0,05 MPa  
 Geschwindigkeit Zugmodul : 0,5 mm/min  
 Prüfgeschwindigkeit : 20 mm/min

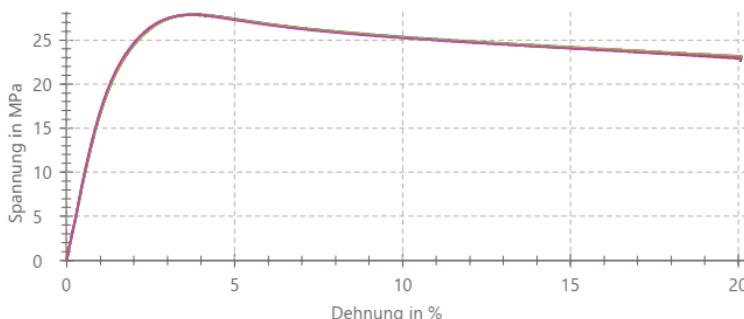
### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Lo	$\sigma_B$	$\varepsilon_B$	h	b	$E_t$	$\mu$	$\sigma_Y$	$\varepsilon_Y$	$\sigma_M$	$\varepsilon_M$
		mm	MPa	%	mm	mm	MPa		MPa	%	MPa	%
■	1	50,09	-	-	3,883	9,698	1760	0,37	27,9	3,8	27,9	3,8
■	2	50,09	-	-	3,883	9,698	1740	0,36	27,9	3,8	27,9	3,8
■	3	50,09	-	-	3,883	9,698	1760	0,37	27,9	3,7	27,9	3,7
■	4	50,09	-	-	3,883	9,698	1740	0,37	27,9	3,8	27,9	3,8
■	5	50,09	-	-	3,883	9,698	1790	0,37	27,9	3,7	27,9	3,7

### Statistik:

RT	Lo	$\sigma_B$	$\varepsilon_B$	h	b	$E_t$	$\mu$	$\sigma_Y$	$\varepsilon_Y$	$\sigma_M$	$\varepsilon_M$
n = 5	mm	MPa	%	mm	mm	MPa		MPa	%	MPa	%
x	50,09	-	-	3,883	9,698	1760	0,37	27,9	3,8	27,9	3,8
s	0,00	-	-	0,000	0,000	19,1	0,00	0,0126	0,0	0,0126	0,0
V [%]	0,00	-	-	0,00	0,00	1,09	0,92	0,05	1,12	0,05	1,12

### Seriengrafik:



## D9 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PBT, AT-Formeinsatz

Prüfnorm : DIN EN ISO 527-1  
 Art und Bezeichnung : Zugversuch an Kunststoffzugstab  
 Werkstoff : PBT Celanex 2401MT  
 Probenentnahme : Schulterstab spritzgegossen / Kunststoffeinsatz  
 Probentyp : Schulterstab Typ 1A  
 Vorbehandlung : Keine  
 Prüfer : Gernot Dufner  
 Bemerkung : Breite bzw. Querschnitt aufgrund Aufweitung nicht korrekt bestimmbar!

Vorkraft : 0,05 MPa  
 Geschwindigkeit Zugmodul : 0,5 mm/min  
 Prüfgeschwindigkeit : 20 mm/min

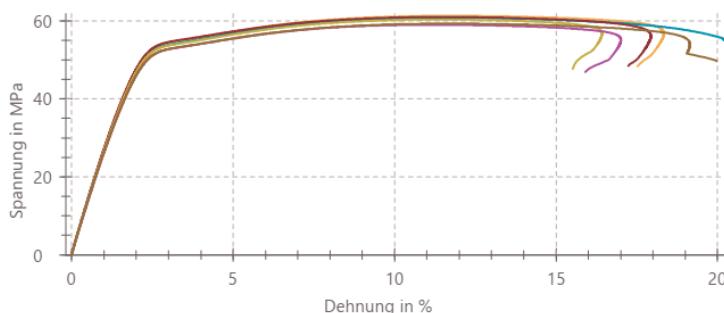
### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	$L_0$ mm	$\sigma_B$ MPa	$\varepsilon_B$ %	h mm	b mm	$E_t$ MPa	$\mu$	$\sigma_y$ MPa	$\varepsilon_y$ %	$\sigma_m$ MPa	$\varepsilon_m$ %
■	1	50,08	48,3	17,5	3,65	9,59	2890	0,32	61,3	11,7	61,3	11,7
■	2	50,09	-	-	3,65	9,59	2850	0,36	60,8	11,6	60,8	11,6
■	3	50,09	48,5	17,2	3,65	9,59	2890	0,36	61,0	11,5	61,0	11,5
■	4	50,09	47,6	15,5	3,65	9,59	2840	0,34	60,3	11,4	60,3	11,4
■	5	50,09	46,9	15,9	3,65	9,59	2760	0,36	59,0	11,3	59,0	11,3
■	6	50,09	49,7	20,0	3,65	9,59	2760	0,33	59,3	11,7	59,3	11,7

### Statistik:

RT	$L_0$ mm	$\sigma_B$ MPa	$\varepsilon_B$ %	h mm	b mm	$E_t$ MPa	$\mu$	$\sigma_y$ MPa	$\varepsilon_y$ %	$\sigma_m$ MPa	$\varepsilon_m$ %
$n = 6$											
x	50,09	48,2	17,2	3,65	9,59	2830	0,35	60,3	11,5	60,3	11,5
s	0,00	1,03	1,8	0,000	0,000	58,8	0,02	0,934	0,2	0,934	0,2
V [%]	0,01	2,13	10,18	0,00	0,00	2,08	5,08	1,55	1,60	1,55	1,60

### Seriengrafik:



## D10 – Zugversuch-Prüfprotokoll: PBT, Stahl-Formeinsatz

Prüfnorm : DIN EN ISO 527-1  
 Art und Bezeichnung : Zugversuch an Kunststoffzugstab  
 Werkstoff : PBT Celanex 2401MT  
 Probenentnahme : Schulterstab spritzgegossen / Stahleinsatz  
 Probentyp : Schulterstab Typ 1A  
 Vorbehandlung : Keine  
 Prüfer : Gernot Dufner  
 Bemerkung :

Vorkraft : 0,05 MPa  
 Geschwindigkeit Zugmodul : 0,5 mm/min  
 Prüfgeschwindigkeit : 20 mm/min

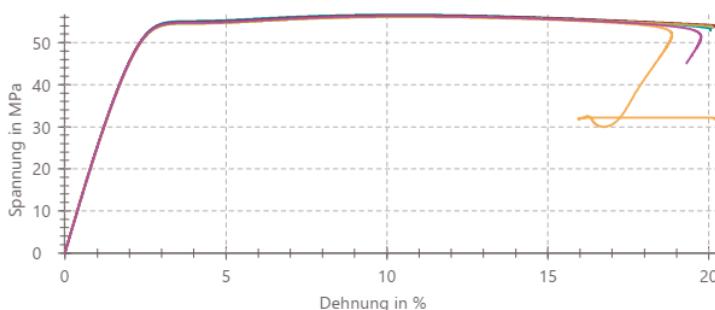
### Prüfergebnisse:

Legende	Nr	$L_0$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$h$	$b$	$E_t$	$\mu$	$\sigma_Y$	$\epsilon_Y$	$\sigma_M$	$\epsilon_M$
		mm	MPa	%	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	
■	1	50,09	-	-	4,04	9,728	2610	0,33	56,1	10,6	56,1	10,6
■	2	50,09	-	-	4,04	9,728	2590	0,36	56,6	10,3	56,6	10,3
■	3	50,09	-	-	4,04	9,728	2640	0,35	56,5	10,6	56,5	10,6
■	4	50,09	-	-	4,04	9,728	2570	0,35	56,2	10,7	56,2	10,7
■	5	50,09	45,0	19,3	4,04	9,728	2580	0,33	56,3	10,5	56,3	10,5

### Statistik:

RT	$L_0$	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$h$	$b$	$E_t$	$\mu$	$\sigma_Y$	$\epsilon_Y$	$\sigma_M$	$\epsilon_M$	
$n = 5$	mm	MPa	%	mm	mm	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%
$\bar{x}$	50,09	45,0	19,3	4,04	9,728	2600	0,34	56,3	10,6	56,3	10,6	
$s$	0,00	-	-	0,000	0,000	25,0	0,01	0,223	0,2	0,223	0,2	
$V [\%]$	0,00	-	-	0,00	0,00	0,96	3,77	0,39	1,70	0,39	1,70	

### Seriengrafik:





# Anhang E – Umfragen und Interviews der DS-I und PS

## E1 – Interviewstudie 1: Interview-Leitfaden

### Einleitung) Erläuterung der Zielsetzung des Interviews:

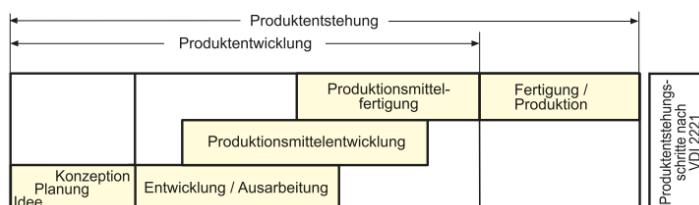
1. Ziel: Der IST-PEP soll beschrieben werden: Besonders im Hinblick auf den Prototyping-Prozess. Weiterhin soll eine Einschätzung des Experten erfolgen, welche Stärken & Schwächen, sowie Chancen & Risiken beim Einsatz von AT gesehen werden.
2. Ziel: Es soll diskutiert werden, welchen Einfluss AT auf den PEP haben kann. Zudem sollen wichtige bzw. vermutete Einflussgrößen und Prozessparameter erkannt werden, welche zum Erfolg oder Scheitern von AT beitragen können.
3. Ziel: Abschließend soll in Erfahrung gebracht werden, welchen Support der Experte als wichtig erachtet, um AT erfolgreich im eigenen PEP einsetzen zu können - idealerweise mit konkreten Ideen.

### A) Fragen zur Person und Unternehmen: (Hinweis: wird anonymisiert!)

Name, Vorname:	
Kontakt:	
Unternehmen:	
Branche:	
Unternehmensgröße:	
Fachbereich:	
Beruf:	
Art der Ausbildung:	
Berufserfahrung in Jahren:	

### B) Konventioneller Produktentwicklungsprozess

1. Wie läuft ein Produktentwicklungsprozess (PEP) bei Ihnen typischerweise ab? (Prozessablauf, Zeiten, Phasen) [ggf. Hilfestellung: VDI2221 – s.u.]



2. Welche Stakeholder/Prozessbeteiligten gibt es in Ihrem PEP? (Anzahl, Rolle)  
[z.B. Kunde, Gesetzgeber, Prüfbehörde, Produktentwickler, Werkzeugmacher, Maschinenbediener, QM-Fachkraft, ...]
3. Welche Rolle spielt die Validierung und Verifizierung im PEP und welche Resourcen stehen dazu zur Verfügung?
4. Welche Arten von Prototypen werden dabei eingesetzt und in welchen Phasen? (virtuell, physisch, 3D-Druck, ...)
5. Wann entsteht der erste physische Prototyp?
6. Was sind typische bzw. wichtige Anforderungen an diese Prototypen?
7. Wo liegen die Grenzen dieser Prototypen?
8. Wie häufig kommen Werkzeugänderungen vor?
9. Welche Auswirkungen/Ausmaße haben diese Werkzeugänderungen (z.B. auf Zeit, Kosten, Kundenzufriedenheit)?
10. Nutzen Sie Prototypenwerkzeuge vor der Entwicklung bzw. dem Aufbau des Serienwerkzeuges? Wenn ja: Sind diese aus Stahl oder Aluminium? (Diskussion Vor- und Nachteile)

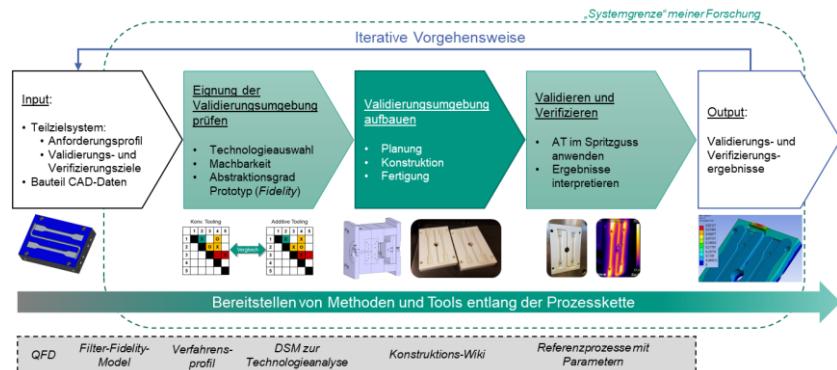
#### **C) Anwendung von Additive Tooling (AT)**

11. Welche Anforderungen würden Sie an ein Prototypwerkzeug stellen? (Kosten, Zeit bis Verfügbarkeit, Standzeit, Funktionsumfang) [Hinweis: Prototyp besitzt immer Einschränkungen]
12. Wie gut oder schlecht können diese Anforderungen Ihrer Meinung nach durch additive Werkzeuge gedeckt werden?
13. Wie würde das AT den PEP beeinflussen?
14. Welche Prozessparameter würden Sie als entscheidend für den erfolgreichen Einsatz vermuten oder nennen?
15. Bei welchen Prozessparametern sehen Sie aktuell die höchste Unsicherheit?
16. Wo sehen Sie die größten Wissenslücken und Probleme zur Einführung und Nutzung von AT?
17. Würden Sie einen hohen Aufwand für die Einführung in Kauf nehmen, wenn sich dadurch eine Verbesserung im PEP erwarten lässt? (Chance vs. Risiko, Lernkurve)
18. Sehen Sie neue Möglichkeiten durch die additive Fertigung von Spritzguss-Werkzeugen? (z.B. als „Enabler“, Multi-Material-Ansatz, ...)

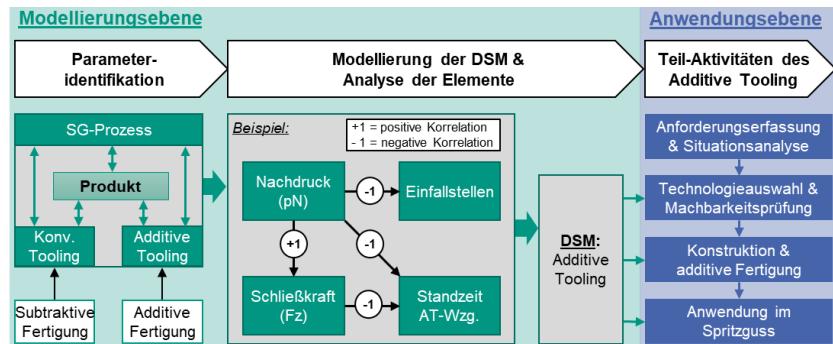
#### **D) Methodische Unterstützung für das AT**

19. Nutzen Sie aktuell bestimmte Methoden in der Produktentwicklung und der Werkzeugkonstruktion? (z.B. Methoden zur integrierten Produktentwicklung, FMEA, QFD/HoQ, FEM, Füllstudien, ...)
20. Bei AT handelt es sich um eine recht junge Anwendung. Würden Sie hier einen methodischen Ansatz zur Nutzung als sinnvoll erachten? Wie könnte dieser Aussehen? Fallen Ihnen spontan Tools und Methoden ein, die unterstützend wirken könnten (z.B. Checkliste, Leitfaden, Wiki, DSM, Verfahrensprofil, Referenzprozesse, ...)?
21. Wie „einfach“ müsste bzw. komplex dürfte eine methodische Unterstützung sein, sodass diese von Ihnen genutzt werden würde?

22. Diskussion: Einschätzung des aktuellen Standes der AT-Systematik (siehe Abbildung unten).



23. Diskussion: Einschätzung des DSM-Ansatzes zur Abbildung des komplexen Gesamtprozesses (siehe Abbildung unten).



## E2 – Studien zu Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U)

Im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit von Dogan (2022)<sup>1</sup> wurde eine Online-Studie durchgeführt, in der unter anderem der Unterstützungsbedarf für die Anwendung von AT in der Produktentwicklung ermittelt wurde. Dazu wurde ein Online-Fragebogen per Mail an 67 Unternehmen verteilt. Die Umfrage fand zwischen dem 13.08.2022 bis 20.09.2022 statt. Insgesamt nahmen 13 Teilnehmende vollständig an der Umfrage teil. Die Verteilung der Teilnehmenden nach Fachbereich und Berufserfahrung ist in Abbildung E2.1 dargestellt. Die Umfrageergebnisse zum Unterstützungsbedarf sind in Abbildung E2.2 dargestellt.

Eine Bewertung der Relevanz der in Abschnitt 6.1.2.2 definierten Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U) fand im Rahmen des in Abschnitt 7.4 vorgestellten Experteninterviews Nr. 3 statt. Die Ergebnisse dieser Bewertung sind in Abbildung E2.3 dargestellt.

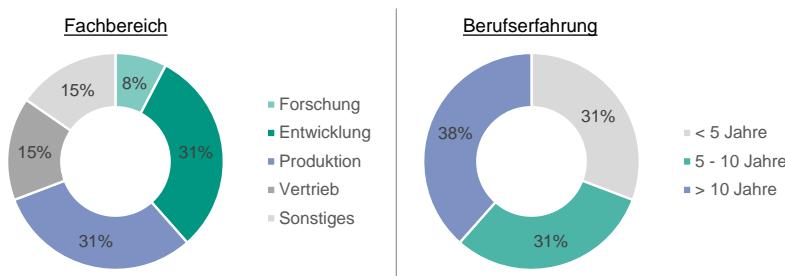


Abbildung E2.1: Verteilung der Teilnehmenden (n = 13) nach Fachbereich (li.) und Jahren an Berufserfahrung (re.) (eigene Auswertung und Darstellung auf Basis der Umfrageergebnisse von Dogan, 2022)<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

Ich sehe einen Unterstützungsbedarf...

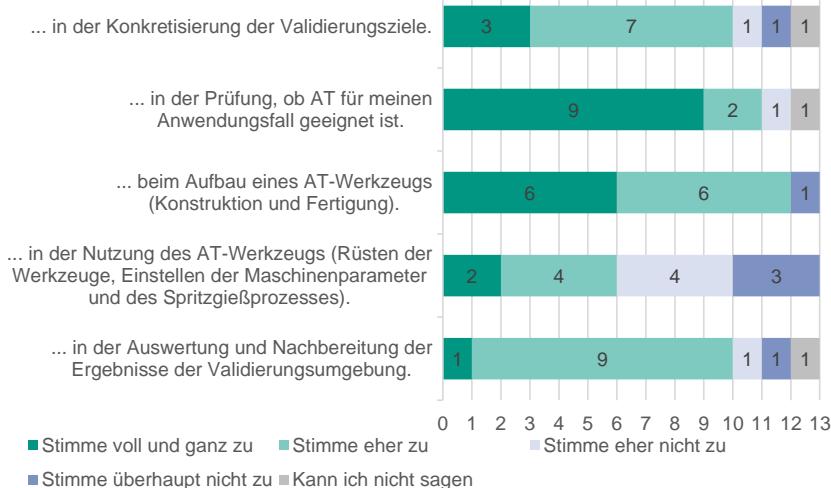


Abbildung E2.2: Auswertung zum Unterstützungsbedarf in der Anwendung von AT in der PE (eigene Auswertung und Darstellung auf Basis der Umfrageergebnisse von Dogan, 2022)<sup>3</sup>

**Aussage 1:**

Für sehr wichtig halte ich...

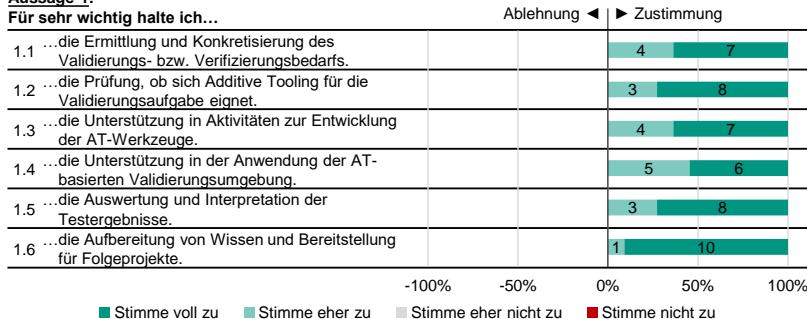


Abbildung E2.3: Bewertung der Relevanz der Anforderungen an die Unterstützungsleistung (U) aus Interviewstudie 3

<sup>3</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.



# Anhang F – Präskriptive Studie und AT-Systematik

## F1 – Phasenmodell der AT-Systematik inklusive Leitfragen, Aktivitäten des Referenzprozesses und Methodenempfehlungen

Phase 1:	Konkretisierung der Validierungsziele
Leitfrage oder Leitaktivität	„Was“ soll validiert oder verifiziert werden und welcher Testgegenstand lässt sich daraus ableiten?
Aktivitäten im Referenzprozess	<ul style="list-style-type: none"><li>• Identifikation und Spezifikation von Produktanforderungen</li><li>• Ableitung, Konkretisierung und Priorisierung der Validierungsziele</li><li>• Testgegenstand beschreiben</li><li>• Testfall (initial) beschreiben und Anforderungen an Prototyp(en) ableiten</li></ul>
Unterstützende Methoden und Hilfsmittel	AT-Checkliste, Produktprofil-Schema, Kano-Modell, House of Quality (HoQ), House of Properties (HoP) Fehlermöglichkeits- und -Einflussanalyse (FMEA), statistische Versuchsplanung (Design of Experiments (DoE)), Kritikalitätsmatrix. Weitere Hilfestellung bieten die Arbeiten von Klingler (2016) und Albers und Reinemann et al. (2019, S. 5).

Phase 2:	Prüfung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung
Leitfrage oder Leitaktivität	„Wie“ soll validiert bzw. getestet werden und eignet sich AT als Methode zur Erzeugung des Prototyps für die Bearbeitung der Validierungsaufgabe? Neben dieser Leitfrage lassen sich weitere, vertiefende Fragen formulieren, die für eine fundierte Entscheidung für oder gegen AT geklärt werden sollten: <ul style="list-style-type: none"><li>• Lässt sich AT technisch für die Validierungsaufgabe nutzen? (siehe Abschnitt 6.2.3.1)</li><li>• Kann der Prototyp in einer angemessenen Zeit und zu angemessenen Kosten hergestellt werden? (siehe Abschnitt 6.2.3.2)</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hat der Prototyp eine angemessene Wiedergabetreue und kann der beabsichtigte Zweck erreicht werden? (siehe Abschnitt 6.2.3.3)</li> </ul>
<b>Aktivitäten im Referenzprozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Material für den Prototyp festlegen</li> <li>• Technische Machbarkeit initial prüfen und bewerten (z.B. Berechnung oder Prozesssimulation zur Prozessparameterermittlung, strukturmechanische Simulation zur technischen Absicherung)</li> <li>• Wirtschaftlichkeit von AT prüfen und bewerten</li> <li>• Vergleich zwischen Prototypanforderungen und erwarteter Wiedergabetreue mit verschiedenen Prototyping-technologien durchführen und bewerten</li> <li>• Entscheidung für oder gegen AT treffen (Abbruch der AT-Systematik oder weiter zu Phase 3)</li> </ul>
<b>Unterstützende Methoden und Hilfsmittel</b>	AT-Checkliste, AT-DSM, Filter-Fidelity-Modell (FFM), FEM-Simulation (Spritzgussprozesssimulation, strukturmechanische Simulation), Template zur Abweichungsanalyse. Zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit sei auf die Arbeiten von Tosello et al. (2019) und Kampker et al. (2020) verwiesen.

<b>Phase 3:</b>	<b>Aufbau der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung</b>
<b>Leitfrage oder Leitaktivität</b>	Validierungsumgebung aufbauen und einsatzbereit machen. Dazu zählen AT-Formeinsätze, Stammform und sämtliche, zur Erfüllung der Validierungsaufgabe erforderlichen Ressourcen.
<b>Aktivitäten im Referenzprozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AT-Formeinsätze &amp; formgebende Teile konstruieren</li> <li>• Nutzbarkeit absichern (z.B. durch Simulation, siehe Phase 2)</li> <li>• Pre-Processing und Fertigungsvorbereitung</li> <li>• Additive Fertigung der Formeinsätze und Fertigung sonstiger Teile</li> <li>• Post-Processing und Nacharbeit der AT-Formeinsätze</li> <li>• Montage des Werkzeugs und der AT-Formeinsätze</li> </ul>
<b>Unterstützende Methoden und Hilfsmittel</b>	AT-Checkliste, AT-DSM, AT-Konstruktionskatalog

<b>Phase 4:</b>	<b>Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung</b>
<b>Leitfrage oder Leitaktivität</b>	AT-Prototypen herstellen und definierte Tests durchführen und dokumentieren.

<b>Aktivitäten im Referenzprozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zu verarbeitendes Material vorbereiten (z.B. trocknen, Master-Batch hinzufügen)</li> <li>• Maschine und Werkzeug rüsten</li> <li>• Abmusterungsprozess durchführen</li> <li>• Prototypen produzieren &amp; Fertigungsqualität beurteilen</li> <li>• Test(s) entsprechend Testszenarien durchführen und Ergebnisse dokumentieren</li> </ul>
<b>Unterstützende Methoden und Hilfsmittel</b>	AT-Checkliste, AT-DSM, AT-Konstruktionskatalog

<b>Phase 5:</b>	<b>Auswertung und Interpretation der Ergebnisse</b>
<b>Leitfrage oder Leitaktivität</b>	Lassen sich die Ergebnisse aus dem Prototypingprozess auf den Serienprozess übertragen?
<b>Aktivitäten im Referenzprozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parametervergleich von Prototypingprozess (IST) zu Serienprozess (SOLL)</li> <li>• Analyse, Interpretation und Bewertung von Abweichungen</li> <li>• Analyse, Interpretation und Bewertung der Testergebnisse</li> <li>• Prüfen ob Validierungsziele erreicht wurden</li> </ul>
<b>Unterstützende Methoden und Hilfsmittel</b>	AT-Checkliste, Template zur Abweichungsanalyse, AT-DSM, Ursache-Wirkungsdiagramm

<b>Phase 6:</b>	<b>Nachbereiten und Lernen</b>
<b>Leitfrage oder Leitaktivität</b>	Nachbereiten und Lernen
<b>Aktivitäten im Referenzprozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergebnisse und Prototypingprozess final dokumentieren</li> <li>• Gegebenenfalls AT-Systematik und Hilfsmittel anpassen und optimieren</li> </ul>
<b>Unterstützende Methoden und Hilfsmittel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lessons Learned</li> <li>• Pflege und Optimierung der AT-Checkliste, der AT-DSM und des AT-Konstruktionskatalogs</li> </ul>

## F2 – Aufbau und Struktur der Literatur-Datenbank

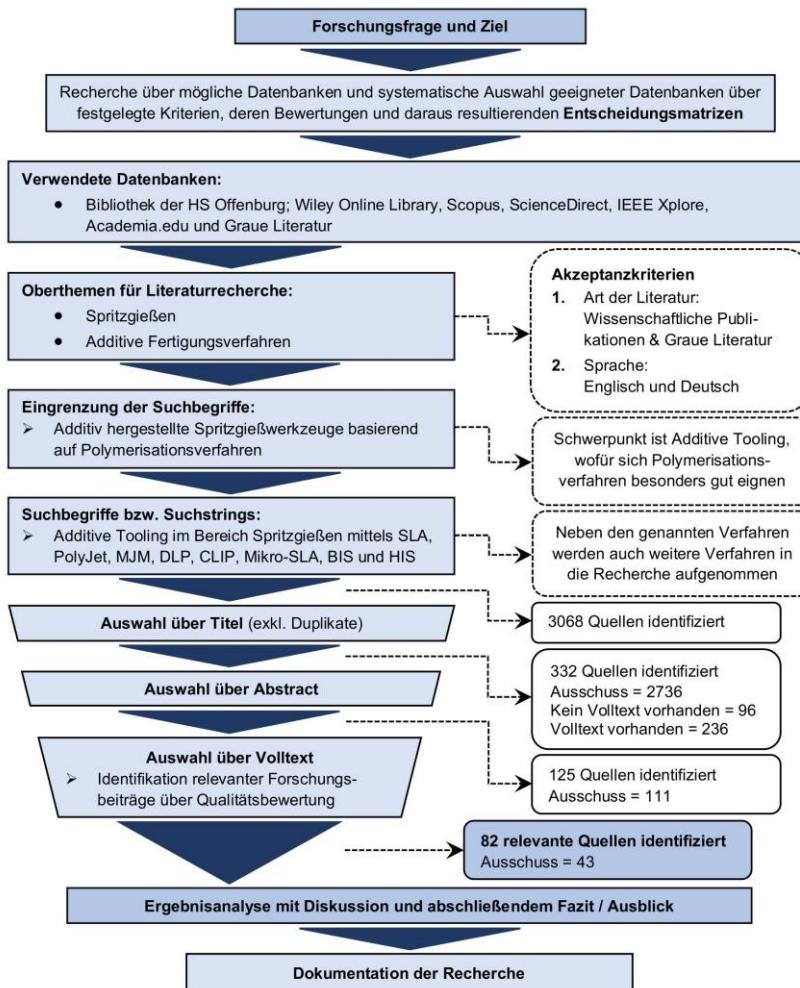


Abbildung F2.1: Vorgehen der systematischen Literaturrecherche (Schmieder, 2022, S. 34)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

Tabelle F2.1: Suchstrings der systematischen Literaturrecherche (Schmieder, 2022, S. 33)<sup>2</sup>

Nummerierung	Suchstrings aus zwei Kategorien (+ dritte Kategorie)
I	<b>Spritzgießen + Additive Fertigung</b>
I.dt.	(Spritzgie* OR Spritzgu*) AND (Additiv* OR Rapid OR Direct OR Tool* OR 3D* OR Druck*)
I.engl.	((Injection mold*) OR (mold insert)) AND (additive* OR rapid* OR prototyp* OR tool* OR direct OR jet* OR 3D* OR print*)
II	<b>Spritzgießen + Additive Fertigungsverfahren</b>
II.dt.	(Spritzgie* OR Spritzgu*) AND (Stereolithograph? OR SLA OR Polyjet* OR Polymerjet* OR (Multi Jet Modeling) OR (Digital Light Processing) OR DLP OR (Continuous Liquid Interface Production) OR (beam Interference Solidification))
II.engl.	((Injection mold*) OR (mold insert)) AND (stereolithograph? OR SLA OR polyjet* OR polymerjet* OR (multi jet modeling) OR (digital light processing) OR DLP OR (continuous liquid interface production) OR (beam interference solidification))
III	<b>Spritzgießen + Zusatz</b>
III.dt.	(Spritzgie* OR Spritzgu*) AND (Konstruktion* OR Regel* OR Richtlinie* OR Empfehlung* OR (Digital ABS) OR Multi-Material)
III.engl.	((Injection mold*) OR (mold insert)) AND (construction OR rule OR guideline OR recommendation OR (product development) OR (cooling channel) OR ejection OR silicone OR (digital ABS) OR multi-material)
IV	<b>Additive Fertigung + Additive Fertigungsverfahren (+ Zusatz)</b>
IV.dt.	(Additiv* OR Rapid OR Direct OR Tool* OR 3D* OR Druck*) AND (Stereolithograph? OR SLA OR Polyjet* OR Polymerjet* OR (Multi Jet Modeling) OR (Digital Light Processing) OR DLP OR (Continuous Liquid Interface Production) OR (beam Interference Solidification)) (AND (Konstruktion* OR Regel* OR Richtlinie* OR Empfehlung* OR (Digital ABS) OR Multi-Material))
IV.engl.	(additive* OR rapid* OR prototyp* OR tool* OR direct OR jet* OR 3D* OR print*) AND (stereolithograph? OR SLA OR polyjet* OR polymerjet* OR (multi jet modeling) OR (digital light processing) OR DLP OR (continuous liquid interface production) OR (beam interference solidification)) (AND (construction OR rule OR guideline OR recommendation OR (product development) OR (cooling channel) OR ejection OR silicone OR (digital ABS) OR multi-material))

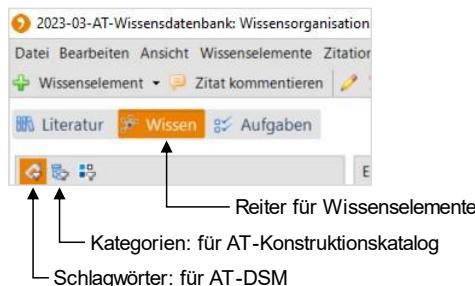


Abbildung F2.2: Generelle Projektstruktur und Einordnung der Wissenselemente in Citeavi

<sup>2</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

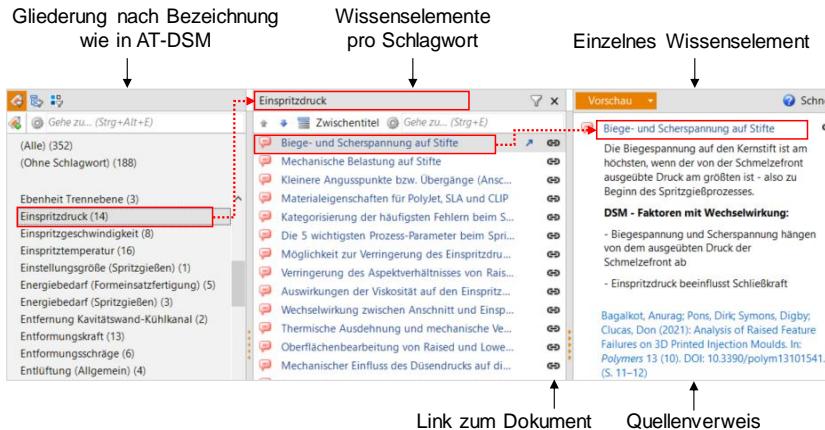


Abbildung F2.3: Elemente und Zusammenhänge des IPEK-X-in-the-Loop-(XiL)

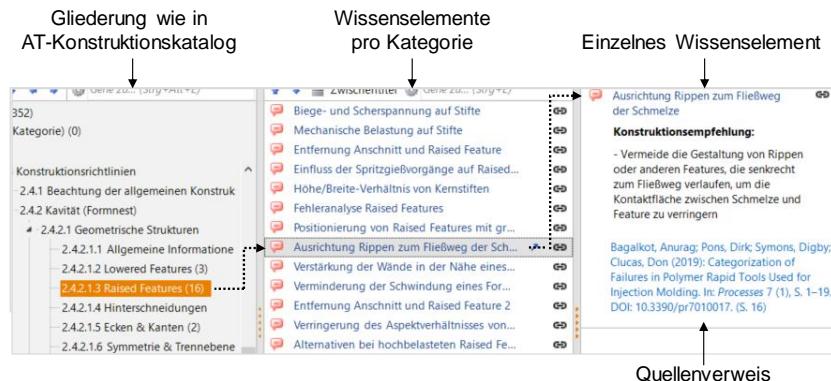


Abbildung F2.4: Auszug aus der Citavi „AT-Wissensdatenbank“ mit Darstellung eines Wissenselementes.

### F3 – AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM)

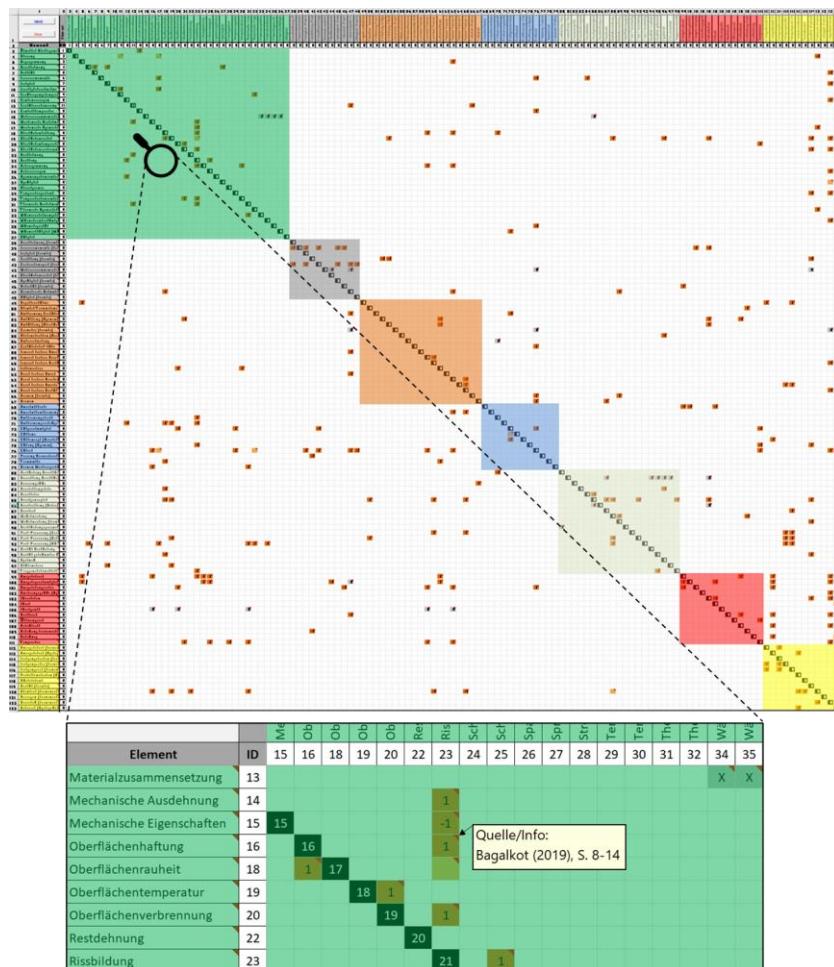


Abbildung F3.1: Gesamtübersicht zum aktuellen Stand der AT-DSM und Auszug einzelner Elemente mit Darstellung der Beziehung und Quellenangabe

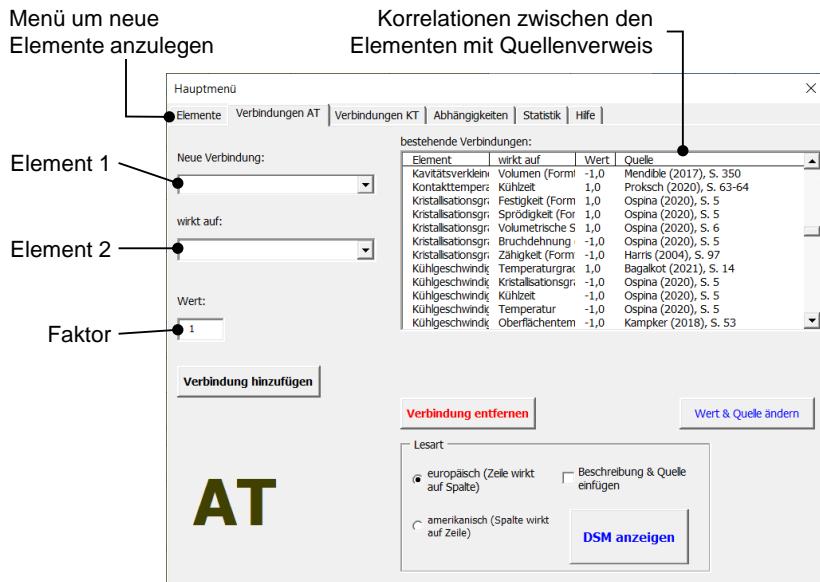


Abbildung F3.2: Untermenü des Excel-Tools zur Erstellung und Verwaltung von Elementen und deren Korrelationen

Menü um Abhängigkeiten zu analysieren

Element:  
Biegespannung

hängt ab von: Wert:      wirkt auf: Wert:

Aspektverhältnis	1	Raised Feature Belastung	1
Einspritzdruck	1		
Einspritzgeschwindigkeit	1		

Einflüsse anzeigen

Pfad darstellen

Start der Pfadanalyse

Auswahl	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5
<b>Schließkraft</b>	Verschleiß (Formeinsatz)	Standzeit (Formeinsatz)	Restdehnung	Kavitätverkleinerung	Volumetrisch
	Energiebedarf (Spritzgießender Produktionskosten)	(Spritzgießende Produktionskosten)	Mechanische Ausdehnung	Rissbildung	Volumen (F <sub>v</sub> )
			Oberflächenrauheit	Entlüftung (Oberflächen)	Scherversatz
			Thermische Ausdehnung	Oberflächenhaftung	Kantenversatz
			Rustabstand	Spaltmaß	Lufteinstrahlung
			Maßabweichung	Qualität (Formteil)	Entformung
			Raised Feature Qualität	Füllverhalten	Raised Feature
			Lowered Feature Qualität	Maßabweichung (Formteil)	Lowered Feature
				Schließung Formeinsatzhälfte Füllzeit	Gratbildung

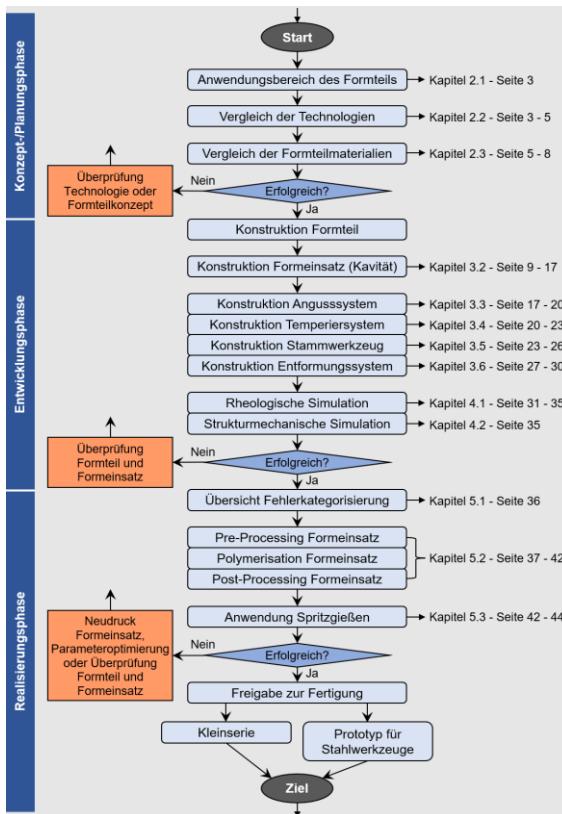
Abbildung F3.3: Untermenü des Excel-Tools zur Erstellung einer Pfadanalyse, um die Ausbreitung von Korrelationen zu analysieren

## F4 – AT-Konstruktionskatalog

Anhang F4 enthält den *AT-Konstruktionskatalog*, welcher im Rahmen der unveröffentlichten Abschlussarbeit von Schmieder (2022) entstand, die vom Verfasser dieser Arbeit co-betreut wurde.

### Übersicht Konstruktionsleitfaden

Der Konstruktionsleitfaden dient als Werkzeug für den gesamten Produktentwicklungsprozess. Dies beinhaltet Planung, Konzeption, Entwicklung und Realisierung. Folgendes Ablaufdiagramm stellt das strukturierte Vorgehen der Konstruktion (Konstruktionsprozess) eines Polymer-Spritzgießwerkzeugs dar, welches von den Konstrukteuren durchlaufen werden sollte und die Gliederung dieses Konstruktionsleitfadens widerspiegelt. Der Fokus liegt jedoch auf der Entwicklung und Realisierung des Formeinsatzes, weshalb beispielsweise die Konstruktion des Formteils nicht betrachtet wird.



## III. Übersicht Konstruktionsleitfaden

## III

In den Unterkapiteln des Leitfadens werden alle Aspekte erläutert, die für eine Konstruktion erforderlich sind. Zusätzliche Kapitel, die im Inhaltsverzeichnis gelistet werden, dienen der Eingrenzung und dem besseren Verständnis dieses komplexen Themas. Im Folgenden werden die wichtigsten **Konstruktionstipps**, die in diesem Leitfaden erläutert werden, aufgelistet. Die Reihenfolge der Tipps entspricht dem beschriebenen Konstruktionsprozess.

- **Anwendungsbereich:** Additive Tooling eignet sich für den Prototypenbau und für die Kleinserienfertigung von Formeinsätzen (wenige hundert Formteile) mit den Polymerisationsverfahren Stereolithographie (SLA), PolyJet und Digital Light Processing (DLP)
- **Formteilmaterial:** Es ist Spritzgießen von Thermoplasten bis Einspritztemperaturen von ca. 350 °C und Spritzgießzyklen von 50 bis 1000 Formteilen möglich
- **Auswerferstifte:** Löcher für Auswerferstifte immer konventionell nachbohren
- **Aspektverhältnis:** Das Verhältnis von Raised Features sollte  $\leq 3:1$  sein, da diese in der Kavität grundsätzlich zuerst versagen
- **Rippen:** Nicht dünner als 1,6 mm auslegen
- **Kanten und Ecken:** Mit großzügigen Radien abrunden
- **Trennebene:** Sicherung der Formeinsatzhälften gegen horizontale Verschiebung bei keilförmiger Trennebene, z. B. durch Trapezstrukturen oder Zentrierstifte außerhalb der Kavität
- **Entlüftung:** Zusätzliche Entlüftungen über Oberflächen, Auswerferstifte oder Entlüftungslöcher sind notwendig
- **Formeinsatzmaterialien:** Die besten Ergebnisse erzielen die Materialien Accura Bluestone, PerForm, Digital ABS und Tough
- **Angussbuchse:** Direkter Kontakt zwischen der heißen Zylinderdüse und dem Formeinsatzmaterial mithilfe einer konventionellen Angussbuchse vermeiden
- **Anschnitttechnik:** Während Stangen-, Film-, Band-, Ring- und Schirmanschnitt empfohlen werden, sind Punkt- und Tunnelanschnitte zu vermeiden
- **Kühlzeit:** Um Temperaturschwankungen bzw. thermische Belastungen im Formeinsatz zu reduzieren, sollte ein Formteil so früh wie möglich entformt werden (Kühlkanäle werden nur bedingt empfohlen)
- **Temperierkonzept Druckluft:** Die effektivste Kühlung nach jedem Spritzgießzyklus wird durch das Bestrahlen der Formeinsatzhälften mit Druckluft erreicht (eine Formeinsatztemperatur von 35 °C sollte angestrebt werden)
- **Werkzeugrahmen:** Die Verwendung eines Werkzeugrahmens aus konventionellen Materialien zur Aufnahme der größten mechanischen Belastungen während des Spritzgießens wird empfohlen (integrierter Formeinsatz, 0,2 mm dicker und 0,5 mm breiter bzw. länger konstruieren)
- **Wandstärke:** Abstand zwischen Kavitätswand und Formeinsatzwand mit ca. 20 – 25 mm auslegen
- **Entformungsschrägen:** Zur einfacheren Entformung werden 5° empfohlen (zusätzliche Anwendung von Trennmittel nach jedem Spritzgießzyklus auf der Kavitätsoberfläche)
- **Druckmodus:** Formeinsätze in dem Druckmodus „glossy“ drucken
- **Schichtdicke:** Für das beste Druckergebnis die minimale Schichtdicke einstellen, wodurch auch der Treppenstufeneffekt minimiert wird
- **Stützmaterial:** Direkter Kontakt zwischen Stützmaterial und der Kavitätsoberfläche vermeiden

- **Ausrichtung Druckkörper:** Der primäre Schmelzefluss in der Kavität und die Drucklinien des Druckkörpers sollten in die gleiche Richtung zeigen (entsprechende Ausrichtung auf der Bauplatzform notwendig)
- **Mechanisches Post-Processing:** Die Kavitätsoberflächen bei schlechter Oberflächenbeschaffenheit mechanisch nachbearbeiten, z. B. durch Schleifen oder Polieren
- **Parameterbestimmung Spritzgießen:** Die konventionelle Methode zur Parameterbestimmung (Festlegung der höchsten Druckeinstellungen der Spritzgießmaschine mit anschließender Optimierung bzw. schrittweiser Minimierung der Parameter) ist aufgrund der hohen Belastungen zu vermeiden. Die additive Methode sieht geringe Eingangsgrößen mit anschließender Optimierung bzw. schrittweiser Erhöhung der Parameter vor

Die beschriebenen Konstruktionstipps sind im Leitfaden mit einem  markiert

Folgende Liste enthält die relevantesten **Quellen** (TOP 10), die einen schnellen und umfangreichen Einblick ermöglichen und das Thema ganzheitlich beschreiben:

- *Analysis of Raised Feature Failures on 3D Printed Injection Moulds* (2021) [1]
- *Entwicklung und 3D-Druck von Multi-Material-Formeinsätzen für den Spritzguss* (2021) [2]
- *Injection Molding using Rapid Tooling* (2021) [3]
- *Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds* (2020) [4]
- *Feasibility and Process capability of polymer additive injection molds with slide technology* (2020) [5]
- *A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts* (2019) [6]
- *Categorization of Failures in Polymer Tools Used for Injection Molding* (2019) [7]
- *Injection Molding Applications* (2018) [8]
- *Material and Parameter Analysis of the PolyJet Process for Mold Making Using Design of Experiments* (2017) [9]
- *PolyJet For Injection Molding* (2016) [10]

**Inhaltsverzeichnis**

Nomenklatur .....	VII
1. Eingrenzung des Leitfadens.....	1
1.1 Additive Tooling bei Spritzgießwerkzeugen .....	1
1.2 Schwerpunkt Polymerisationsverfahren.....	1
2. Konzept-/Planungsphase .....	3
2.1 Anwendungsbereich des Formteils .....	3
2.2 Technologievergleich .....	3
2.2.1 Performancetabelle SLA, PolyJet und DLP .....	3
2.2.2 Beschaffungszeit-, Kosten- und Ressourcenvergleich .....	5
2.3 Formteilmaterial.....	5
2.3.1 Thermomechanische Eigenschaften.....	5
2.3.2 Verfügbare Thermoplaste .....	6
3. Konstruktionsrichtlinien .....	9
3.1 Beachtung der allgemeinen Konstruktionsrichtlinien .....	9
3.2 Formeinsatz (Kavität).....	9
3.2.1 Geometrische Strukturen.....	9
3.2.2 Formeinsatzmaterial .....	14
3.2.3 Multi-Materialien .....	16
3.3 Angussystem (Schmelzeführung) .....	17
3.3.1 Angussbuchse und Angusskegel .....	17
3.3.2 Angusskanal und Angussverteiler.....	18
3.3.3 Anschnittstechnik .....	19
3.4 Temperiersystem .....	20
3.4.1 Kühlzeit.....	20
3.4.2 Temperierkonzept Kühlkanal.....	21
3.4.3 Temperierverteilungssysteme .....	22
3.4.4 Alternatives Temperierkonzept Druckluft.....	22
3.5 Modulares Werkzeugkonzept (Stammwerkzeug).....	23

VI. Inhaltsverzeichnis	VI
3.6 Entformungssystem .....	27
3.6.1 Auswerferstifte.....	27
3.6.2 Entformungskraft .....	28
3.6.3 Formteile mit Hinterschneidungen .....	29
3.6.4 Formteile mit Gewinden .....	29
4. Spritzgießsimulation .....	31
4.1 Rheologische Simulation .....	31
4.1.1 Analysierte Schwerpunkte in Polymer-Formeinsätzen .....	31
4.1.2 Alternative Untersuchungsmethoden .....	34
4.2 Strukturmechanische Simulation.....	35
5. Bestimmung der Prozessparameter .....	36
5.1 Fehlerkategorisierung .....	36
5.2 Polymerisationsverfahren .....	37
5.3 Spritzgießen .....	42
6. Literaturverzeichnis .....	45
7. Verzeichnisse .....	50
7.1 Abbildungsverzeichnis .....	50
7.2 Tabellenverzeichnis .....	52

## Nomenklatur

### Abkürzungen

DLP	Digital Light Processing
MUD-Box	Master Unit Die
SLA	Stereolithographie
WIP	Work in Progress

### Begriffe und Definitionen

**Additive Tooling:** Bezeichnet ein Anwendungsbereich der additiven Fertigung, welcher im Bereich Spritzgießen vorzugsweise für die Prototypenfertigung oder die Kleinserienfertigung von Formeinsätzen eingesetzt wird.

**Aspektverhältnis:** Verhältnis der Tiefe bzw. der Höhe einer geometrischen Struktur zu ihrer kleinsten lateralen Ausdehnung (Breite). Bezieht sich überwiegend auf Raised Features.

**Digital Light Processing:** Additives Fertigungsverfahren, welches auf dem physikalischen Prinzip der Polymerisation basiert und für die Fertigung von Spritzgießformeinsätzen geeignet ist.

**Formeinsatz:** Ist für die Ausformung der Kunststoffbauteile in einem Spritzgießwerkzeug verantwortlich und wird beim Additive Tooling als einzige Baugruppe des Werkzeuges additiv hergestellt.

**Formteil:** Bezeichnet die zu fertigenden Kunststoffbauteile auf einer Spritzgießmaschine.

**Gas-Wasserinjektionsverfahren:** Wird auch als Innendruck-Spritzgießen bezeichnet und ist ein spezialisiertes Spritzgießverfahren zur Fertigung hohler Kunststoffbauteile.

**Lowered Feature:** Geometrische Strukturen in Form von Vertiefungen, z. B. Einkerbungen, Langlöcher oder Bohrungen, in der Kavität eines Spritzgießwerkzeuges.

**MUD-Box:** Ist ein Schnellwechselsystem für Spritzgießformeinsätze in einem modularen Werkzeugkonzept und wird allgemein auch als Werkzeugrahmen bezeichnet.

**Multi-Material:** Bezeichnet die parallele Verarbeitung zweier Polymere beim PolyJet-Drucken eines Spritzgießformeinsatzes.

**PolyJet:** Additives Fertigungsverfahren, welches auf dem physikalischen Prinzip der Polymerisation basiert und für die Fertigung von Spritzgießformeinsätzen geeignet ist.

**Post-Processing:** Nachbearbeitung und Aufbereitung der additiv gefertigten Druckkörper.

**Raised Feature:** Geometrische Strukturen in Form von Erhöhungen, z. B. Stifte, Rippen oder Wände, in der Kavität eines Spritzgießwerkzeuges.

**Stereolithographie:** Additives Fertigungsverfahren, welches auf dem physikalischen Prinzip der Polymerisation basiert und für die Fertigung von Spritzgießformeinsätzen geeignet ist.

**Treppenstufeneffekt:** Bezeichnet die sichtbaren Schichten eines additiv gefertigten Druckkörpers, die vor allem an gekrümmten oder schrägen Oberflächen auftreten.

## 1. Eingrenzung des Leitfadens

### 1.1 Additive Tooling bei Spritzgießwerkzeugen

Additive Fertigungsverfahren werden in die vier Anwendungsbereiche Rapid Prototyping, Additive Tooling, Rapid Manufacturing und Rapid Repair eingeteilt. [11] Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing eignen sich nicht für den Einsatz beim Spritzgießen, da die Fertigungszeit für die Herstellung von Formteilen in der benötigten Größenordnung zu lange dauert und die dadurch entstehenden Fertigungskosten zu teuer sind. Der Anwendungsbereich Rapid Repair ist für einen effizienten Einsatz im Spritzgießen zu unausgereift. Da die Fertigung von Spritzgießwerkzeugen extrem aufwendig ist, kann Additive Tooling in diesem Bereich sinnvoll eingesetzt werden, indem die Herstellung der Werkzeuge in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses unterstützt wird. [12, 13] Überwiegend wird beim Additive Tooling im Bereich Spritzgießen Direct Tooling (inkl. Prototype Tooling) eingesetzt. Beim Direct Tooling erfolgt eine reine additive Herstellung der benötigten Werkzeuge als Endprodukte (vorzugsweise aus Metall) oder als Prototypen bei der Unterkategorie Prototype Tooling (vorzugsweise aus Kunststoff). Der entscheidende Unterschied beim Prototype Tooling im Vergleich zum Rapid Prototyping ist die Fertigung von Funktionsprototypen (Werkzeugen) in Endproduktequalität und das anschließende Spritzgießen einer bestimmten Anzahl von Formteilen in Endproduktequalität und Endproduktmaterial. Zu beachten ist, dass das konventionelle modulare Werkzeugkonzept auch beim Additive Tooling eingesetzt wird, wodurch ausschließlich der Formeinsatz (Polymer-Formeinsatz) additiv gefertigt werden. [11, 14]

### 1.2 Schwerpunkt Polymerisationsverfahren

Der grundlegende Prozessablauf ist bei allen additiven Fertigungsverfahren gleich und der physische Aspekt basiert auf dem Schichtbauverfahren. Der wesentlichen Unterschiede bestehen in der Erzeugung bzw. Verbindung dieser Schichten und den verwendeten Materialien. Aktuell sind zusammengefasst fünf unterschiedliche Schichtbauverfahren auf dem Markt verfügbar. Die generischen Bezeichnungen lauten Polymerisation, Lasersintern/Laserschmelzen, Layer Laminated Manufacturing, 3D-Drucken und Fused Layer Manufacturing. [15] Im Bereich Spritzgießen bietet die Anwendung Prototype Tooling das größte Potential additive Fertigungsverfahren in den Produktentstehungsprozess zu integrieren. Polymerisationsverfahren haben aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften die besten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung. [14] Vorteile dieses Verfahrens sind Reduzierung der Fertigungszeit und der Fertigungskosten, Funktionsbewertung der Formteile in Endproduktequalität und Endproduktmaterial, automatisierte Formeinsatzfertigung, frühzeitige Validierung des Designs bzw. des Materials und Designfreiheit, die mit konventionellen Verfahren nicht erreicht werden. [3, 10] Aus diesem Grund beschäftigt sich dieser Konstruktionsleitfaden ausschließlich mit den Besonderheiten der Polymerisationsverfahren beim Prototype Tooling von Spritzgießformeinsätzen. Im weiteren Verlauf wird der Begriff Additive Tooling als Synonym für diese Definition verwendet.

Abbildung 1.1 stellt die additiven Fertigungsverfahren, die nach dem Prinzip der Polymerisation arbeiten und theoretisch für das Additive Tooling eingesetzt werden können, grün dar.

1. Eingrenzung des Leitfadens

2

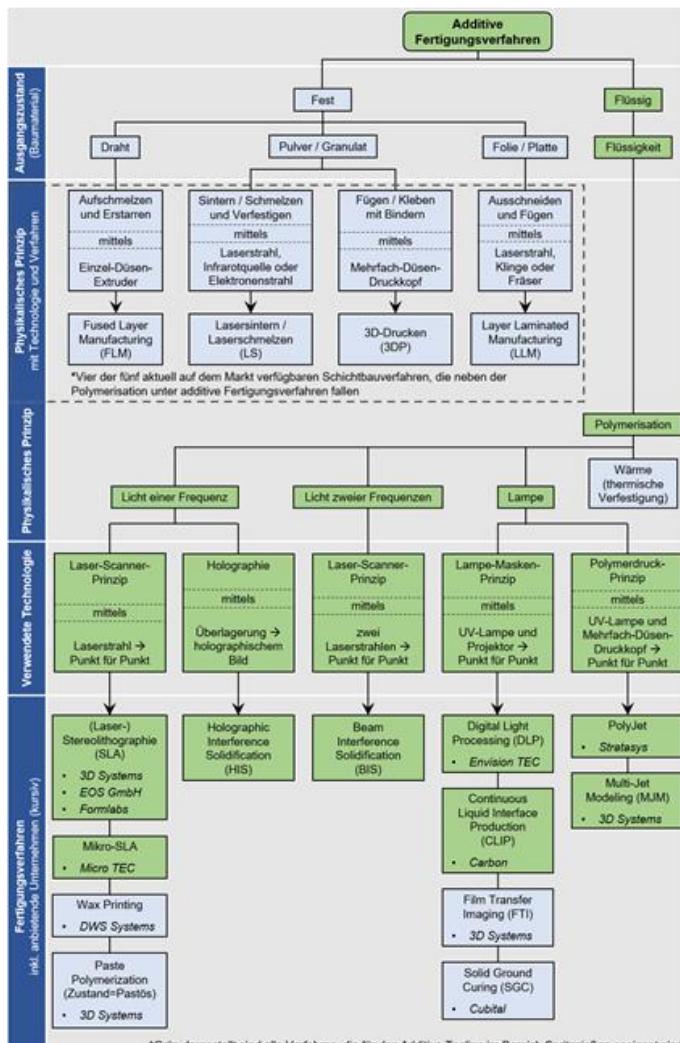


Abbildung 1.1: Gliederung der additiven Fertigungsverfahren mit Fokus auf der Polymerisation. Grün markiert sind alle Polymerisationsverfahren, die für das Additive Tooling eingesetzt werden können  
Quelle: In Anlehnung an [14, 16–18]

## 2. Konzept-/Planungsphase

### 2.1 Anwendungsbereich des Formteils

Grundsätzlich wird Additive Tooling im Prototypenbau oder bei einer geringen Anzahl von Formteilen (wenige Hundert) eingesetzt. Formteile haben jedoch einen vielfältigen Anwendungsbereich, wodurch ihre Eigenschaften sehr unterschiedlich sein können und dementsprechend sind nicht alle Formteile für das Additive Tooling geeignet. [19] Um zu prüfen, ob ein Formeinsatz eines Formteils für das Additive Tooling geeignet ist, müssen viele verschiedene Faktoren betrachtet werden. Dazu zählen unter anderem das Formteilmaterial (siehe Kapitel 2.3 Seite 5), die Gestaltung (siehe Kapitel 3 Seite 9), Größe und Gewicht (siehe Kapitel 2.2) des Formteils bzw. des Formeinsatzes oder die Formteilgenauigkeit (siehe Kapitel 5.2 Seite 37). Dieser Leitfaden unterstützt die Überprüfung.

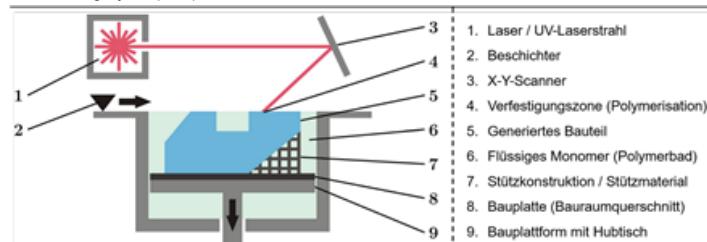
Besonders vorteilhaft ist Additive Tooling, wenn die Formteilgestaltung noch nicht komplett ist und praktische Iterationen zur Vervollständigung benötigt werden oder wenn die Verifizierung der endgültigen Formteilgestaltung Prototypen bzw. Muster im Ziellmaterial und der Zielfertigungstechnologie erfordern. [3]

### 2.2 Technologievergleich

#### 2.2.1 Performancetabelle SLA, PolyJet und DLP

SLA, PolyJet und DLP (siehe Abbildung 1.1) werden für das Additive Tooling am Häufigsten eingesetzt. Abbildung 2.1, 2.2 und 2.3 stellen die drei Verfahren inkl. Performance-Tabelle mit den wichtigsten Kennzahlen übersichtlich dar. Zusätzlich werden Formeinsatzmaterialien genannt, die in bisherigen Versuchen sehr gute Ergebnisse erzielt haben.

#### Stereolithographie (SLA):



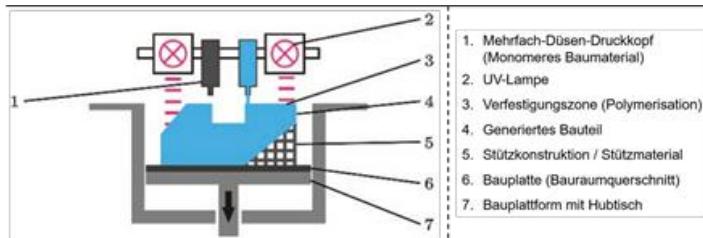
**Erklärung:** Auf der Bauplatte wird mithilfe des UV-Laserstrahls das flüssige Monomer durch Polymerisation in einen festen Zustand versetzt, indem der Laser Schicht für Schicht des jeweiligen Bauteils aushärtet. Nachdem eine Schicht beendet ist, senkt sich die Bauplattform um exakt eine Schichtdicke ab. Durch dieses Verfahren lassen sich sehr gute Oberflächen und Bauteilstrukturen mit hohem Detaillierungsgrad realisieren.

##### Performance-Tabelle:

Min. Schichtdicke:	25 µm
Min. planare XY-Auflösung:	25 µm
Max. Bauraumgröße (B x T x H):	1500 mm x 750 mm x 550 mm
Max. Genauigkeit (Maßabweichung):	25 µm – 50 µm pro 25 mm Bauteilabmessungen (abhängig von Geometrie, Druckparametern, Bauteilausrichtung und Post-Processing)
Bekannteste Unternehmen:	3D Systems, Formlabs und EOS
Materialien mit guten Ergebnissen:	Accura Bluestone, VisiJet SL HiTemp (beide 3D Systems), High Temperature, Rigid 10K, Standard, Tough (alle Formlabs), Somos GP Plus, Somos PerForm (beide Covestro), SPR6000 (Shaanxi Hengtong Intelligent Machine)

Abbildung 2.1: Übersicht SLA

Quelle: In Anlehnung an [3, 5, 9, 19–29]

**PolyJet:**

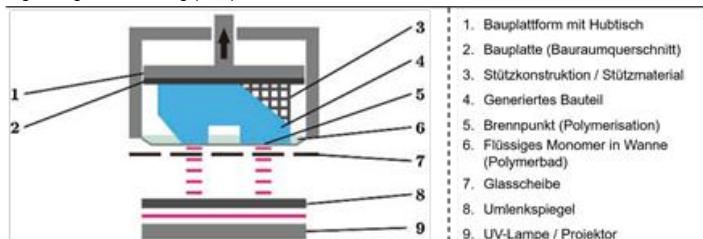
**Erklärung:** Das monomere Baumaterial wird Schicht für Schicht über einen Mehrfach-Düsen-Druckkopf, in Form von winzigen Tröpfchen, direkt auf die Bauplatte gedrückt und gleichzeitig durch die Bestrahlung von zwei sich synchron zum Druckkopf bewegenden UV-Lampen aushärtet. Nachdem eine Schicht beendet ist, senkt sich die Bauplatzform um exakt eine Schichtdicke ab. Dieses Verfahren erzeugt die geringsten Schichtdicken aller additiven Fertigungsverfahren, wodurch sehr glatte Oberflächen realisiert werden können.

**Performance-Tabelle:**

Min. Schichtdicke:	16 µm
Min. planare XY-Auflösung:	50 µm
Max. Bauraumgröße (B x T x H):	1000 mm x 800 mm x 500 mm
Max. Genauigkeit (Maßabweichung):	< 100 mm ± 100 µm / > 100 mm ± 200 µm oder 0,06 % bezogen auf Bauteilabmessungen (je nachdem welcher Wert größer ist) (abhängig von Geometrie, Druckparametern, Bauteillausrichtung und Post-Processing)
Bekannteste Unternehmen:	Stratasys und 3D Systems (Vermarktung als MultiJet-Modelling)
Materialien mit guten Ergebnissen:	RGD 450 (auch Rigid), RGD 515 + RGD 535 (auch Digital ABS Plus), RGD 525 (auch High Temperature), RGD 720 (auch FullCure), RGD 810 (auch VeroClear), RGD 5160-DM, RGD 5161-DM (alle Stratasys)

**Abbildung 2.2: Übersicht PolyJet**

Quelle: In Anlehnung an [3, 5, 9, 19–29]

**Digital Light Processing (DLP):**

**Erklärung:** Die aktuelle Kontur der nächsten Schicht wird von unten durch den Projektor auf den Glasboden der Wanne projiziert und verfestigt sich auf der Bauplatte (um 180° gedreht). Der Abstand zwischen der letzten aufgebrachten Bauteilschicht und des Glasbodens der Wanne beträgt eine Schichtdicke. Nach der Verfestigung fährt die Bauplatzform um exakt eine Schichtdicke nach oben.

**Performance-Tabelle:**

Min. Schichtdicke:	25 µm
Min. planare XY-Auflösung:	25 µm
Max. Bauraumgröße (B x T x H):	450 mm x 371 mm x 399 mm
Max. Genauigkeit (Maßabweichung):	keine Angaben
Bekannteste Unternehmen:	Envision TEC
Materialien mit guten Ergebnissen:	HTM 140 V2 (Envision TEC), Somos Perform (Covestro)

**Abbildung 2.3: Übersicht DLP**

Quelle: In Anlehnung an [3, 5, 9, 19–29]

### 2.2.2 Beschaffungszeit-, Kosten- und Ressourcenvergleich

Durchschnittlich benötigt die Beschaffung eines Formeinsatzes aus Stahl 7 bis 8 Wochen und aus Aluminium 3 bis 4 Wochen. [9, 30] Die Beschaffungszeit eines Polymer-Formeinsatzes liegt hingegen durchschnittlich zwischen 7 und 10 Tagen, wobei die reine Druckzeit zwischen 6 und 24 Stunden liegt und auch über Nacht erfolgen kann. Polymer-Formeinsätze die extern gefertigt werden, haben das Potenzial günstiger zu sein (bezogen auf den Kaufpreis), sind es jedoch aktuell in der Praxis nicht unbedingt. Verschiedene Faktoren, z. B. Maschinenverfügbarkeit oder Größenvorteile eines Unternehmens, spielen eine entscheidende Rolle, weshalb keine konkreten Aussagen getroffen werden können. [31]

Die reinen Herstellkosten von Polymer-Formeinsätzen haben das Potenzial um bis zu 85 % billiger zu sein als konventionelle Formeinsätze. [32] Diese sind abhängig von Druckzeit, Material bzw. Materialverbrauch, Formteilgeometrie, spezifischen Anforderungen und Post-Processing. Folgende Aspekte sollten beachtet werden, um möglichst geringe Herstellkosten zu generieren:

- Um Druckzeit zu sparen sollten Formeinsatzhälften gemeinsam und vorzugsweise in einer Linie auf der Bauplatzform gedruckt werden (Zeiteinsparung bis zu 40 %)
- Je genauer der ausgewählte Druckmodus, desto länger wird die Druckzeit
- Der Materialverbrauch ist bei den unterschiedlichen Druckmodi nahezu identisch
- Der Maschinenstundensatz ist der entscheidende Faktor bei der Höhe der Herstellkosten und ist im Wesentlichen abhängig von der verwendeten additiven Fertigungsanlage
- Je kürzer die Druckzeit, desto höher ist der Materialkostenanteil
- Mit steigendem Formeinsatzvolumen steigen die Herstellkosten (mit einer Vorhersagegenauigkeit von 95 %) [33]

Bevor ein Unternehmen sich dazu entscheidet Polymer-Formeinsätze selber herzustellen, müssen die eigenen Ressourcen auf die nötige Kompetenz und Qualität untersucht werden. Dazu zählen unter anderem geschulte Mitarbeiter, z. B. Konstrukteure, Mitarbeiter an additiven Fertigungsanlagen und Spritzgießmaschinenbediener, passende additive Fertigungsanlagen mit entsprechender Slicer-Software, Möglichkeiten zum Post-Processing und geeignete Spritzgießmaschinen. [34]

**Tipp:** Für Additive Tooling ist keine NC- oder CNC-Programmierung notwendig. Das CAD-Modell wird automatisch in der Slicer-Software in das Dateiformat umgewandelt.

Quelle: [19]

## 2.3 Formteilmaterial

### 2.3.1 Thermomechanische Eigenschaften

Die thermomechanischen Eigenschaften, die während des Spritzgießens in einem Polymer-Formeinsatz auf das Formteilmaterial wirken, können in den meisten Fällen nicht mit den thermomechanischen Eigenschaften in konventionellen Formeinsätzen verglichen werden. Dementsprechend sind Kenntnisse über spezielle Konstruktionsrichtlinien unabdingbar. In Tabelle 2-1 werden die wichtigsten Konstruktionsrichtlinien beschrieben, welche die Eigenschaften des Formteilmaterials steuern können. Gegliedert werden die Richtlinien nach drei essentiell wichtigen Fragen, welche die allgemeinen Eigenschaften, die Belastungen und die Schwindung des Formteilmaterials während des Spritzgießens betreffen.

Tabelle 2-1: Zuordnung der wichtigsten Konstruktionsrichtlinien zur Steuerung der thermomechanischen Eigenschaften des Formteilmaterials

Fragen	Konstruktionsrichtlinien
Wie lassen sich die thermomechanischen Eigenschaften des Formteilmaterials beeinflussen?	<p>Wird ein Formteil aus teilkristallinem Thermoplast nach dem Spritzgießen auf Zug beansprucht, sollte eine langsame Kühlgeschwindigkeit und lange Kühlzeit gewählt werden, da dadurch eine höhere Festigkeit erreicht werden kann. [22]</p> <p>Die Eigenschaften des Formteils in einem Polymer-Formeinsatz lassen sich durch Befüllung, z. B. Faserverstärkung, gleichermaßen verändern, wie in konventionellen Formeinsätzen, weshalb die bisherigen konstruktiven Vorgaben beibehalten werden können. [8, 23]</p> <p>Eigenschaften lassen sich über den Kristallisationsgrad des teilkristallinen Thermoplastes steuern. Die Steuerung kann über die Kühlgeschwindigkeit, die Kühlzeit oder den Befüllungsanteil erfolgen. [8]</p> <p>Bei der Wahl des Formteilmaterials sollte dessen Schmelztemperatur (teilkristalline Thermoplaste) bzw. Glasübergangstemperatur (amorphe Thermoplaste) berücksichtigt werden, da dieser Einfluss auf den weiteren Prozessverlauf hat (Formeinsatzmaterials, Einspritztemperatur etc.). [34]</p>
Wie belastet das Formteilmaterial den Formeinsatz?	<p>Aufgrund der höheren Belastungen auf den Formeinsatz sind befüllte Formteilmaterialien aktuell nicht für die Kleinserien zu empfehlen. [8]</p> <p>Wenn nach dem Spritzgießen Fließspuren am Formteil auftreten kann die Einspritzgeschwindigkeit oder die Formeinsatztemperatur erhöht werden (nur wenn der Formeinsatz die höheren Belastungen aushält). [37]</p> <p>Wenn die Anforderungen an das Formteil erfüllt werden, sollte der Thermoplaste mit der geringsten Viskosität bei gleicher Einspritztemperatur ausgewählt werden, um die Standzeit des Formeinsatzes zu verlängern. [4]</p>
Welche Einflussfaktoren beeinflussen die Schwindung des Formteilmaterials?	<p>Um die Schwindung des Formteils im Formeinsatz während des Abkühlprozesses möglichst gering zu halten, sollten amorphe Thermoplaste gespritzt werden. [35, 36, 37]</p> <p>Um die Schwindung des Formteils in der Kavität während des Abkühlprozesses möglichst gering zu halten, sollte die Kühlzeit so gering wie möglich eingestellt oder eine hohe Kühlgeschwindigkeit gewählt werden (dies kann durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Formeinsatzmaterials erreicht werden). Darüber hinaus beeinflussen die Faktoren Formeinsatztemperatur, Nachdruck und Einspritzgeschwindigkeit die Schwindung. [22]</p> <p>Kenntnisse über verschiedene Volumenkörper können dabei helfen, die Schwindung des Formteils bereits in dessen Konstruktion zu integrieren. Die höchste prozentuale volumetrische Schwindung haben massive Volumenkörper ohne Hohlraum, z. B. Zylinder, Pyramide oder Prisma. Bei Volumenkörpern mit Hohlraum ist die Größe des Hohlraums im Verhältnis zum Gesamtvolume entscheidend. Dementsprechend haben dünnwandige Volumenkörper mit Hohlraum die geringste volumetrische Schwindung. [8, 22]</p>

### 2.3.2 Verfügbare Thermoplaste

Grundsätzlich lassen sich fast alle amorphen und teilkristallinen Thermoplaste in Polymer-Formeinsätzen spritzen. Zwei der wichtigsten Faktoren für die Standzeit sind die Einspritztemperatur der Schmelze und Wärmeformbeständigkeit des Formeinsatzmaterials. Je höher die Einspritztemperatur ist, desto höher muss die Wärmeformbeständigkeit sein. Die

Einspritztemperatur ist wiederum abhängig von der Wärmeformbeständigkeit des Formteilmaterials, die für die Einteilung der Thermoplaste in Hochtemperatur-, Technische- und Standard-Thermoplaste verantwortlich ist. [38]

**Tipp:** Bei einem Formteilmaterial darf nicht mehr die Angabe des Herstellers für die empfohlene Formeinsatztemperatur verwendet werden (diese sind in der Regel für konventionelle Spritzgießwerkzeuge ausgelegt), sondern muss die Wärmeformbeständigkeitstemperatur des Formeinsatzmaterials betrachtet werden.

Quelle: [6]

Tabelle 2-2 listet Formteilmaterialien, die in bisherigen Versuchen erfolgreich in Polymer-Formeinsätzen zu fertigen Formteilen gespritzt wurden.

Tabelle 2-2: Zuteilung der Formteilmaterialien nach Art der Thermoplaste



Art der Thermoplaste	Formteilmaterialien	Übliche Einspritztemperaturen
<b>Standard-Thermoplaste</b> (Wärmeformbeständigkeit bis ca. 90 °C)	Elastischer Polyethylen (PE)	≤ 220 °C
	High Impact Polystyrol (HIPS)	
	Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	
	Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)	
	Polypropylen (PP)	
	Polystyrol (PS)	
<b>Technische Thermoplaste</b> (Wärmeformbeständigkeit bis ca. 140 °C)	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS)	≤ 300 °C
	Noryl bzw. SABIC + Glasfaseranteil 20 % (PPE-PS 20 GF)	
	Polyamid 6 (PA6)	
	PA6 + Glasfaseranteil 30 % (PA6 30 GF)	
	Polyamid 66 (PA66)	
	Polyamid 66 + Glasfaseranteil 30 % (PA66 30 GF)	
	Polycarbonat (PC)	
	Polycarbonat + Glasfaseranteil 10 % (PC 10 GF)	
	Polyoxymethylen (POM)	
<b>Hochtemperatur-Thermoplaste</b> (Wärmeformbeständigkeit mehr als 140 °C)	Lexan-943-A	> 300 °C
	Ultem-9085	
	Polyetheretherketon (PEEK)	
	Polyphenylensulfid + Glasfaseranteil 40 % (PPS 40 GF)	

Quelle: In Anlehnung an [8, 22, 28, 29, 39–42] [23, 29, 30, 32, 39, 40, 42] [6, 7, 25, 30]

Neben der Einspritztemperatur und Wärmeformbeständigkeit des Formeinsatzmaterials gibt es viele Faktoren, welche die Formeinsatzstandzeit beeinflussen, z. B. Formteilgeometrie, Einspritzdruck oder Kühlzeit. Daher kann nicht allgemein festgelegt werden, wie viele Spritzgießzyklen mit einem Formteilmaterial in einem Formeinsatz durchgeführt werden können. Wenn alle anderen Bedingungen konstant bleiben, verringert sich jedoch die Anzahl der Spritzgießzyklen mit steigender Einspritztemperatur. Unter optimalen Bedingungen können mit Standard-Thermoplasten mehrere Hundert Formteile und mit Hochtemperatur-Thermoplaste bis zu 50 Formteile gespritzt werden, bevor es zum Formeinsatzversagen kommt. [6, 7, 22, 23, 25, 28–30, 32, 39–42] Abbildung 2.4 stellt diesen Fall graphisch

dar und vergleicht die Spritzgießzyklen von Polymer-Formeinsätzen mit Aluminium- und Stahl-Formeinsätzen.

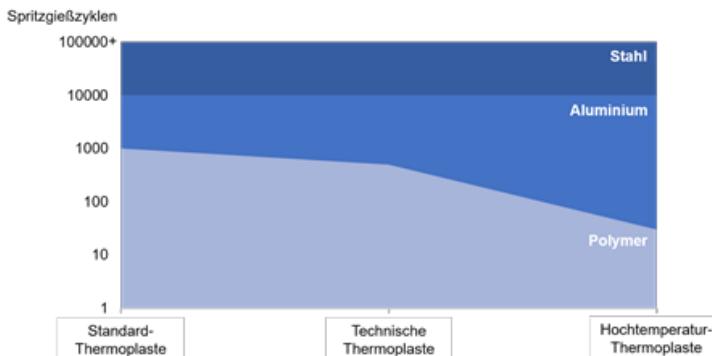


Abbildung 2.4: Vergleich der möglichen Spritzgießzyklen verschiedener Thermoplaste in Polymer-Formeinsätzen und Aluminium- bzw. Stahl-Formeinsätze in logarithmischer Darstellung

Quelle: In Anlehnung an [6, 7, 22, 23, 25, 28-30, 32, 39-42]

### 3. Konstruktionsrichtlinien

#### 3.1 Beachtung der allgemeinen Konstruktionsrichtlinien

Bei der Konstruktion eines additiv zu fertigenden Formeinsatzes bzw. eines auf Additive Tooling ausgelegten Spritzgießwerkzeugs, sollten die Konstruktionsregeln (im Sinne der Gestaltungsrichtlinien) für die additive Fertigung eingehalten werden. Außerdem können Konstrukteure sich an den allgemeinen Konstruktionsregeln für konventionelle Spritzgießwerkzeuge orientieren. Beispiele solcher Konstruktionsregeln finden sich in *Spritzgießwerkzeuge (2018)* [12], *Part and Mold Design (2007)* [43], *Entwicklungsmethodik für die additive Fertigung (2020)* [44] oder *Injection Mold Design Handbook (2021)* [45]. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der für das Additive Tooling geeigneten Polymere, sind einige Anpassungen erforderlich. [4, 19] Im folgenden Kapitel werden bisher erforschte Aspekte der Konstruktion von Polymer-Formeinsätzen, speziell die abgeleiteten Besonderheiten, beschrieben.

#### 3.2 Formeinsatz (Kavität)

##### 3.2.1 Geometrische Strukturen

Die folgenden Tabellen erläutern die wichtigsten Konstruktionsrichtlinien für die Kavität und beschreiben die daraus resultierenden positiven Effekte.

Tabelle 3-1: Konstruktionsrichtlinien für Lowered Features

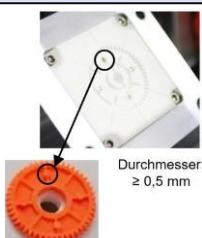
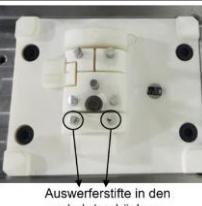
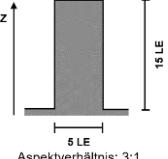
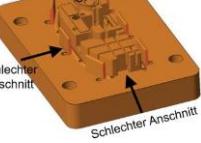
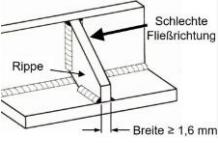
Konstruktionsrichtlinien für geometrische Strukturen des Formeinsatzes und der Kavität			
1. Lowered Features (Vertiefungen)	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
Bohrungen	Bohrungen, die durch die additive Fertigungsanlage direkt gefertigt werden, sollten einen Durchmesser $\geq 0,5$ mm besitzen. [4]		1. Die Bohrungen werden während der additiven Fertigung vollständig gedruckt und definiert, da die Druckgenauigkeit ausreicht
Bohrungen	Bohrungen mit einem Durchmesser $< 0,5$ mm sollten anschließend im Post-Processing gebohrt werden. Ausnahmen bilden Bohrungen für Auswerferstifte, die immer nachgebohrt werden sollten. [10, 19]		1. Kleinere Durchmesser werden durch die Bohrungen vollständig definiert 2. Perfekte Passung zwischen Bohrung und Auswerferstift aufgrund der geringeren Toleranzen und Oberflächenrauheit des Bohrs im Vergleich zur Druckgenauigkeit
	Bohrungen werden von der additiven Fertigungsanlage tendenziell kleiner gedruckt. Aus diesem Grund sollten die Bohrungen größer ausgelegt werden, als die ursprünglichen Maße aus dem CAD-Modell. [4]		1. Beibehaltung der ursprünglichen Maße trotz Drucktoleranzen (Maßabweichungen)

Tabelle 3-2: Konstruktionsrichtlinien für Raised Features

Allgemein	Versagen von Raised Features liegt nicht nur am Einspritzdruck, sondern ist auf die kombinierte Wirkung der Spannungen (Biege- und Scherspannungen) während der Einspritzphase, des thermischen Abbaus (Formeinsatz) und der Schrumpfung (Formteil) während der Abkühlphase sowie der Oberflächenhaftung während der Entformungsphase des Spritzgießens zurückzuführen. [1] Raised Features versagen in der Kavität grundsätzlich zuerst. [46]		
Konstruktionsrichtlinien		Darstellung	Positive Effekte
2. Raised Features (Erhöhungen)	Das Aspektverhältnis sollte $\leq 3:1$ (Höhe:Breite) sein. [10, 19, 48]	 <p>Aspektverhältnis: 3:1</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Stifte halten größeren mechanischen und thermischen Belastungen stand</li> <li>2. Längere Standzeit der Stifte aufgrund höherer Stabilität</li> </ol>
	Bei größeren Seitenverhältnissen, hochbelasteten oder dünnwandigen Strukturen, sollten austauschbare Stifte aus anderen Materialien verwendet werden (z. B. hochfestem Kunststoff oder Metall). Diese werden in die Kavität gepresst. Dafür müssen die Löcher minimal geöffnet werden, die anschließend für einen passgenauen Sitz ausgerieben werden. [3, 10, 19, 49]	 <p>Guter Anschluss Option für austauschbaren Stift Schlechter Anschluss Schlechter Anschluss</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Stifte halten größeren mechanischen und thermischen Belastungen stand</li> <li>2. Schneller Austausch bei Versagen der Stifte, wodurch der Formeinsatz nicht komplett neu gedrückt werden muss</li> </ol>
	Bei großem Aspektverhältnis sollten Stifte nicht im direkten Schmelzefluss des Anschlusses oder möglichst weit vom Anschluss entfernt liegen. [1, 46, 47]		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Längere Standzeit der Stifte aufgrund der geringeren mechanischen und thermischen Belastungen während des Spritzgießens</li> </ol>
	Stifte aus Elastomeren (siehe Kapitel 3.2.2 und 3.6.3) sollten ebenfalls nicht im direkten Schmelzefluss oder möglichst weit vom Anschluss entfernt liegen. [2]		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Längere Standzeit der Stifte aufgrund der geringeren mechanischen und thermischen Belastungen während des Spritzgießens</li> </ol>
Rippen	Rippen sollten nicht dünner als 1,6 mm konstruiert werden und grundsätzlich nicht senkrecht zur Fließrichtung verlaufen. [3, 7]	 <p>Rippe Schlechte Fließrichtung Breite ≥ 1,6 mm</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rippen halten größeren mechanischen und thermischen Belastungen stand</li> <li>2. Längere Standzeit der Rippen aufgrund höherer Stabilität und geringeren mechanischen und thermischen Belastungen während des Spritzgießens</li> </ol>
Wände	Raised Features, z. B. Wände, in der Nähe des Anschlusses bzw. im direkten Schmelzefluss sollten verstärkt werden. [7]		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Halten größeren mechanischen und thermischen Belastungen stand</li> <li>2. Längere Standzeit aufgrund höherer Stabilität</li> </ol>

**Tabelle 3-3: Konstruktionsrichtlinien für Hinterschneidungen**

3. Hinterschneidungen	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
Allgemein	Hinterschneidungen sollten grundsätzlich vermieden werden, da das Formeinsatzmaterial Zwangsentformungen in der Regel nicht standhält. Falls Hinterschneidungen unumgänglich sind, können spezielle Entformungssysteme konstruiert werden (siehe Kapitel 3.6.3 und 3.6.4). [2, 5]		1. Längere Standzeit des Formeinsatzes, aufgrund der geringeren mechanischen Belastungen während der Entformung

**Tabelle 3-4: Konstruktionsrichtlinien für Ecken und Kanten**

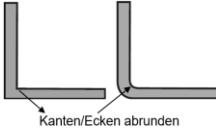
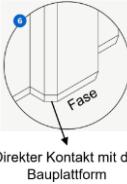
4. Ecken & Kanten	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
Allgemein	<p>Alle Kanten und Ecken sollten mit einem großzügigen Radius abgerundet werden. Der Radius ist durch die Schichtdicke und planare Auflösung der additiven Fertigungsanlage begrenzt. [10, 19]</p> 		1. Vermeidung von Spannungskonzentrationen aufgrund besserer Kraftverteilung 2. Ecken und Kanten halten größeren mechanischen und thermischen Belastungen stand 3. Längere Standzeit der Ecken und Kanten aufgrund höherer Stabilität
	<p>An den Kanten und Ecken am Formeinsatz, die im direkten Kontakt mit der Bauplattform stehen, sollten kleine Fasen angebracht werden. [4]</p>		1. Entfernung von der Bauplattform wird erleichtert

Tabelle 3-5: Konstruktionsrichtlinien für Symmetrie und Trennebene

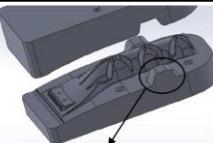
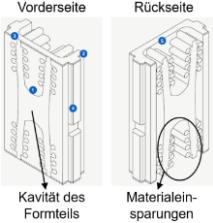
	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
5. Symmetrie & Trennebene	Formeinsatzhälften sollten gegen die horizontale Verschiebung (tritt vor allem bei keilförmiger Trennebene auf) während es Spritzgießens gesichert werden. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten, die im Folgenden anhand von konkreten Beispielen beschrieben werden:	 <p>Ungünstige Verläufe von Trennebenen ohne Sicherung gegen horizontale Verschiebung</p>	
	<b>1. Option:</b> Drücken von Strukturen außerhalb der Kavität, z. B. in Form von Kegeln oder Trapezen. [25, 51]	 <p>Trapezstruktur gegen horizontale Verschiebung</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Vermeidung der horizontalen Verschiebung während des Spritzgießens</li> <li>2. Höhere Maßgenauigkeit des gespritzten Formteils</li> <li>3. Formeinsätze halten größeren mechanischen und thermischen Belastungen stand</li> <li>4. Längere Standzeit der Formeinsätze aufgrund höherer Stabilität</li> <li>5. Geringere Bruchgefahr der Trennebenen durch geschwungene Kurven</li> </ol>
	<b>2. Option:</b> Externe Zentriertstifte oder Bolzenverbindungen außerhalb der Kavität. [4, 25, 51] (Geeignete Stellen für Option 1. und 2. sind häufig in der Nähe von Ecken und Kanten des Formeinsatzes).	 <p>Bolzenverbindung gegen horizontale Verschiebung</p>	
Symmetrie	<b>3. Option:</b> Spezieller Verlauf der Trennebene, wobei geschwungene Kurven besser als Kanten sind. [25, 51]	 <p>Geschwungene Trennebene gegen horizontale Verschiebung</p>	
	Die Konstruktion der Formeinsatzhälften sollte in Bezug auf Länge, Breite und Höhe so symmetrisch wie möglich ausgelegt werden. Bei symmetrischen Formteilen sollten die beiden Hälften die exakt gleiche Struktur haben (Spiegelung an der Trennebene). [25]	 <p>Beispiel anhand eines asymmetrischen Bauteils</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gleichmäßige thermische Belastung aufgrund Symmetrie</li> <li>2. Materialeinsprung</li> <li>3. Vereinfachte Installation an der Spritzgießmaschine</li> </ol>
Querschnitt	Der Querschnitt sollte an Stellen des Formeinsatzes verringert werden, welche nicht die Kavität unterstützen oder Träger der Schließkraft sind. In der Abbildung (siehe rechts) wird eine Formeinsatzhälfte dargestellt, die eine sehr dünne Kavität für folgendes Formteil enthält: [4]	 <p>Vorderseite      Rückseite Kavität des Formteils      Materialeinsparungen</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Materialeinsparung</li> <li>2. Reduzierung der Fertigungszeit</li> <li>3. Querschnittsoptimierung</li> </ol>

Tabelle 3-6: Konstruktionsrichtlinien für Entlüftung



Allgemein		Polymer-Formeinsätze erfahren trotz geringerer Schließkräften, was aus den geringeren Einspritzdrücken resultiert, eine höhere Materialstauchung während des Spritzgießens, als konventioneller Formeinsätze aus Aluminium oder Stahl. Durch dieses Verhalten sind zusätzliche Entlüftungen am Formeinsatz notwendig, die die Gefahr von Lufteinchlüssen und Oberflächenverbrennungen entgegengewirkt. Die Entlüftung kann über Oberflächen, Auswerferstifte oder Entlüftungslöcher realisiert werden. [7, 34]	
Konstruktionsrichtlinien		Positive Effekte	
6. Entlüftung	Die vielseitigste Möglichkeit zur Entlüftung bietet die Oberflächenentlüftung über die Trennebene. [10] Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten (häufig individuell auf das Formteil bzw. den Formeinsatz bezogen):		
	<b>1. Option:</b> Konstruktion eines flachen Kanals (Entlüftungskanal) auf der Trennebene (ca. 0,2 mm tief), welcher ca. 5 mm von der Kavitätswand entfernt ist. Wenn während der Testversuch erkannt wird, dass eine zusätzliche Entlüftung benötigt wird, kann mit einem Messer eine Verbindung des Kanals zur Kavität durch Ankratzen hergestellt werden (erfolgt durch ein handelsübliches Messer). [10]	1. Bessere Entlüftung 2. Reduzierung von Lufteinchlüssen und Oberflächenverbrennungen 3. Optimierung des Schmelzflusses innerhalb der Kavität 4. Vollständige Befüllung der Kavität ohne Hohlräume	
	<b>2. Option:</b> Ankratzen der Trennebene ohne Entlüftungskanal an den Stellen der Kavität, an denen eine Entlüftung notwendig ist, aber kein Kanal angebracht wurde (erfolgt durch ein handelsübliches Messer). [10]		
Passive Entlüftung	<b>3. Option:</b> Durch Post-Processing Maßnahmen, z. B. Planschleifen mit grobkörniger Schleifscheibe der Trennebene, um die Oberflächenrauheit zu erhöhen. [10, 19]		
	Um Lufteinchlüsse zu vermeiden, können neben Oberflächenentlüftungen und konventionellen Entlüftungsbohrungen (können genauso angewandt werden) weitere Maßnahmen getroffen werden. Dazu zählen Änderung der Wandstärke, Änderung der Anschlittsstelle und Änderung der Einspritzgeschwindigkeit. [25, 34, 52]		
Aktive Entlüftung	Um eine automatische und ausreichende Entlüftung über die Oberflächen zu generieren, können geometrische Strukturen von komplexen Kavitätsgeometrien in einzelne Einsätze aufgeteilt und nach dem Druck in den Grundaufbau der Formeinsatzhälften eingebaut werden. [10, 19]	1. Bessere Entlüftung 2. Reduzierung von Lufteinchlüssen und Oberflächenverbrennungen 3. Optimierung des Schmelzflusses innerhalb der Kavität 4. Vollständige Befüllung der Kavität ohne Hohlräume 5. Schneller Austausch bei Versagen einzelner Komponenten, wodurch der Formeinsatz nicht komplett neu gedrückt werden muss	
	Darstellung: 		
WIP: Aktuell sind keine Forschungsarbeiten bekannt, die eine aktive Entlüftung bei Polymer-Formeinsätzen untersuchen.			

### 3.2.2 Formeinsatzmaterial

#### Thermomechanische Eigenschaften:

Die thermomechanischen Eigenschaften, die während des Spritzgießens auf das Polymer-Formeinsatzmaterial wirken, können in den meisten Fällen nicht mit den thermomechanischen Eigenschaften auf konventionelle Formeinsatzmaterialien verglichen werden. Dementsprechend sind Kenntnisse über spezielle Konstruktionsrichtlinien unabdingbar. In Tabelle 3-7 werden die wichtigsten Konstruktionsrichtlinien beschrieben, welche die Eigenschaften des Formeinsatzmaterials steuern können.

**Tabelle 3-7: Zuordnung der wichtigsten Konstruktionsrichtlinien zur Steuerung der thermomechanischen Eigenschaften des Formeinsatzmaterials**

Fragen	Konstruktionsrichtlinien
<b>Wie lassen sich die thermomechanischen Eigenschaften des Formeinsatzmaterials beeinflussen?</b>	<p>Eine hohe Standzeit erfordert möglichst hohe Eigenschaften. Dies betrifft vor allem die Werte Zug-, Biege- und Druckfestigkeit, Zähigkeit und Resistenz gegen hohe Temperaturen (Wärmeformbeständigkeit, Schmelz- bzw. Glasübergangstemperatur, und Wärmekapazität). Die Wärmeleitfähigkeit muss nach Anwendungsfall betrachtet werden, da eine hohe Wärmeleitfähigkeit eine kurze Kühlzeit generiert, jedoch die Standzeit aufgrund der starken Temperaturschwankungen verkürzt. [1, 19, 26, 32]</p> <p>Anders als bei konventionellen Materialien, wird der Wärmeausdehnungskoeffizient aufgrund mangelnder Informationen bei Polymeren von den Lieferanten nicht in den Datenblättern angegeben. Daher muss der Wärmeausdehnungskoeffizient bei Bedarf individuell mittels Wärme-Zug-Versuch ermittelt werden und sollte möglichst gering sein. [53]</p> <p>Formeinsätze müssen in der Regel vor dem Spritzgießen nicht oder nur minimal erwärmt werden. [55]</p>
<b>Wie belasten Prozessparameter und äußere Einflussfaktoren das Formeinsatzmaterial?</b>	<p>Da der thermische Abbau mit steigender Einspritztemperatur zunimmt, sollte das Formeinsatzmaterial anhand der vorher festgelegten Einspritztemperatur des Formteilmaterials bestimmt werden. [25]</p> <p>Es entstehen deutlich höhere Temperaturgradienten im Formeinsatz während des Spritzgießens, weshalb diese zunächst mittels Simulation analysiert und mit geeigneten Maßnahmen, z. B. Temperiersystem oder Öffnungszeit, behoben werden sollten. [53]</p> <p>Formeinsätze sollten nach der Fertigung zeitnah zum Einsatz kommen, da die natürliche Alterung negativen Einfluss auf die Standzeit hat. [57]</p> <p>Direkter Kontakt mit UV-Strahlung, z. B. Sonnenlicht, verkürzt die Standzeit, weshalb Formeinsätze in abgedunkelten und trockenen Räumen gelagert werden sollten. [56]</p>
<b>Welche Einflussfaktoren beeinflussen die Ausdehnung des Formeinsatzmaterials?</b>	<p>Der erhöhte Wärmeausdehnungskoeffizient von Polymeren sollte bei der Konstruktion beachtet werden, da ein hoher Koeffizient zu einer höheren Ausdehnung des Formeinsatzes führt. Grundsätzlich kann der Konstrukteur von einem Faktor im Bereich 10 im Vergleich zu Werkzeugstahl ausgehen. Beispiel: Eine würfelförmige Probe mit 10 mm Seitenlänge aus Digital ABS dehnt sich um <math>133 \mu\text{m}/\text{pro erhöhtem Grad Celsius}</math> aus. Der getestete Temperaturbereich liegt zwischen <math>24^\circ\text{C}</math> und <math>200^\circ\text{C}</math> mit einer linearen Erhöhung von <math>3^\circ\text{C}</math> pro Minute). [1, 53]</p> <p>Nach jedem Spritzgießprozess sollte die Formeinsatztemperatur auf die Ausgangstemperatur gesenkt werden, da sich der Formeinsatz mit steigender Temperatur ausdehnt, wodurch sich die Kavität und auch das Formteil verkleinert. Achtung: Dehnung des Formeinsatzes hängt auch vom Einspritzdruck (mechanische Ausdehnung) ab und mit steigender Standzeit erhöht sich die Restdehnung auch in der Ausgangstemperatur. [32, 57]</p>

**Verfügbare Polymere:**

Siehe auch Abbildung 2.1, 2.2 und 2.3 auf Seite 3 f. Hauptsächlich werden Duroplaste eingesetzt, jedoch kommen auch Thermoplaste und Elastomere immer häufiger zum Einsatz. Sämtliche Materialien lassen durch Post-Processing nachhärten, wodurch eine Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit um den Faktor 4-5 möglich ist. Tabelle 3-8 vergleicht die am häufigsten eingesetzten Materialien der Verfahren SLA und PolyJet in Bezug auf die durchschnittlichen Standzeiten unter gleichen Voraussetzungen (gleiches Formteil, gleiche Einspritztemperatur etc.). Die Spalte „Bemerkung“ dient dazu, die Besonderheiten des jeweiligen Materials zu beschreiben, um eventuelle Anwendungsmöglichkeiten darzustellen.

Tabelle 3-8: Vergleich der Formeinsatzmaterialien in Bezug auf die durchschnittliche Standzeit



Standzeit	Material	Verfahren	Bemerkung
Sehr gut	Accura Bluestone	Stereolithographie	Beste Formteilqualität.
	Somos PerForm	Stereolithographie	Beste Formteilqualität.
	Digital ABS Plus	PolyJet	Sehr gute Formteilqualität. Gute Abbildung komplexer Strukturen.
	Tough	Stereolithographie	Sehr gute Formteilqualität. Gute Abbildung komplexer Strukturen.
Gut	Rigid 10K	Stereolithographie	Besonders geeignet für hohe Einspritzdrücke und -temperaturen. Relativ gute Abbildung komplexer Strukturen.
	RGD 525	PolyJet	Hohe mechanische Eigenschaften (außer Zähigkeit).
	RGD 5161-DM	PolyJet	Geeignet für Features mit einer Wandstärke bis zu 1,0 mm.
	RGD 5160-DM	PolyJet	Geeignet für Features mit einer Wandstärke bis zu 1,5 mm.
Mittel	SPR6000	Stereolithographie	Noch in der Entwicklungsphase (Digital ABS-ähnlich).
	RGD 450	PolyJet	
	Somos Plus GP	Stereolithographie	Gute Oberflächenqualität.
	VisiJet SL	Stereolithographie	Geringe Gratbildung. Hohe Genauigkeit am Anschlitt und Kanal.
Schlecht	High Temperature	Stereolithographie	Für hohe Einspritztemperaturen mit geringen Schließ- und Einspritzdrücken geeignet.
	Standard	Stereolithographie	Relativ hohe Maßabweichungen. Gutes Füllverhalten.
	RGD 720	PolyJet	Nicht für komplexe Strukturen geeignet. Nur für geringe Einspritztemperaturen geeignet.
	RGD 810	PolyJet	Nicht für komplexe Strukturen geeignet. Nur für geringe Einspritztemperaturen geeignet.

Quelle: In Anlehnung an [5, 7, 19, 20, 22, 25, 27, 29, 32, 46, 58–61]

Beim Formeinsatz kann nicht allgemein festgelegt werden, wie viele Spritzgießzyklen mit einem Formeinsatzmaterial durchgeführt werden können. Es gelten die gleichen Begründungen, die bereits in Kapitel 2.3.2 (siehe Seite 6) beschrieben sind.

Die Materialien HTM 140 V2 von Envision TEC) und Somos PerForm von Covestro eignen sich als Formeinsatzmaterial für das DLP-Verfahren. [3, 21]

- **WIP:** Aktuell gibt es zu wenig Informationen, um DLP-Materialien mit den anderen Verfahren vergleichen zu können.

### 3.2.3 Multi-Materialien

Beim Multi-Material 3D-Druck, werden innerhalb eines Druckvorgangs Polymere mit sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften kombiniert. Beim Additive Tooling mit PolyJet-Anlagen können durch dieses Verfahren Elastomere in Formeinsätze integriert werden:

1. **Option:** Drucken einzelner Features aus einem anderen Material. Z. B. können Elastomere eingesetzt werden um die Entformung von Hinterschneidungen zu erleichtern (siehe Kapitel 3.6.3 Seite 29 und 3.6.4 Seite 29). Beispiel: Um die Verbindung zwischen Agilus30 und Digital ABS zu stärken, sollte man an der Verbindungsstelle einen Anteil Digital ABS graduell beimischen um diese widerstandsfähiger zu machen (siehe Abbildung 3.1). [2]

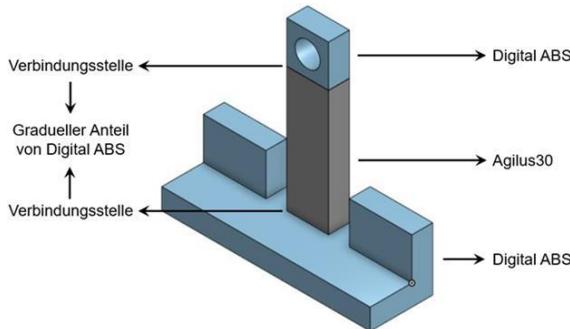


Abbildung 3.1: Beispiel von Multi-Material an einer Zugprobe [2]

**Option:** Beschichtung eines Elastomers mit einem anderen Material, um die positiven Eigenschaften zu kombinieren. Beispiel: Beschichtung von Agilus30 (Stratasys) mit Digital ABS (Stratasys). Es genügt eine Schichtdicke von 0,2 mm, um die Hafung von Agilus30 zu vermeiden und die Flexibilität trotzdem zu erhalten (siehe Abbildung 3.2). [2]

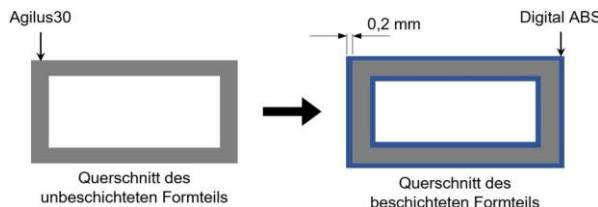


Abbildung 3.2: Beispiel eines beschichteten Formteils

Quelle: In Anlehnung an [2]

Zusatz: Auf DLP- und SLA-Anlagen lassen sich Formeinsatzmaterialien mittels Kohlenstofffasern verstärken, was die Entstehung bzw. Vergrößerung von Oberflächenrissen beim Spritzgießen minimiert. Der Anteil an Kohlenstofffasern sollte 5 % nicht übersteigen. [40, 41]

### 3.3 Angussystem (Schmelzeführung)

#### 3.3.1 Angussbuchse und Angusskegel

Der direkte Kontakt zwischen der heißen Zylinderdüse und dem Formeinsatz ist zu vermeiden. Dies wird durch den Einsatz einer konventionellen metallischen Angussbuchse erreicht. [19, 46] Für die Umsetzung gibt es grundsätzlich drei Varianten, die je nach Anwendungsfall gesondert betrachtet werden müssen:

##### 1. Integration der Angussbuchse im Stammwerkzeug bzw. Stahlplatte:

Durch diese Option entstehen keine Besonderheiten durch das Additive Tooling (siehe Abbildung 3.3). [10]

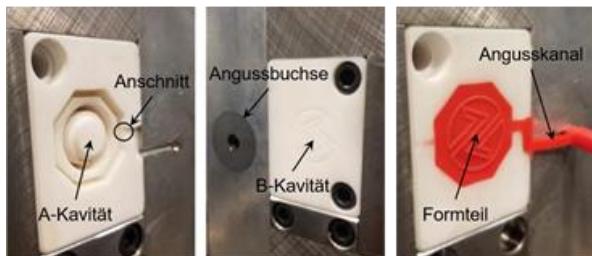


Abbildung 3.3: Integration der Angussbuchse im Stammwerkzeug mit gespritztem Formteil

Quelle: In Anlehnung an [4]

##### 2. Integration der Angussbuchse im Formeinsatz:

Der Bohrungsdurchmesser für die Angussbuchse sollte im Formeinsatz um 0,2 mm bis 0,3 mm kleiner ausgelegt und bei der Montage passend aufgerieben werden. Die Entformungsschräge der Angussbuchse sollte  $\geq 3^\circ$  sein. Aufgrund der besseren Kraftverteilung wird ein möglichst großer Angussbuchsendurchmesser empfohlen. [10, 46] Abbildung 3.4 stellt diese Variante anhand von zwei Beispielen dar.

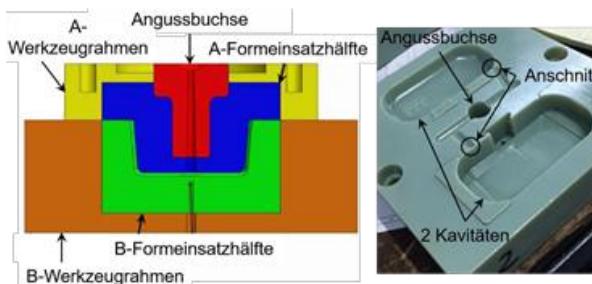


Abbildung 3.4: Integration der Angussbuchse im Formeinsatz; Schematische Darstellung mit einer Kavität (links); Schematische Darstellung mit zwei Kavitäten (rechts)

Quelle: In Anlehnung an [10, 46]

### 3. Konturnahe Integration der Angussbuchse im Formeinsatz:

Es gelten die gleichen Bedingungen, wie in der zweiten Variante. Der Unterschied liegt in der Konstruktion der Angussbuchse, die in direktem Kontakt mit der Kavitätswand steht. Es gibt also keinen zusätzlichen Kanal zwischen Angussbuchse und Kavität. [62] Abbildung 3.5 stellt diese Variante anhand eines Beispiels mit einem Eiskratzers als Formteil dar.

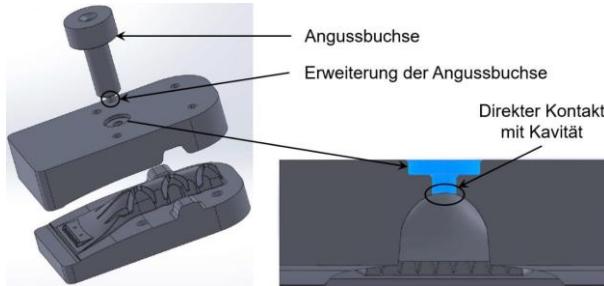


Abbildung 3.5: Konturnahe Integration der Angussbuchse im Formeinsatz  
Quelle: In Anlehnung an [62]

#### 3.3.2 Angusskanal und Angussverteiler

Die allgemeinen Konstruktionsrichtlinien von konventionellen Spritzgießwerkzeugen in Kombination mit den Besonderheiten von Additive Tooling, z. B. großzügige Kantenverrundungen vorsehen, können angewandt werden. Heißkanalsysteme werden jedoch nicht empfohlen. [10] Abbildung 3.6 stellt ein Beispiel eines konventionellen Angusskanals bzw. eines Angussverteilers in einem 8-fach Spritzgießwerkzeug dar, welches nach diesem Prinzip auch in einem Polymer-Formeinsatz konstruiert werden kann.

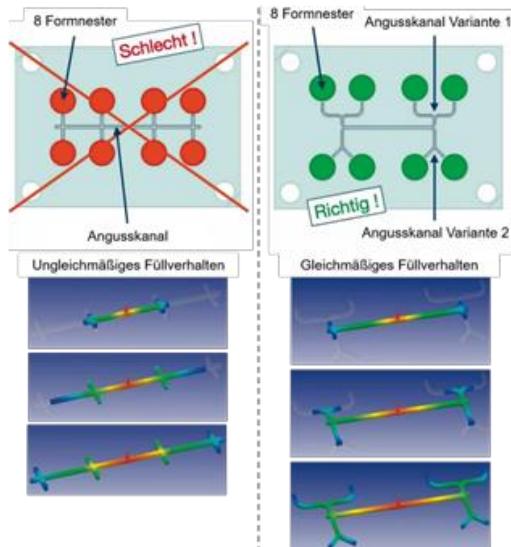


Abbildung 3.6: Vergleich zweier Angusskanäle in einem 8-fach Spritzgießwerkzeug

Quelle: In Anlehnung an [63]

### 3.3.3 Anschnitttechnik

Punktanschnitte und Tunnelanschnitte sind grundsätzlich zu vermeiden. [10, 19, 34] Tabelle 3-9 gibt einen Überblick der gebräuchlichsten Anschnittarten.

Tabelle 3-9: Anwendbarkeit der verschiedenen Anschnittarten

Stangenanschnitt	Film- oder Bandanschnitt	Ringanschnitt	Schirmanschnitt
Anwendbarkeit	Anwendbarkeit	Anwendbarkeit	Anwendbarkeit
JA	JA	JA	JA
Punktanschnitt	Tunnelanschnitt		
Anwendbarkeit	Anwendbarkeit		
NEIN	NEIN		

Quelle: In Anlehnung an [10, 19, 34]

Bei symmetrischen Formteilen (besonders bei Rotationssymmetrie) sollte der Anschnitt im Zentrum liegen, wodurch der Abstand zu Features identisch ist und ein gleichmäßiges Füllverhalten entsteht. [1] Der Anschnitttdurchmesser sollte 2-3-mal größer ausgelegt werden als in konventionellen Formeinsätzen. Empfohlen werden Ø 5 mm bis 8 mm bei:

- Formteilgröße < 100 mm x 50 mm x 25 mm
- Formteilwanddicke zwischen 1 mm – 2 mm
- Standard-Duroplaste (bei hoher Viskosität wird Ø 8 mm – 9 mm empfohlen) [10]

**Tipp:** Gegenüberliegende Wände sollten in einer Kavität möglichst weit vom Anschnitt entfernt liegen. Empfohlen wird die Ausrichtung des Anschnittes direkt auf einen Auswerferstift.

Quelle: [64]

### 3.4 Temperiersystem

#### 3.4.1 Kühlzeit

Folgende Besonderheiten gelten für die Kühlzeit in Polymer-Formeinsätzen:

- Die Kühlzeit ist aufgrund der schlechteren Wärmeleitfähigkeit deutlich länger (ca. 5-7-mal so lange), als in konventionellen Formeinsätzen (abhängig von den Faktoren Einspritztemperatur, Formeinsatzmaterial, Formteilgröße, -geometrie und -wandstärke), was zu einer deutlich längeren Zykluszeit des Spritzgießprozesses führt (ca. 4-6-mal so lange) [3, 22, 53, 59, 60]
- Die Kühlzeit sollte aufgrund der Erwärmung von Features, der Formteilschwindung und der daraus entstehenden Oberflächenhaftung so kurz wie möglich gewählt werden. Ist das Formteil nicht komplett geformt bzw. verfestigt, sollte die Kühlzeit in Intervallen von 5 s erhöht werden [7, 8] 

Abbildung 3.7 vergleicht die beiden Spritzgießprozesse in Abhängigkeit der benötigten Zeit.

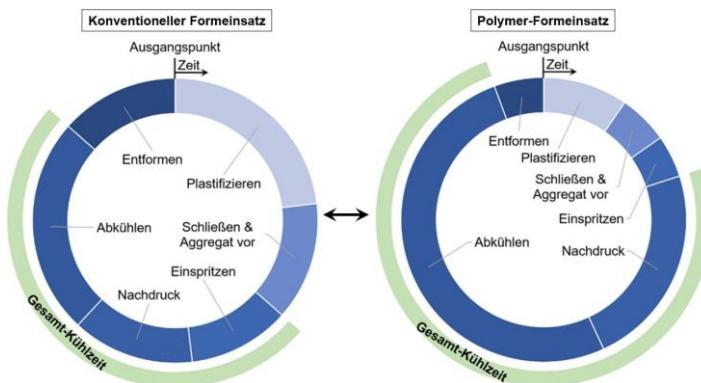


Abbildung 3.7: Vergleich der benötigten Kühlzeit bzw. des gesamten Spritzgießprozesses  
Quelle: In Anlehnung an [59, 65, 66]

### 3.4.2 Temperierkonzept Kühlkanal

Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Polymeren verkürzen Kühlkanäle die Kühlzeit nur minimal und werden nur bedingt empfohlen. [3, 34, 67] Trotzdem generieren sie einige Vorteile für den Formeinsatz:

- Die durchschnittliche Formeinsatz-Temperatur lässt sich senken  
→ Ziel ist eine Temperatur konstant unter 50 °C während der Spritzgießvorgänge [46]
- Durch die reduzierte Temperatur kann die Standzeit um bis zu 20 % erhöht werden  
→ Je flacher das Formteil, desto größer der Effekt [10, 19]

Folgende Abmessungen für **konventionelle Kühlkanäle** sind zu empfehlen:

- Abstand zur Kavitätswand (von ihrer Mittellinie) = 8 mm – 10 mm
- Durchmesser = 8 mm (6 mm in engen Bereichen)  
(siehe Abbildung 3.8)
- Bohrungsdurchmesser für Anschlusschlauch des Kühlmittels = 8,8 mm; Tiefe = 10 mm – 12 mm (Bohrung mit Gewinde versehen)
- Konventionelle Kühlkanäle werden grundsätzlich manuell bzw. mechanisch, z. B. durch Bohrungen gefertigt. Eine additive Herstellung ist auch möglich, es entsteht jedoch ein Nachteil durch die Entfernung des Stützmaterials [10]

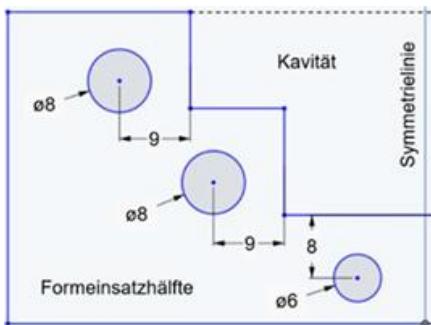


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung konventioneller Kühlkanäle an einer Formeinsatzhälfte

Die geometrischen Freiheitsgrade von additiven Fertigungsanlagen erlauben konturnahe Kühlkanäle, welche jedoch aufgrund der Schwierigkeiten beim Entfernen des Stützmaterials nicht zu empfehlen sind. Abbildung 3.9 stellt den Unterschied der beiden Varianten dar. [10, 23, 67]

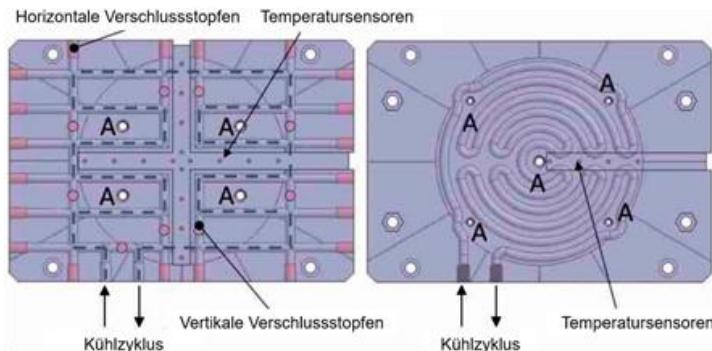


Abbildung 3.9: Aufbau eines konventionellen Kühlkanals durch Bohrungen (links) und eines konturnahen Kühlkanals durch additive Fertigung (rechts)

Quelle: In Anlehnung an [23]

### 3.4.3 Temperierverteilungssysteme

Darunter fallen die Systeme Kontinuierliche Kühlung, Segmentierte Kühlung, Dynamische Kühlung, Impulskühlung und Kernkühlung. [68]

- **WIP:** Aktuell sind keine Forschungsarbeiten bekannt, welche die verschiedenen Temperierverteilungssystemen in Polymer-Formeinsätzen untersuchen.

### 3.4.4 Alternatives Temperierkonzept Druckluft

Aktuell ist eine längere Öffnungszeit die einzige Möglichkeit einen Polymer-Formeinsatz effizient zu kühlen und dadurch dessen Standzeit zu verlängern. Die Formeinsatzhälften sollten dabei vor jedem neuen Schuss auf eine Temperatur von 35 °C abgekühlt werden. Eine zusätzliche Bestrahlung der Kavitätsoberflächen mit Druckluft kann dieses Ziel schneller erreichen und die Öffnungszeit mehr als halbieren, wodurch die Zykluszeit reduziert wird. Dementsprechend sollte dieses Temperierkonzept nach jedem Spritzgießvorgang eingesetzt werden. Dies kann manuell oder mittels automatischer Kühlvorrichtung erfolgen. [19, 29, 60, 69, 70]

**Tipp:** Die Formeinsatztemperatur sollte immer unter der Glasübergangstemperatur des Formeinsatzmaterials (in der Regel werden Duropaste verwendet) liegen, da die Streckgrenze mit steigender Temperatur abnimmt.

Quelle: [7]

In Abbildung 3.10 wird eine automatische Kühlvorrichtung dargestellt.

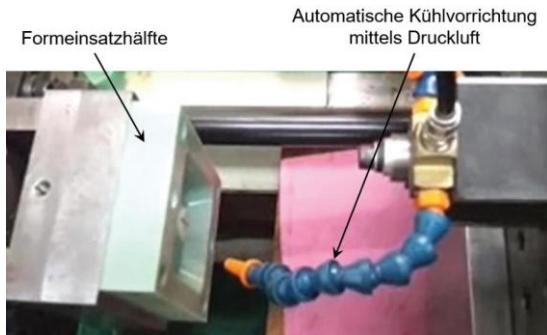


Abbildung 3.10: Beispiel einer automatischen Kühlvorrichtung mittels Druckluft  
Quelle: In Anlehnung an [27]

### 3.5 Modulares Werkzeugkonzept (Stammwerkzeug)

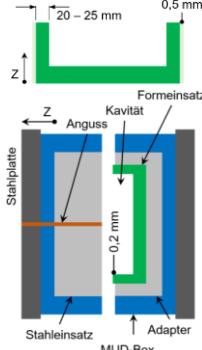
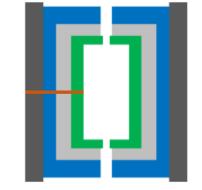
Tabelle 3-10, 3-11 und 3-12 beschreiben die verschiedenen modularen Werkzeugkonzepte, die je nach Formteil und Anwendungsbereich verwendet werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass grundsätzlich der Einsatz einer Master Unit Die (MUD-Box), anstelle von Stahlplatten, empfohlen wird, in der die verschiedenen Varianten aus den Tabellen angewandt werden können. Die MUD-Box ist ein Schnellwechselsystem für Formeinsätze.

Für ein besseres Verständnis, stellt Abbildung 3.11 ein konventionelles modulares Werkzeugkonzept, welches grundsätzlich auch für Polymer-Formeinsätze verwendet werden kann, dar. Die Abbildung zeigt drei baugleiche Formeinsätze, die verschiedene Kavitäten besitzen und in der gleichen MUD-Box eingesetzt werden können. Die Varianten aus den folgenden Tabellen bauen auf diesem Konzept auf.



Abbildung 3.11: Beispiel für ein modulares Werkzeugkonzept [76]

Tabelle 3-10: Konstruktionsrichtlinien für Werkzeugrahmen mit Adapter

Konstruktionsrichtlinien für das modulare Werkzeugkonzept			
Allgemein	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung & Anwendung	Vor- & Nachteile
Werkzeugrahmen (MUD-Box)	<b>Abmaße:</b> Der Formeinsatz sollte 0,2 mm (nicht mehr als 0,5 mm) dicker konstruiert werden, als der dafür vorgesehene Adapter. Dieses Aufmaß sollte an der Rückseite hinzugefügt werden. Alternativ können Unterlegscheiben verwendet werden. Der Formeinsatz sollte an allen Seiten 20 mm - 25 mm dicker sein als die eigentliche Kavität. Darüber hinaus sollten die Breite und Länge ebenfalls überdimensioniert werden (0,5 mm) und durch Post-Processing Maßnahmen (z. B. Schleifen oder Fräsen) an den Adapter angepasst werden.  <b>Befestigung:</b> Die Befestigung des Formeinsatzes sollte entweder über Verschraubung oder Einspannung erfolgen. Bei der Option Verschraubung sollten die Befestigungsschrauben nicht zu fest angezogen werden, da ansonsten Risse am Formeinsatz entstehen. Geeignete Stellen für die Schrauben sind in der Nähe von Ecken und Kanten. Löcher können gebohrt oder additiv gefertigt werden.  <b>Verkürzung Zykluszeit:</b> Um die Zykluszeit zu verkürzen sollte der ganze Formeinsatz bei Annäherung an die zulässige Temperatur (bei Duroplasten die Glasübergangstemperatur) durch einen identischen Formeinsatz ausgetauscht werden (externes Abkühlen).	 <b>Empfohlene Anwendung:</b> Kleine bis mittlere Formteile (einfache bis komplexe Struktur) in Endproduktequalität oder für Endnutzen (Kleinserien). Formteil muss eine ebene Seite besitzen (Kontakt zu Stahleinsatz).	<b>Vorteile:</b> 1. Verbesserte Schließung (Abdichtung) und minimierte Gratbildung 2. Geringere Belastungen für Formeinsatz, da die Kraftübertragung auf MUD-Box übergeht 3. Hohe Flexibilität durch Umrüsten mit anderen Formeinsätzen (Wiederverwendbarkeit) 4. Aufgrund des geringen Materialverbrauchs (Polymer) und der kurzen Druckzeit langfristig preiswerte Lösung 6. Optimale Ausrichtung des Formeinsatzes 7. Optimale Passung und geringe Ausdehnung durch Post-Processing 8. Komplexe Formteile aufgrund des Entformungssystems  <b>Nachteile:</b> 1. Nur kleine Kavitäten (Formteile) möglich 2. Zu Beginn hoher Fertigungsaufwand 3. Zu Beginn hohes Investitionsvolumen
		 <b>Empfohlene Anwendung:</b> Kleine bis mittlere Formteile (einfache bis komplexe Struktur) in Endproduktequalität oder für Endnutzen (Kleinserien).	

Quelle: In Anlehnung an [3, 4, 10, 19, 24, 41, 51, 66, 71]

Tabelle 3-11: Konstruktionsrichtlinien für Werkzeugrahmen ohne Adapter

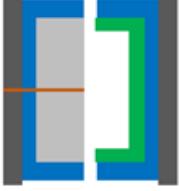
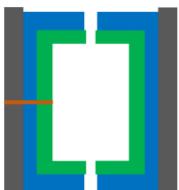
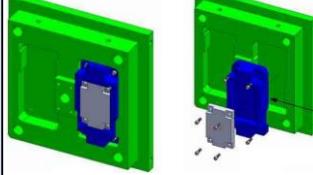
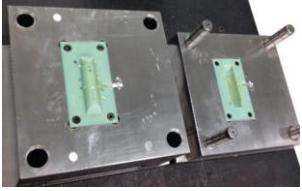
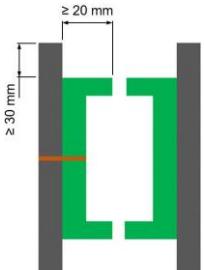
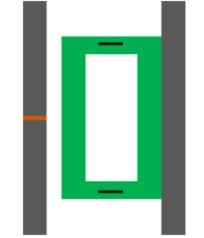
	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung & Anwendung	Vor- & Nachteile
Werkzeugrahmen (MUD-Box)	<b>Einseitig ohne Adapter</b>  <b>Abmaße:</b> Der Formeinsatz sollte 0,2 mm (nicht mehr als 0,5 mm) dicker konstruiert werden, als die dafür vorgesehene MUD-Box. Dieses Aufmaß sollte an der Rückseite hinzugefügt werden. Alternativ können Unterlegscheiben verwendet werden. Der Formeinsatz sollte an allen Seiten 20 mm - 25 mm dicker sein als die eigentliche Kavität. Darüber hinaus sollten die Breite und Länge ebenfalls überdimensioniert werden (0,5 mm) und durch Post-Processing Maßnahmen (z. B. Schleifen oder Fräsen) an die MUD-Box angepasst werden.  <b>Befestigung:</b> Die Befestigung des Formeinsatzes sollte entweder über Verschraubung oder Einspannung erfolgen. Bei der Option Verschraubung sollten die Befestigungsschrauben nicht zu fest angezogen werden, da ansonsten Risse am Formeinsatz entstehen. Geeignete Stellen für die Schrauben sind in der Nähe von Ecken und Kanten. Löcher können gebohrt oder additiv gefertigt werden.  <b>Verkürzung Zykluszeit:</b> Um die Zykluszeit zu verkürzen sollte der ganze Formeinsatz bei Annäherung an die zulässige Temperatur (bei Duroplasten die Glasübergangstemperatur) durch einen identischen Formeinsatz ausgetauscht werden (externes Abkühlen).		<b>Empfohlene Anwendung:</b> Mittlere bis große Formteile (einfache bis komplexe Struktur) in Endproduktequalität oder für Endnutzen (Kleinserien). Formteil muss eine ebene Seite besitzen (Kontakt zu Stahleinsatz).
	<b>Beidseitig ohne Adapter</b>		<b>Nachteile:</b> 1. Aufgrund des hohen Materialverbrauchs und der langen Druckzeit teure Lösung 2. Zu Beginn hoher Fertigungsaufwand 3. Zu Beginn hohes Investitionsvolumen
	<b>Beidseitig mit Adapter:</b>  <b>MUD-Box beidseitig mit Adapter:</b> 	<b>MUD-Box beidseitig ohne Adapter:</b> 	
Praktische Beispiele	Quelle: In Anlehnung an [3, 4, 10, 19, 24, 41, 51, 66, 71]		

Tabelle 3-12: Konstruktionsrichtlinien für Stahlplatten

	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung & Anwendung	Vor- & Nachteile
Stahlplatten	<p><b>Abmaße:</b> Die Stahlplatte sollte mindestens 30 mm größer ausgelegt werden als der Formeinsatz (Breite und Länge). Der Formeinsatz sollte mindestens 20 mm Dicke in Schließrichtung aufweisen.</p> <p><b>Befestigung:</b> Die Befestigung sollte mittels Verschraubung erfolgen, wofür Gewindebohrungen an der Stahlplatte und Löcher (gebohrt oder additiv hergestellt) am Formeinsatz vorzunehmen sind. Die Variante ist sowohl einseitig als auch beidseitig (siehe Darstellung) möglich.</p>	 <p><b>Empfohlene Anwendung:</b> Kleine bis große Formteile (einfache bis komplexe Struktur) in Endproduktequalität für Funktionsüberprüfung.</p>	<p><b>Vorteile:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Komplexe Formteile aufgrund des Entformungssystems</li> <li>2. Große Kavitäten (Formteile) möglich</li> <li>3. Schnelle Überprüfung der Formteil-Funktionen</li> <li>4. Zu Beginn geringer Fertigungsaufwand</li> </ol> <p><b>Nachteile:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hohes Investitionsvolumen in Entformungssystem</li> <li>2. Schlechte Ausrichtung des Formeinsatzes</li> <li>3. Hoher Materialverbrauch und lange Druckzeit</li> <li>4. Hohe Belastungen für Formeinsatz</li> </ol>
Stahlplatten	<p><b>Abmaße:</b> Die Stahlplatte sollte mindestens 30 mm größer ausgelegt werden als der Formeinsatz (Breite und Länge). Der Formeinsatz sollte mindestens 20 mm Dicke in Schließrichtung aufweisen.</p> <p><b>Befestigung:</b> Die Formeinsatzhälften sollten mittels Bolzen ausgerichtet werden, wofür entsprechende Löcher vorzunehmen sind. Alternativ kann auch doppelseitiges Klebeband verwendet werden.</p> <p><b>Entformung:</b> Um die manuelle Entformung zu erleichtern, sollte bei komplexeren Geometrien der Formeinsatz aus mehreren Teilen bestehen (mindestens drei). Die Variante ist sowohl einseitig als auch beidseitig (siehe Darstellung) möglich.</p>	 <p><b>Empfohlene Anwendung:</b> Kleine bis große Formteile (eher für einfache Struktur) in Endproduktequalität für Funktionsüberprüfung.</p>	<p><b>Vorteile:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Geringstes Investitionsvolumen notwendig</li> <li>2. Plug &amp; Play Lösung</li> <li>3. Große Kavitäten (Formteile) möglich</li> <li>4. Schnelle Überprüfung der Formteil-Funktion</li> <li>5. Zu Beginn geringer Fertigungsaufwand</li> </ol> <p><b>Nachteile:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Höhere Fertigungsaufwand beim komplexeren Formteilen</li> <li>2. Schlechte Ausrichtung des Formeinsatzes</li> <li>3. Hoher Materialverbrauch und lange Druckzeit</li> <li>4. Hohe Belastungen für Formeinsatz</li> <li>5. Manuelle Entformung und längere Zykluszeit</li> </ol>
Praktische Beispiele	<p>Stahlplatte mit Entformungssystem:</p>  <p>Stahlplatte ohne Entformungssystem:</p> 		

Quelle: In Anlehnung an [10]

### 3.6 Entformungssystem

#### 3.6.1 Auswerferstifte

Für Auswerferstifte in Polymer-Formeinsätzen sollten folgende zwei Aspekte betrachtet werden:

##### 1. Löcher für Auswerferstifte:

- Die Löcher im Formeinsatz sollten gebohrt und nicht gedruckt werden (siehe Abbildung 3.12) [3, 19, 58]
- Die Bohrungen sollten 0,2 mm – 0,3 mm kleiner als die Auswerferstifte ausgelegt und während des Zusammenbaus aufgerieben werden [19]
- Die Auswerferstifte sollten festsitzen, aber noch frei beweglich sein. Empfohlene Passung für die Bohrung ist H7 (Spielpassung) [3]



Abbildung 3.12: Überprüfung der gebohrten Passung [10]

##### 2. Platzierung der Auswerferstifte:

- Das Formteil darf sich beim Entformen nicht verbiegen. Dies kann durch eine geschickte Platzierung der Auswerferstifte erreicht werden, z. B. an einem Strangpressprofil oder einer Rippe mit hohem Aspektverhältnis (siehe Abbildung 3.13) [34]
- Der Abstand der Auswerferstifte sollte nicht kleiner als 3 mm zum Rand der Kavität sein [19]



Abbildung 3.13: CAD-Modell eines Eiskratzers mit Positionierung der Auswerferstifte  
Quelle: In Anlehnung an [62]

### 3.6.2 Entformungskraft

Die benötigte Entformungskraft ist abhängig von der Oberflächenhaftung zwischen Formteil und Formeinsatz, die in Polymer-Formeinsätzen aufgrund der Druckgenauigkeit (siehe Kapitel 5.2 Seite 37) deutlich höher ist und ein entscheidender Faktor für die Standzeit darstellt. [53, 57] Folgende Möglichkeiten am Formeinsatz können die Oberflächenhaftung reduzieren:

- Einführung bzw. Veränderung von Entformungsschrägen
- Verwendung von Trennmittel
- Verringerung der Oberflächenrauheit mittels Druckgenauigkeit → siehe Kapitel 0
- Reduzierung der Kühlzeit → siehe Kapitel 3.4.1 (Seite 20)
- Optimierung von Hinterschneidungen → siehe Kapitel 3.6.3 und 3.6.4 (Seite 29)
- Langes Nachhärten im Post-Processing → siehe Kapitel 5.2 (Seite 37)
- Oberflächenbearbeitung im Post-Processing → siehe Kapitel 5.2 (Seite 37) [53, 72–74]

#### Entformungsschrägen:

Entformungsschrägen sollten nicht weniger als  $2^\circ$  betragen, wobei die empfohlenen Werte bei ca.  $5^\circ$  liegen (siehe Abbildung 3.14). Ist die gedruckte Schichtdicke des Formeinsatzes kleiner als 100 µm, sollten die Entformungsschrägen größtmöglich ausgelegt werden (solange die Konstruktion es zulässt). Ist die Schichtdicke größer als 100 µm ist von Entformungsschrägen abzuraten, da die entstehende Oberflächenhaftung größer ist, als der positive Effekt der Entformungsschrägen. [3, 10, 19, 34, 75, 76]

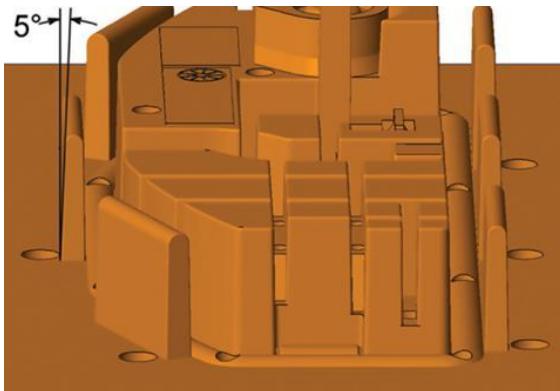


Abbildung 3.14: Empfohlene Entformungsschräge [10]

#### Trennmittel:

Um die Oberflächenhaftung während der Entformung zu reduzieren, sollte vor jedem Spritzgießzyklus Trennmittel auf die Kavitätsfläche gesprührt werden. Empfohlen sind Trennmittel auf Silikonbasis (außer bei den Formteilmaterialien PE und PP) oder als Alternative Glycerin. Nachteile bei der Verwendung von Trennmittel sind Lufteinschlüsse in der Kavität und Verschlechterung der Oberflächenqualität am Formteil durch matte Stellen und Schlieren. Diese Effekte sind bei Glycerin stärker ausgeprägt. [3, 7, 8, 60, 77]

### 3.6.3 Formteile mit Hinterschneidungen

Um Formteile mit Hinterschneidungen zu entformen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die bisher noch wenig erforscht wurden.

#### Abstreiftechnik:

- **WIP:** Aktuell sind keine Forschungsarbeiten bekannt, welche die Abstreiftechnik in Polymer-Formeinsätzen untersuchen.

#### Schiebertechnik:

Die Schiebertechnik mittels Schrägbolzen kann zur Entformung von Hinterschneidungen eingesetzt werden. [5] Der Einsatz von Multi-Materialien durch Elastomere ist auch möglich (beim PolyJet-Verfahren). In Abbildung 3.15 wird ein Formeinsatz als Beispiel dargestellt, welcher mittels Schiebertechnik eine Hinterschneidung entformt. Das elastische Element aus Agilus30 zieht beim Öffnen der Form das Schieberelement wieder zurück in seine Ausgangsposition. Ergebnis: Reduzierung des Verkantens und der mechanischen Kräfte. [2]

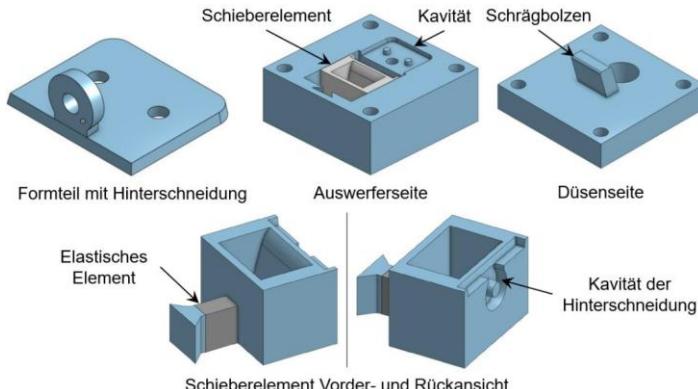


Abbildung 3.15: Beispielanwendung der Schiebertechnik mittels elastischen Elementes

Quelle: In Anlehnung an [2]

Die Schiebertechnik mit Hydraulikzylinder ist aufgrund einer größeren Anzahl an Werkzeugkomponenten, einem Mehraufwand in der Werkzeugmontage und dem benötigten Anschluss an ein Hydrauliksystem wesentlich aufwendiger und für Polymer-Formeinsätze nicht zu empfehlen. [5]

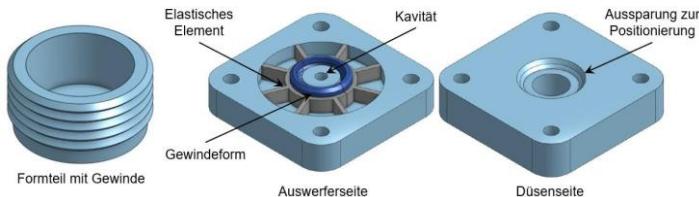
#### Backentechnik:

- **WIP:** Aktuell sind keine Forschungsarbeiten bekannt, welche die Backentechnik in Polymer-Formeinsätzen untersuchen.

### 3.6.4 Formteile mit Gewinden

- **WIP:** Aktuell sind keine Forschungsarbeiten bekannt, welche die konventionelle Entformung, z. B. Ausschraubeinrichtung oder Einfallkern, in Polymer-Formeinsätzen untersuchen.

Der Einsatz von Multi-Materialien in Form von Elastomeren ist auch bei Gewinden möglich (beim PolyJet-Verfahren). In Abbildung 3.16 wird ein Formeinsatz als Beispiel dargestellt, welcher mittels des elastischen Elementes aus Agilus30 ein Formteil mit Außengewinde entformt. Das elastische Element zieht beim Öffnen der Form die Gewindeform zurück in seine Ausgangsposition. Ergebnis: Direkte Entformung eines Gewindes ohne Mehraufwand. [2]



**Abbildung 3.16: Beispielanwendung von Entformung eines Gewindes mittels elastischen Elementes**  
Quelle: In Anlehnung an [2]

## 4. Spritzgießsimulation

### 4.1 Rheologische Simulation

Gängige Simulationssoftwares, z. B. Moldex3D, Moldflow, COMSOL oder SigmaSoft, für die rheologische Simulation können und sollten grundsätzlich auch für das Spritzgießen in Polymer-Formeinsätzen eingesetzt werden. [7; 78; 79] Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass trotz fehlender Informationen über die Formeinsatzmaterialien die rheologische Simulation ausreichend genaue Informationen zu Prozessparametern, z. B. Füllzeit, Füllverhalten, Einspritzdruck, Schließkraft oder Druck in der Kavität und auftretende Fehler während des Spritzgießens, z. B. Lufteinschlüsse, Bindenähte oder Einfallstellen simuliert werden können (siehe Abbildung 4.1 für Beispiele von Simulationsergebnissen). [7, 52, 52, 80]

Aus den Simulationsergebnissen können Prozessbedingungen optimiert, Materialien geändert und Konstruktionen modifiziert werden. [49] Dabei sollte beachtet werden, dass aktuell noch nicht jeder Aspekt einer rheologischen Simulation untersucht wurde, weshalb Kenntnisse über bisher erforschte Schwerpunkte in Polymer-Formeinsätzen für den Konstrukteur hilfreich sind.

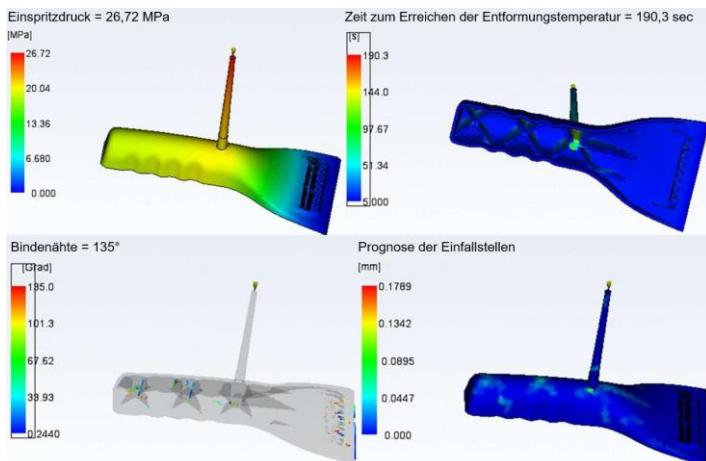


Abbildung 4.1: Simulationsbeispiele anhand eines Eiskratzers (Formteil)

Quelle: In Anlehnung an [62]

#### 4.1.1 Analysierte Schwerpunkte in Polymer-Formeinsätzen

- **Volumetrische Schwindung:** Durch die Simulation können die Stellen eines Formteils identifiziert werden, an denen die größte Schwindung auftritt. Abbildung 4.2 stellt mögliche geometrische Volumenkörper eines Formteils dar. Bei der Simulation sind besonders massive Volumenkörper, z. B. Zylinder, Pyramide oder Prisma, zu betrachten, da diese die höchsten volumetrischen Schwindungen auf-

weisen. Dünnewandige Volumenkörper mit Hohlraum haben die geringsten volumetrischen Schwindungen. [81] Tendenziell ist die reale Schwindung eines Formteils größer als das Simulationsergebnis. [53]

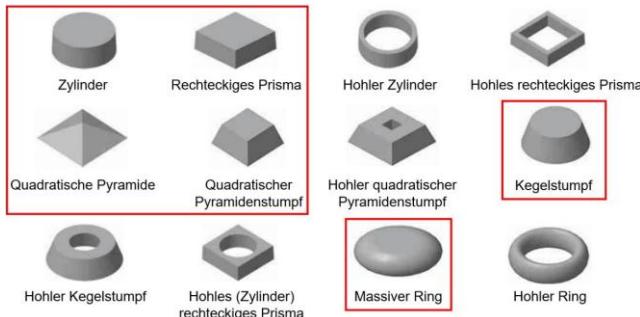


Abbildung 4.2: Simulierte geometrische Volumenkörper im Formteil; Größte volumetrische Schwindungen (rot markiert)

Quelle: In Anlehnung an [81]

Abbildung 4.3 stellt ein Beispiel einer volumetrischen Schwindung an einem Formteil dar.

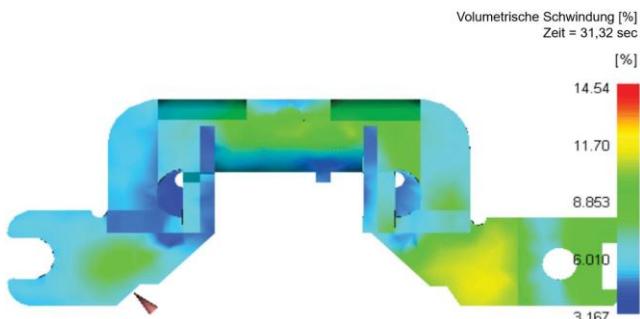


Abbildung 4.3: Volumetrische Schwindung eines Formteils in einem Polymer-Formeinsatz [82]

- **Anschnittposition:** Durch die Druckauswirkungen auf die Kavität und deren Füllverhalten während des Spritzgießens kann die Anschnittposition bewertet und optimiert werden (siehe Abbildung 4.4). Außerdem können problematische Bereiche (hohe Druckauswirkungen) identifiziert werden, die nach jedem Spritzgießprozess überwacht werden sollten oder eine Änderung der Konstruktion erfordern. [7, 52]

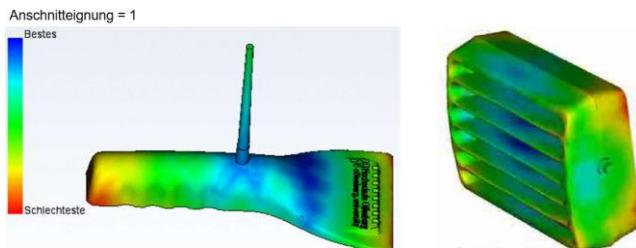


Abbildung 4.4: Simulation der optimalen Anschnittposition anhand von zwei Formteilen  
Quelle: In Anlehnung an [52, 62]

- **Ausbruchstellen:** Mögliche Ausbruchstellen können erkannt werden (wahrscheinlich die ersten Ausbruchstellen), indem das Simulationsergebnis nach hohen Temperaturkonzentrationen und hohen Scherspannungen/-kräften analysiert wird, wobei Temperaturkonzentrationen in der Kavität tendenziell mehr Schäden verursachen. Die Wahrscheinlichkeit für Temperaturkonzentrationen ist in Engstellen des Fließweges, im Bereich des Anschnitts und am Ende des Fließweges am größten (siehe Abbildung 4.5). Grundsätzlich sind beide Belastungsarten zu minimieren und eine Kombination an gleicher Stelle ist zu vermeiden. [64, 69]

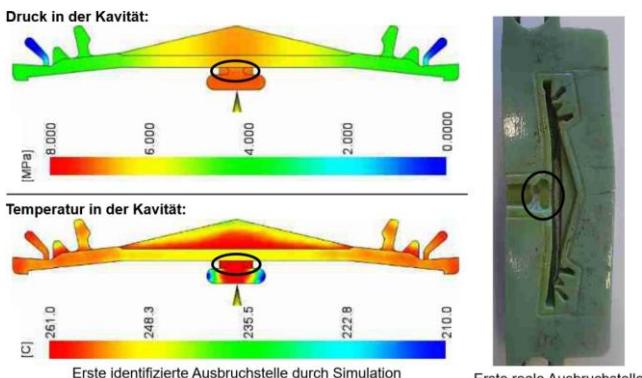


Abbildung 4.5: Identifizierte Ausbruchstelle durch Simulation in einer Kavität  
Quelle: In Anlehnung an [64]

- **Öffnungszeit:** Die Temperaturrentwicklung des Formeinsatzes nach dem Öffnen der Formeinsatzhälfte lässt sich annäherungsweise simulieren, wodurch die Öffnungszeit bzw. Zykluszeit optimiert werden kann. [53, 79]
- **Temperaturzyklus:** Der Temperaturzyklus eines Formeinsatzes wird bei gleichbleibender Kühlzeit nach ca. 5 Spritzgießzyklen stationär. [79] Dieses Verhalten zeigt das Beispiel in Abbildung 4.6, welches den Temperaturverlauf eines Formeinsatzes während des Spritzgießens darstellt.

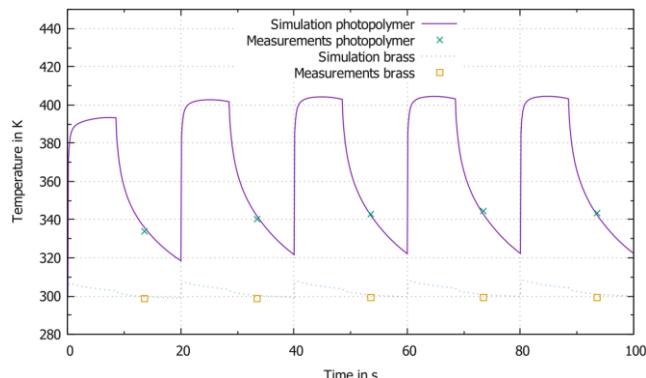


Abbildung 4.6: Simulierte Temperaturrentwicklung über 5 Spritzgießzyklen [79]

- **Kühlverhalten:** Das Kühlverhalten von Formteilen kann erfolgreich simuliert werden, wodurch die Auslegung von Kühlkanälen (falls in der Konstruktion vorgesehen) optimiert werden kann. Dadurch wird eine gleichmäßige Kühlung erreicht. [82]

#### 4.1.2 Alternative Untersuchungsmethoden

Alternative Untersuchungsmethoden können eingesetzt werden, wenn keine Simulationssoftware zur Verfügung steht oder um die Simulationsergebnisse zu überprüfen. Folgende Alternativen können eingesetzt werden:

- Wärmebildkamera zur Analyse der Temperaturrentwicklung des Formeinsatzes nach dem Öffnen der Formeinsatzhälften. Beispielprodukt: FLIR A655sc [79]
- 3D-Laserscanner zur Analyse der Maßhaltigkeit (Schwindung und Ausdehnung) des Formteils und des Formeinsatzes nach dem Spritzgießprozess. Beispielprodukte: Atos Compact Scan 2M und Steinbichler Comet L3D [5, 81]
- Dehnungsmessstreifen in Kombination mit Thermoelement zur Steuerung der Formeinsatztemperatur während des Spritzgießens (siehe Abbildung 4.7) [57]

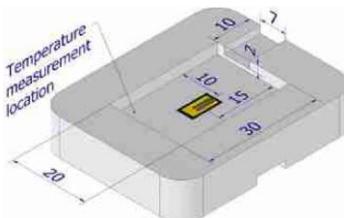


Abbildung 4.7: Anwendung eines Dehnungsmessstreifens auf der Rückseite eines Formeinsatzes [57]

Ein Nachteil der Wärmebildkamera und des 3D-Laserscanners sind die Umgebungs-Parameter (Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und Lichtverhältnis), die vor und

während der Messungen konstant gehalten werden sollten. Der größte Nachteil der alternativen Untersuchungsmethoden ist die physische Fertigung des Formeinsatzes und des Formteils, was bei einer Simulation nicht benötigt wird. [81]

## 4.2 Strukturmechanische Simulation

Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass trotz fehlender Informationen über die Formeinsatzmaterialien, die strukturmechanische Simulation ausreichend genaue Informationen über Verformungen, Kräfte und innere Spannungen simuliert. Dementsprechend sollten diese Simulationssoftwares, z. B. Moldex3D oder Algor, auch für das Spritzgießen in Polymer-Formeinsätzen eingesetzt werden. [49, 78] Abbildung 4.8 zeigt Belastungsversuche eines Formteils und eines Polymer-Formeinsatzes und dient als Beispieldarstellung der strukturmechanischen Simulation.

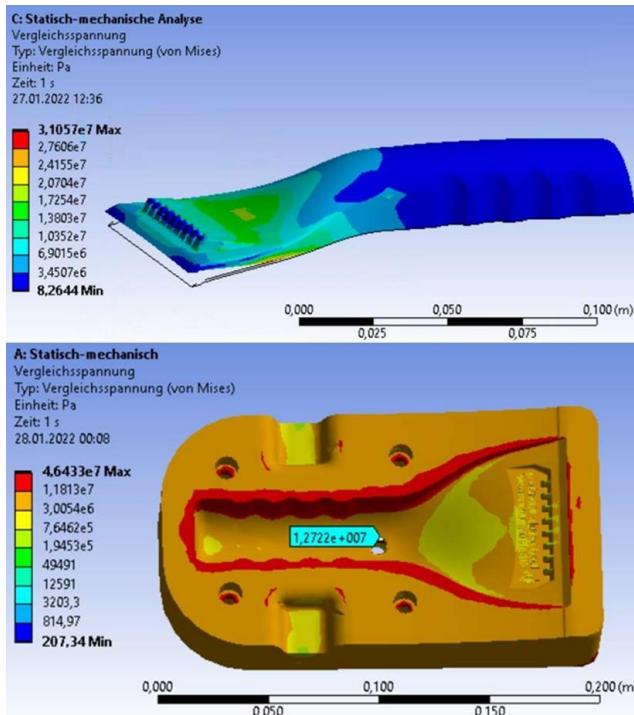


Abbildung 4.8: Belastungsversuche auf ein Formteil und dessen Formeinsatzhälfte [62]

- **WIP:** Aktuell sind keine weiteren Forschungsarbeiten bekannt, welche die strukturmechanische Simulation in Polymer-Formeinsätzen untersuchen.

## 5. Bestimmung der Prozessparameter

### 5.1 Fehlerkategorisierung

Tabelle 5-1: Fehleranalyse während: Additive Fertigung (1); Spritzgießen (2; 3; 4)

Fehleranalyse beim Additive Tooling von Formeinsätzen			
Fehlerkategorie	Fehlerart	Fehlerbereiche	Mögliche Fehlerursachen
1	Druckfehler bei SLA, PolyJet oder DLP	Systematischer Fehler (z. B. schlechte Oberflächengüte)	Gesamter Formeinsatz inkl. Kavitätsoberfläche
		Zufällige Fehler (z. B. Verzug/Maßabweichung)	Vibrationen; Luftfeuchtigkeit; Temperaturschwankungen; Destabilisierung der UV-Strahlung; Raumtemperatur
2	Oberflächenfehler der Kavität (beim Spritzgießen)	Oberflächenverschlechterung	Kavitätsoberfläche (besonders im Anschnittbereich)
		Oberflächenverbrennung	Anschnittbereich; an Engstellen und am Ende des Fließweges
	Abriss der Kavität (beim Spritzgießen)	Abriss	Anschnittbereich; in der Nähe von geometrischen Strukturen
3	Versagen von geometrischen Strukturen der Kavität (beim Spritzgießen)	Scherversagen	Dünne Wände und Kanäle; Strukturen mit hohem Aspektverhältnis
		Biegeversagen	Strukturen mit hohem Aspektverhältnis
		Kantenversagen	Kanten und Ecken im Anschnittbereich
4	Spritzgießfehler am Formteil	Gratbildung	Trennebene der beiden Formeinsatzhälften; Auswerferstifte
		Oberflächenverschlechterung	Gesamte Formteiloberfläche
4	Versagen des Formeinsatzes (beim Spritzgießen)	Bruch des Formeinsatzes	Kompletter Formeinsatz
			Hoher Einspritzdruck; hohe Schließkraft; unzureichende Kühlung; horizontale Verschiebung durch Trennebene

## 5.2 Polymerisationsverfahren

Die additive Fertigung des Formeinsatzes folgt einem konstanten Prozessablauf, welcher in Abbildung 5.1 anhand eines Beispiel-Formeinsatzes abgebildet ist. [20] Entscheidend sind die Schritte Pre-Processing, Polymerisation und Post-Processing. Um möglichst gute Fertigungsergebnisse zu erzielen, sollten folgende Prozessparameter bestimmt und optimiert werden:

- **Schichtdicke** → Druckmodus, z. B. high speed, high quality oder digital material
- **Planare XY-Auflösung** → Durchmesser Laserpunkt (SLA) bzw. Druckkopf (PolyJet) oder Projektionsfläche (DLP)
- **Oberflächengüte** → Art der Oberflächenbeschaffenheit, z. B. matte oder glossy
- **Stützmaterial** → Optionen zur verwendeten Menge, z. B. lite, standard oder heavy
- **Orientierung auf der Bauplattform** → Ausrichtung des Druckkörpers, i. d. R. 0°, 90°, 180° oder 270°
- **Post-Processing** → Art der Nachbearbeitung, z. B. Schleifen, UV-Nachhärtung oder Bohren [9, 20]



Abbildung 5.1: Auszug aus dem strukturierten Vorgehen mit Fokus auf Polymerisation

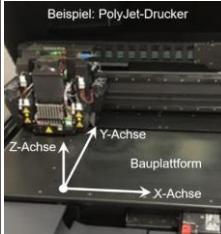
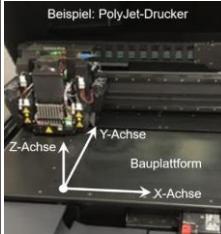
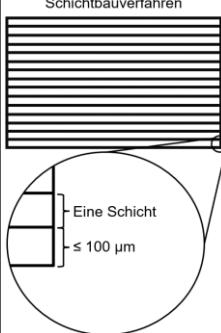
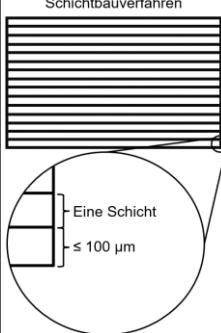
Quelle: In Anlehnung an [20]

Durch die richtige Einstellung der Prozessparameter lassen sich einige mechanische und thermische Eigenschaften des Formeinsatzes beeinflussen. Folgende Zielzustände der Eigenschaften sollten dabei im Fokus stehen:

- Oberflächenrauheit → Ziel: Individueller Anwendungsfall
- Maßabweichung (Breite/Länge) → Ziel: Minimierung
- Maßabweichung (Höhe) → Ziel: Minimierung
- Festigkeit (inkl. bei höheren Temperaturen) → Ziel: Maximierung
- Oberflächenhärte (Shore-Härte) → Ziel: Maximierung [9]

Durch die Optimierung dieser Eigenschaften werden die beiden Hauptziele, die Verlängerung der Standzeit und ein möglichst genaues negatives Abbild des Formteils, unterstützt. Die folgenden Tabellen erläutern die wichtigsten Konstruktionsrichtlinien und deren positive Effekte für die additive Fertigung von Polymer-Formeinsätzen und unterstützen den Konstrukteur bei der Bestimmung und Optimierung der Prozessparameter.

Tabelle 5-2: Konstruktionsrichtlinien bezogen auf die Druckgenauigkeit

Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung von Formeinsätzen			
Allgemein	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
Maßabweichung	<p>Die Druckgenauigkeit ist abhängig vom eingesetzten Polymerisationsverfahren bzw. vom eingesetzten Drucker und dessen Performance-Daten. Entscheidend sind dabei die erzielbare Schichtdicke, die erzielbare XY-Auflösung und das verwendete Druckmaterial. Aus diesen drei Faktoren resultiert die Druckgenauigkeit.</p> <p><b>Konstruktionsrichtlinien</b></p> <p>Neuste Drucker generieren immer noch Maßabweichungen, weshalb die originalen Abmessungen des CAD-Modells angepasst werden sollten, um die gewünschte Formteilegröße zu erlangen. Die Maßabweichungen in der Z-Achse können durch die Schichtdicke ermittelt werden, da der Drucker keine halben Schichten drucken kann. Die Maßabweichungen in der X/Y-Achse lassen sich nicht exakt bestimmen. Sie sollten experimentell ermittelt werden. [2]</p> <p><b>Beispiel: PolyJet-Drucker</b></p> 	<p><b>Darstellung</b></p> <p>Beispiel: PolyJet-Drucker</p> 	<p>1. Geringere Maßabweichungen der Kavität bzw. des Formeinsatzes</p> <p>2. Genaueres Abbild des geforderten Formteils durch die Kavität</p>
	<p>Wenn der Drucker die Druckoption "glossy" besitzt (glänzende Oberfläche) und das Formteil keine matte Oberfläche benötigt, sollte diese eingestellt werden. [2, 10, 19]</p> <p><b>Achtung:</b> Diese Einstellung führt zu früherem Verkleben von Features bei kleiner werdenden Spaltmaßen. [2]</p>	<p>glossy</p> <p>matte</p> <p><b>Schematische Darstellung</b></p> 	<p>1. Geringere Maßabweichungen der Kavität bzw. des Formeinsatzes</p> <p>2. Geringere Notwendigkeit von mechanischem Post-Processing</p> <p>3. Kein Abplatzen einzelner Schichten beim Schleifen/Polieren</p> <p>4. Bessere Oberflächenrauheit</p> <p>5. Besseres Füllverhalten in der Einspritzphase inkl. Verringerung der Gratbildung</p> <p>6. Geringere Oberflächenhaftung zwischen Kavität und Formteil</p> <p>7. Geringerer Treppenstufen-Effekt des Schichtbauverfahrens</p>
Schichtdicke & Punktgröße	<p>Die Schichtdicke sollte weniger als 100 µm betragen, wobei das beste Druckergebnis mit der kleinsten möglichen Schichtdicke erzielt wird (aktuell 25 µm bei SLA bzw. DLP und 14 µm bei PolyJet). [3, 4, 58, 83]</p> <p><b>Achtung:</b> Eine geringere Schichtdicke führt zu einer längeren Druckzeit.</p>	<p><b>Schichtbauverfahren</b></p> 	<p>1. Geringere Maßabweichungen der Kavität bzw. des Formeinsatzes</p> <p>2. Geringere Notwendigkeit von mechanischem Post-Processing</p> <p>3. Kein Abplatzen einzelner Schichten beim Schleifen/Polieren</p> <p>4. Bessere Oberflächenrauheit</p> <p>5. Besseres Füllverhalten in der Einspritzphase inkl. Verringerung der Gratbildung</p> <p>6. Geringere Oberflächenhaftung zwischen Kavität und Formteil</p> <p>7. Geringerer Treppenstufen-Effekt des Schichtbauverfahrens</p>

<b>1. Druckgenauigkeit</b> <b>Schichtdicke &amp; Punktkröße</b>	<p>Folgendes Beispiel veranschaulicht den Effekt unterschiedlicher Schichtstärken anhand einer gekrümmten Oberfläche. [66]</p> <p>Darstellung:</p>		
	<p>Gekrümmte oder schräge Oberflächen sollten entweder mit einer entsprechenden Druckgenauigkeit gedruckt oder anschließend nachbearbeitet werden, da diese besonders anfällig für Treppenstufeneffekte sind. [66, 83]</p>		<p>1. Geringerer Treppenstufeneffekt des Schichtbauverfahrens 2. Höhere Qualität von gekrümmten oder schrägen Oberflächen</p>
	<p>Kavitäten sollten nicht kleiner als 100 <math>\mu\text{m}</math> gedruckt werden (bezogen auf Breite, Länge oder Höhe des Hohrraums). Wenn Formteile in dieser Größenordnung benötigt werden, sollten die minimalen Druckeinstellungen aktuell verfügbarer Drucker eingestellt werden. [20]</p>		<p>1. Vollständiges Definieren des Formteils beim Spritzgießen trotz geringer Abmaße</p>

Tabelle 5-3: Konstruktionsrichtlinien bezogen auf die Ausrichtung des Druckkörpers

Allgemein	Die Ausrichtung des Druckkörpers bezieht sich auf die Positionierung auf der Bauplatform während der Polymerisation. Die X- und Y-Achse definieren die Länge und Breite und die Z-Achse definiert die Höhe des Bauraums.		
Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte	
2. Ausrichtung Druckkörper	Der Formeinsatz sollte auf der Bauplatform so platziert werden, dass die Kavität nach oben zeigt bzw. möglichst wenig Überhänge beim Druckvorgang entstehen. [3, 4, 10]		1. Wenig bis kein Stützmaterial beim Druckvorgang 2. Bessere Oberflächenrauheit, da wenig bis keine Eindruckstellen des Stützmaterials entstehen 3. Geringerer Materialverbrauch und kürzere Druckzeit
	<p>Die Drucklinien sollten in die gleiche Richtung zeigen wie der primäre Schmelzeffuss in der Kavität. Dazu ist der Formeinsatz auf der Bauplatform entsprechend auszurichten. Häufig entspricht dies der längsten Seite der Kavität, die parallel zur Druckrichtung (X-Achse) ausgerichtet sein sollte. [24, 34, 71]</p>	1. Besseres Füllverhalten in der Einspritzphase 2. Weniger Verklebungen der Schmelze 3. Geringere Einspritzdrücke unter gleichen Bedingungen sind möglich 4. Bessere Qualität der Aushärtung des Druckmaterials	
	<p>Wenn ein kleines Spaltmaß zwischen zwei Features erforderlich ist, sollte der Spalt in Druckrichtung ausgerichtet sein (X-Achse). [2]</p>	1. Erzeugung kleiner Spaltmaße ohne Verklebung der gegenüberliegenden Wände	
Messung	<p>Die Oberflächenrauheit der Kavität ist grundsätzlich parallel zur Druckrichtung geringer als orthogonal zur Druckrichtung. Dies sollte dem Konstrukteur bewusst sein, wenn er Oberflächenmessungen an der Kavität durchführt. [60]</p> <p><b>Achtung:</b> Oberflächenkrümmungen können dieses Phänomen jedoch beeinflussen. [60]</p>	1. Genauere Messergebnisse, die näher am realen Wert liegen	

Tabelle 5-4: Konstruktionsrichtlinien bezogen auf das Stützmaterial

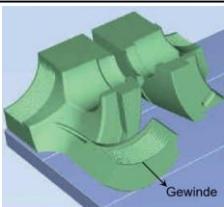
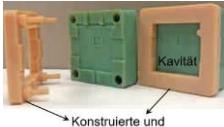
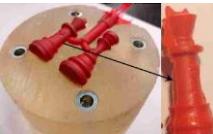
	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
3. Stützmaterial	<p>Allgemein</p> <p>Stützmaterial ist vor allem im direkten Kontakt mit der Kavitätsoberfläche zu vermeiden.</p> <p>Ist dies nicht möglich, kann die Kavität bzw. der Formeinsatz in mehrere Teile getrennt mit der jeweils passenden Ausrichtung auf der Bauplatzform gedruckt werden. Anschließend kann der Formeinsatz durch Steckverbindungen zusammengebaut werden. Anwendung z. B. bei Hinterschnedlungen oder Gewinden. [2, 19, 24, 30]</p> 		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wenig bis kein Stützmaterial beim Druckvorgang</li> <li>2. Bessere Oberflächenrauheit, da wenig bis keine Eindruckstellen des Stützmaterials entstehen</li> <li>3. Geringerer Materialverbrauch und kürzere Druckzeit</li> </ol>
	<p>Allgemein</p> <p>Hilfskonstruktionen können eingesetzt werden, wenn möglichst kleine Spaltmaße zwischen Features realisiert werden sollen (vor allem bei Druckoption "glossy").</p> <p>Beispiel: Kleine Dächer über den entsprechenden Spalten konstruieren, die durch Stützmaterial gestützt werden, welches sich in den Spalten befindet. Sowohl auf X-Achse als auch auf Y-Achse anwendbar. [2]</p>		<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erzeugung kleiner Spaltmaße ohne Verklebung der gegenüberliegenden Wände durch das vorhandene Stützmaterial</li> </ol>

Tabelle 5-5: Konstruktionsrichtlinien bezogen auf das Post-Processing

	Konstruktionsrichtlinien	Darstellung	Positive Effekte
4. Post-Processing	<p>Allgemein</p> <p>Beim mechanischen Post-Processing (Schleifen, Polieren, Sandstrahlen, Bohren und Reiben) handelt es sich um materialabtragende Nachbearbeitungen, die hauptsächlich auf eine bessere Oberflächenqualität der Kavität bzw. des Formeinsatzes abzielen. Beim thermischen Post-Processing (UV-/thermische Nachhärtung) handelt es sich um materialverändernde Nachbearbeitungen, die hauptsächlich auf eine positive Veränderung der mechanischen und thermischen Eigenschaften des Formeinsatzmaterials abzielen. Es unterscheidet sich nach Polymerisationsverfahren und entsprechende Hersteller. Entscheidende Faktoren für die erzielbaren Ergebnisse sind Dauer der Nachhärtung, eingestellte Temperatur, Intensität der UV-Strahlung und verwendetes Material. [3, 4, 8, 10, 29, 84]</p>		
	<p>Mechanisches Post-Processing</p> <p>Bei hohem Detailierungsgrad des Formteils sollten die Kavitätsoberflächen durch Schleifen, Bohren, Polieren und Reiben nachbearbeitet werden. Dazu ist ein Aufmaß in der Konstruktion notwendig.</p> <p>Beim Einsatz von Schleifen kann sowohl Nassschleifen als auch Trockenschleifen eingesetzt werden, wobei Nassschleifen aufgrund der geringeren Staubentwicklung empfohlen wird. Dabei sollte zunächst mit einer Körnung von 180 - 220 und anschließend mit einer Körnung von 400 gearbeitet werden. Beim Einsatz von Polieren sollten wasserbasierte Mittel, z. B. Wright's Silver Cream, verwendet werden.</p> <p>Ansonsten generieren Polymerisationsverfahren grundsätzlich ausreichende Oberflächenbeschaffenheiten in der Kavität. [3, 10, 53]</p> 	<p>Sandstrahlen ist eine Alternative zur Nachbearbeitung durch Schleifen und Polieren der Kavitätsoberfläche. Bereiche die nicht geschliffen werden sollen, können mit einem Klebeband oder einer selbst entworfenen Schablone abgedeckt werden. [10]</p> 	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Geringere Maßabweichungen der Kavität</li> <li>2. Bessere Oberflächenrauheit</li> <li>3. Besseres Füllverhalten in der Einspritzphase</li> <li>4. Geringere Oberflächenhaftung zwischen Kavität und Formteil</li> <li>5. Vermeidung der Druckstreifen</li> </ol>

4. Post-Processing	Mechanisches Post-Processing	<p>Bei Verwendung einer MUD-Box sollte der Formeinsatz nach dem Drucken durch Schleifen auf die passende Größe gebracht werden. Dies betrifft alle Seiten des Formeinsatzes. [64]</p> <p>Falls keine vollständige Schließung der Formeinsatzhälften erreicht werden kann, sollte die Trennebene nachgeschliffen oder nachpoliert werden. [4, 24]</p>	<p><b>Siehe Kapitel 3.5 Seite 23.</b></p>  <p>Gratbildung am Formteil aufgrund schlechter Oberflächenqualität der Trennebene</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Geringere Maßabweichungen des Formeinsatzes</li> <li>2. Verringerung der Gratbildung an der Trennebene</li> <li>3. Wenig bis kein Spiel zwischen MUD-Box und Formeinsatz</li> </ol>
	Thermisches Post-Processing	<p>Um möglichst gute mechanische und thermische Eigenschaften des Formeinsatzmaterials zu erzielen, sollte die thermische Nachhärtung oder eine Kombination aus beiden Nachhärtungsarten angewandt werden.</p> <p>Unter idealen Voraussetzungen lassen sich folgende Eigenschaften erhöhen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wärmeformbeständigkeit bis zu 500 %</li> <li>- Zugfestigkeit mehr als 200 %</li> <li>- Biegefestigkeit bis zu 400 %</li> <li>- E-Modul bis zu 350 %</li> </ul> <p>[19, 20, 23, 24]</p> <p><b>Achtung:</b> Dieses Phänomen tritt bei dünnwandigen Profilen verstärkt auf und kann den Formeinsatz unbrauchbar machen. [8]</p>	 <p>Beispielprodukt von Formlabs zur thermischen Nachhärtung</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bessere Aushärtung des Formeinsatzmaterials</li> <li>2. Erhöhung der mechanischen und thermischen Eigenschaften</li> <li>3. Verlängerung der Standzeit des Formeinsatzes</li> </ol>

### 5.3 Spritzgießen

Aufgrund der Eigenschaften der Formeinsatzmaterialien können die Prozessparameter für den Spritzgießvorgang nicht nach konventioneller Methode (Festlegung der höchsten Druckeinstellungen der Spritzgießmaschine und anschließender Optimierung der Parameter) bestimmt werden. [6] Dementsprechend sollten für Polymer-Formeinsätze geringere Parameter eingestellt werden. [29, 30] Die wichtigsten einzustellenden Parameter sind:

- Formeinsatztemperatur
- Einspritzdruck
- Einspritzgeschwindigkeit
- Nachdruck
- Kühlzeit [6; 66; 82]

Es muss beachtet werden, dass es aktuell keine einheitlichen Tabellen oder Prozessabläufe zur Parameterbestimmung gibt, da diese in den meisten Fällen anwendungsspezifisch sind (Material, Formteilgröße, Design etc.) und noch zu wenig erforscht ist. Um die richtigen Parameter einzustellen sollte der Konstrukteur vorab zusätzliche Zeit in Form von Spritzgießversuchen einplanen. [5]

Im Folgenden wird eine Methode zur Bestimmung der Obergrenzen der Spritzgießparameter beschrieben, welche diese Wissenslücke schließen kann, jedoch keine universelle Lösung darstellt. Die Parameterbestimmung wird in folgende fünf Hauptschritte unterteilt, die sich an den wichtigsten einzustellenden Parametern orientieren. 

- 1. Bestimmung der Formeinsatztemperatur**
- 2. Bestimmung des Einspritzdrucks**
- 3. Festlegung der Einspritzgeschwindigkeit**
- 4. Bestimmung des Nachdrucks**
- 5. Bestimmung der Kühlzeit [6]**

Grundlage dieser Methode bilden die Ergebnisse aus der rheologischen Simulation. Das genaue Vorgehen zur Parameterbestimmung wird in Abbildung 5.2 beschrieben.

Anmerkung: Bei Unklarheiten kann die beschriebene Methode in der wissenschaftliche Publikation *A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts* [6] nachgeschlagen werden.

### Zusatzinformationen:

- Zur Schließkraftbestimmung kann das Standardverfahren (Einspritzdruck \* projizierte Fläche des Formteils oder Gesamtoberfläche des Formeinsatzes \* vom Hersteller vorgeschlagener Schließfaktor) benutzt werden. Der errechnete Wert sollte mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 10 % ausgelegt werden. Wird der Formeinsatz nicht wie vorgesehen komprimiert, sollte die Schließkraft oder die Dicke des Formeinsatzes angepasst werden [10]
- Kommt es bereits während der Einspritzphase zum Formeinsatzversagen, kann die Einspritztemperatur als Ursache ausgeschlossen werden, da diese erst in der Nachdruck- und Abkühlphase einen negativen Einfluss hat [48]
- Wenn das Formteil mittels Gas-/Wasserinjektionsverfahren hergestellt werden kann, sollte dies auch bei Polymer-Formeinsätzen eingesetzt werden, da dadurch die Standzeit verlängert, das Teilegewicht eingespart und die Kühlzeit verkürzt werden können [47]

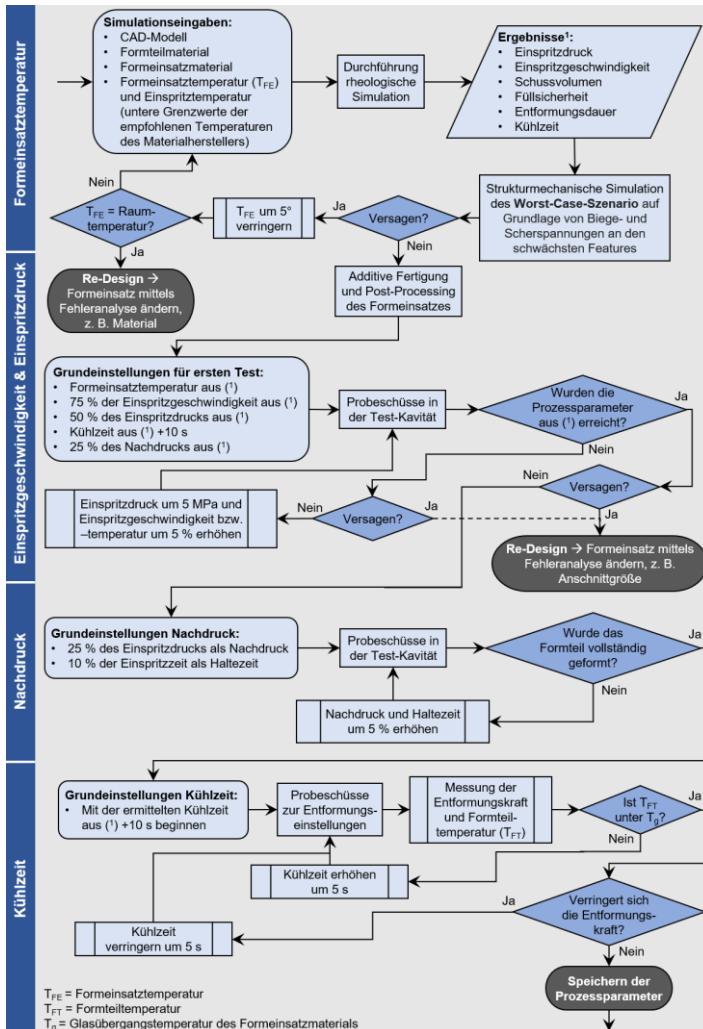


Abbildung 5.2: Prozessablauf zur Bestimmung der Obergrenzen der Spritzgießparameter

Quelle: In Anlehnung an [6, 7, 10]

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Bagalkot, A.; Pons, D.; Symons, D.; Clucas, D. (2021): *Analysis of Raised Feature Failures on 3D Printed Injection Moulds*. In: Polymers, Nr. 10, S. 1–28.
- [2] Kaulig, J. (2021): *Entwicklung und 3D-Druck von Multi- Material-Formeinsätzen für den Spritzguss* [Bachelorarbeit]. An: Hochschule Offenburg.
- [3] Somos (2021): *Injection Molding using Rapid Tooling* [Graue Literatur]. Verfügbar unter: [https://am.covestro.com/content/dam/dsm/additive-manufakturing/en\\_US/documents/covestro/am-somos-rapid-tooling-guide.pdf](https://am.covestro.com/content/dam/dsm/additive-manufakturing/en_US/documents/covestro/am-somos-rapid-tooling-guide.pdf).
- [4] Formlabs (2020): *Low-Volume Rapid Injection Molding With 3D Printed Molds* [Graue Literatur]. Verfügbar unter: <https://i.hubspotusercontent20.net/hubfs/71962-78/Formlabs%20injection%20molding/Low%20volume%20rapid%20injection%20m.pdf>.
- [5] Schuh, G.; Bergweiler, G.; Lukas, G.; Abrams, J. A. (2020): *Feasibility and Process capability of polymer additive injection molds with slide technology*. In: Procedia CIRP, S. 102–107.
- [6] Bagalkot, A.; Pons, D.; Clucas, D.; Symons, D. (2019): *A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts*. In: Rapid Prototyping Journal, Nr. 9, S. 1493–1505.
- [7] Bagalkot, A.; Pons, D.; Symons, D.; Clucas, D. (2019): *Categorization of Failures in Polymer Rapid Tools Used for Injection Molding*. In: Processes, Nr. 1, S. 1–19.
- [8] Harris, R. (2018): *Injection Molding Applications*. In: Proceedings of the 18th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, S. 243–255.
- [9] Kampker, A.; Kreiskötter, K.; Reinders, C. (2017): *Material And Parameter Analysis Of The Polyjet Process For Mold Making Using Design Of Experiments*. In: International Journal of Materials and Metallurgical Engineering, Nr. 3, S. 242–249.
- [10] Stratasys (2016): *PolyJet For Injection Molding - Technical Application Guide* [Graue Literatur]. Verfügbar unter: [https://www.alphacam.ch/fileadmin/user\\_upload/Applikationen/PDFs/Technical\\_Application\\_Guide\\_-\\_Injection\\_Molding\\_-\\_PolyJet\\_For\\_Injection\\_Molding\\_-\\_English\\_A4\\_Web.pdf](https://www.alphacam.ch/fileadmin/user_upload/Applikationen/PDFs/Technical_Application_Guide_-_Injection_Molding_-_PolyJet_For_Injection_Molding_-_English_A4_Web.pdf).
- [11] Lachmayer, R.; Reitschlag, K.; Kaierle, S. (2021): *Konstruktion für die Additive Fertigung 2020*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [12] Hopmann, C.; Menges, G.; Michaeli, W.; Mohren, P. (2018): *Spritzgießwerkzeuge - Auslegung, Bau, Anwendung* (7., neu bearbeitete Auflage). München: Hanser.
- [13] Riemann, J. (2020): *Was ist Additive Fertigung? Definitionen, Anwendungen & Potenziale* [Online-Quelle]. Industry of Things. Verfügbar unter: <https://www.industry-of-things.de/was-ist-additive-fertigung-definitionen-anwendungen-potenziale-a-1068381/> (Zugriff am 02.03.2022).
- [14] Gebhardt, A. (2016): *Additive Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion* (5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). München: Hanser.
- [15] Gebhardt, A.; Kessler, J.; Schwarz, A. (2019): *Produktgestaltung für die additive Fertigung*. München: Hanser.
- [16] Anderl, R. (2014): *Additive Manufacturing oder generative Fertigungsverfahren – vom Prototypen zur Massenfertigung?* [Präsentation]. An: Technische Universität Darmstadt.

- [17] Bikas, H.; Stavropoulos, P.; Chryssolouris, G. (2016): *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Nr. 1-4, S. 389–405.
- [18] Pfeifer, P. (2018): *Additive Fertigung von Aktoren zur Schwingungs-beeinflussung* [Studienarbeit]. An: Technische Universität Darmstadt.
- [19] Godec, D.; Breški, T.; Katalenić, M. (2020): *Additive Manufacturing of Polymer Moulds for Small-Batch Injection Moulding*. In: Tehnički glasnik, Nr. 2, S. 218–223.
- [20] Surace, R.; Basile, V.; Bellantone, V.; Modica, F.; Fassi, I. (2021): *Micro Injection Molding of Thin Cavities Using Stereolithography for Mold Fabrication*. In: Polymers, Nr. 11, S. 1–18.
- [21] Dempsey, D.; McDonald, S.; Masato, D.; Barry, C. (2020): *Characterization of Stereolithography Printed Soft Tooling for Micro Injection Molding*. In: Micromachines, Nr. 9, S. 1–20.
- [22] Ospina, M.; Osswald, T. (2020): *Comparison of additive and conventional tooling on injection molded part properties*, S. 1–7.
- [23] Knorr, L.; Setter, R.; Rietzel, D.; Wudy, K.; Osswald, T. (2020): *Comparative Analysis of the Impact of Additively Manufactured Polymer Tools on the Fiber Configuration of Injection Molded Long-Fiber-Reinforced Thermoplastics*. In: Journal of Composites Science, Nr. 3, S. 1–32.
- [24] Whlean, C.; Sheahan, C. (2019): *Using Additive Manufacturing to Produce Injection Moulds Suitable for Short Series Production*. In: Procedia Manufacturing, S. 60–68.
- [25] Zong, X.; Ruan, J.; Liu, H.; Sun, W.; Liu, Y. (2019): *Rapid injection moulding process of polyether ether ketone based on stereolithography*. In: SN Applied Sciences, Nr. 11, S. 1–7.
- [26] Jensen, S.; Bertelsen, J.-G. (2019): *3D printed mould inserts by DLP*. In: DTU Mechanical Engineering.
- [27] Formlabs (2021): *Moldmaking With 3D Prints: Six Techniques for Prototyping and Production* [Graue Literatur]. Verfügbar unter: <https://media.formlabs.com/m/220945e10b28b3ad/original/-ENUS-P-Moldmaking-with-3D-Prints.pdf>.
- [28] Media, R. Ihsan; Ilyas, I. P. (2019): *Process simulation based on 3D printed vero-clear to produce injection mold inserts*. In: THE 4TH BIOMEDICAL ENGINEERING'S RECENT PROGRESS IN BIOMATERIALS, DRUGS DEVELOPMENT, HEALTH, AND MEDICAL DEVICES: Proceedings of the International Symposium of Biomedical Engineering (ISBE) 2019, S. 1–9.
- [29] Nelson, J. W.; LaValle, J. J.; Kautzman, B. D.; Dworshak, J. K.; Johnson, E. M.; Ulven, C. A. (2017): *Injection Molding with an Additive Manufacturing Tool*. In: Plastics Engineering, Nr. 7, S. 60–66.
- [30] Stratasys (2015): *Choosing the Right Material for Injection Molds - AN EVALUATION OF VARIOUS 3D PRINTING TECHNIQUES* [Graue Literatur].
- [31] Chang, F.-W. (2020): *Verfahrensvergleich zwischen additiver und konventioneller Fertigung von Spritzgussformteileinsätzen - Technische und wirtschaftliche Bewertung des Additive Tooling* [Masterarbeit]. An: Hochschule Offenburg.
- [32] Kampker, A.; Alves, B.; Ayvaz, P. (2020): *Technological and Economic Comparison of Additive Manufacturing Technologies for Fabrication of Polymer Tools for Injection Molding*. In: Progress in Digital and Physical Manufacturing, S. 28–39.

- [33] Kaltenbach, E. (2021): *Wirtschaftliche Analyse von additiv und konventionell hergestellten Spritzgießwerkzeugen - im Kontext der Produktentwicklung* [Bachelorarbeit]. An: Hochschule Offenburg.
- [34] Stephen, M. (2021): *LET'S TALK ABOUT PLASTIC MOLDS*. In: Canadian Plastics, S. 10–14.
- [35] Harris, R. A.; Fouchal, F.; Hague, R.; Dickens, P. M. (2004): *Quantifying part irregularities and subsequent morphology manipulation in stereolithography plastic injection moulding*. In: Plastics, Rubber and Composites, Nr. 2-3, S. 92–98.
- [36] Harris, R. A.; Hague, R.; Dickens, P. M. (2004): *The structure of parts produced by stereolithography injection mould tools and the effect on part shrinkage*. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Nr. 1, S. 59–64.
- [37] Harris, R.; Newlyn, H.; Hague, R.; Dickens, P. (2003): *Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling*. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Nr. 9, S. 879–887.
- [38] Jaroschek, C. (2018): *Spritzgussteile konstruieren für Praktiker* ([1. Auflage]). München: Hanser.
- [39] Stratasys (2020): *Reduce Injection Molding Cost and Lead Time with PolyJet 3D Printing* [Graue Literatur].
- [40] León-Cabezas, M. A.; Martínez-García, A.; Varela-Gandía, F. J. (2017): *Innovative advances in additive manufactured moulds for short plastic injection series*. In: Procedia Manufacturing, S. 732–737.
- [41] Hofstätter, T.; Mischkot, M.; Pedersen, D. Bue; Tosello, G.; Hansen, H. Nørgaard (2016): *Evolution of Surface Texture and Cracks During Injection Molding of Fiber-Reinforced, Additively-Manufactured, Injection Molding Inserts*. In: Proceedings of ASPE Summer Topical Meeting.
- [42] An, C.-C.; Chen, R.-H. (2008): *The experimental study on the defects occurrence of SL mold in injection molding*. In: Journal of Materials Processing Technology, Nr. 1-3, S. 706–709.
- [43] LANXESS Corporation (2007): *Part and Mold Design - A Design Guide*. Verfügbar unter: [https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Part\\_and\\_Mold\\_Design\\_Guide.pdf?docId=77015](https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/Part_and_Mold_Design_Guide.pdf?docId=77015).
- [44] Lachmayer, R.; Lippert, R. Bastian (2020): *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [45] Rees, H. (2021): *Injection mold design handbook*. Munich: Hanser Publishers.
- [46] Whatcott, T. (2020): *Effects of Conformal Cooling Channels on Additively Manufactured Injection Molding Tooling* [Masterarbeit]. An: Brigham Young University.
- [47] Nambiar, R. V.; Lee, K. H.; Nagarajan, D. (2007): *Stereolithography mold life extension using gas-assisted injection*. In: Rapid Prototyping Journal, Nr. 2, S. 92–98.
- [48] Rahmati, S.; Dickens, P. (2007): *Rapid tooling analysis of Stereolithography injection mould tooling*. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, Nr. 5, S. 740–747.
- [49] Stratasys (2017): *Demonstration of an Effective Design Validation Tool for 3D Printed Injection Molds (3DPIM)* [Graue Literatur].
- [50] Bogaerts, L.; Faes, M.; Bergen, J.; Cloots, J.; Vasiliauskaitė, E.; Vogeler, F.; Moens, D. (2021): *Influence of thermo-mechanical loads on the lifetime of plastic inserts for injection moulds produced via additive manufacturing*. In: Procedia CIRP, S. 1–13.

- [51] Derrick, S. (2013): *Use of Polymer Rapid Tools as Functional Injection Mold Tooling* [Masterarbeit]. An: Western Michigan University.
- [52] Saman, A. Mohd; Abdullah, A. Halim; Nor, M. Asri Mohd (2009): *Computer Simulation Opportunity In Plastic Injection Mold Development for Automotive Part*. In: 2009 International Conference on Computer Technology and Development, S. 495–498.
- [53] Mendible, G. Antonio; Rulander, J. A.; Johnston, S. P. (2017): *Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding*. In: Rapid Prototyping Journal, Nr. 2, S. 344–352.
- [54] Aluru, R.; Keefe, M.; Advani, S. (2001): *Simulation of injection molding into rapid-prototyped molds*. In: Rapid Prototyping Journal, Nr. 1, S. 42–51.
- [55] Harris, R. A.; Hague, R. J. M.; Dickens, P. M. (2004): *Thermal conditions in stereolithography injection mould tooling and their use for polyether-ether-ketone moulding*. In: International Journal of Production Research, Nr. 1, S. 1–17.
- [56] Ottemer, X.; Colton, J. S. (2002): *Effects of aging on epoxy-based rapid tooling materials*. In: Rapid Prototyping Journal, Nr. 4, S. 256–263.
- [57] Krizsma, S.; Kovács, N. K.; Kovács, J. G.; Suplicz, A. (2021): *In-situ monitoring of deformation in rapid prototyped injection molds*. In: Additive Manufacturing, S. 1–8.
- [58] Hopkins, M.; Gunbay, S.; Hayes, C.; Moritz, V. F.; Fuenmayor, E.; Lyons, J. G.; Devine, D. M. (2021): *Stereolithography (SLA) utilised to print injection mould tooling in order to evaluate thermal and mechanical properties of commercial polypropylene*. In: Procedia Manufacturing, S. 205–212.
- [59] Raz, K.; Chval, Z.; Habrman, M.; Milsimerova, A. (2021): *Thermal specification of 3D printed injection moulds made from PA12GB*. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Nr. 1.
- [60] Kampker, A.; Triebs, J.; Kawollek, S.; Ayvaz, P. (2018): *Direct Polymer Additive Tooling – Verwendung von Polymerwerkzeugen für den Einsatz im Kleinserien Spritzguss*. In: Rapid.Tech + FabCon 3.D - International Trade Show & Conference for Additive Manufacturing, S. 45–62.
- [61] Stratasys (2017): *Precision Prototyping - THE ROLE OF 3D PRINTED MOLDS IN THE INJECTION MOLDING INDUSTRY* [Graue Literatur].
- [62] Maier, A.; Herr, C.; Hofer, J.; Hug, M.; Groß, P.; Haag, W. (28.01.2022): *Workshop Additive Tooling (WSAT) - Abschlusspräsentation WS 2021/2022* [Präsentation]. An: Hochschule Offenburg.
- [63] Form+Werkzeug: *Spritzgießwerkzeuge - Anordnung der Kavitäten* [Online-Quelle]. Verfügbar unter: <https://www.form-werkzeug.de/a/grundlagenartikel/anordnung-der-kavitaeten-224109> (Zugriff am 25.04.2022).
- [64] Bogaerts, L.; Moens, D.; Vogeler, F.; verspreet, j.; geyskens, k.; Faes, M. (2018): *Breakout analysis of plastic material jetted moulds for injection moulding*, S. 1–6.
- [65] Hopmann, C.; Michaeli, W.; Greifeld, H. Rudolf; Ehrig, F.; Greif, H. (2017): *Technologie des Spritzgießens - Lern- und Arbeitsbuch* (4., aktualisierte Auflage). München: Hanser.
- [66] Kampker, A.; Ayvaz, P. (2020): *Direct Polymer Additive Tooling - Polymerwerkzeuge für das Spritzgießen von Kleinserien*. Verfügbar unter: <https://www.plastverarbeiter.de/76447/> (Zugriff am 10.05.2022).
- [67] Dr. Jorge Rodriguez (2016): *Use of Additive Manufacturing (AM) for Mold Inserts in Injection Molding*. In: American Society for Engineering Education.

- [68] Pruner, H.; Nesch, W. (2020): *Spritzgießwerkzeuge kompakt - Ein Praxisbuch für Einsteiger* (2. Auflage). München: Hanser.
- [69] Proksch, A. (2020): *Additive Tooling für Spritzgießprozesse* [Masterarbeit]. An: Hochschule Offenburg.
- [70] Ahrens, C. H.; Ribeiro Jr, A. S.; Beal, V. E. (2003): *Heat flux canals (HFC) technique: an alternative to cool down stereolithography moulds*. In: Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Nr. 3, S. 254–258.
- [71] Volpato, N.; Solis, D. Marques; Costa, C. Alberto (2016): *An analysis of Digital ABS as a rapid tooling material for polymer injection moulding*. In: International Journal of Materials and Product Technology, Nr. 1/2, S. 3–16.
- [72] Harris, R.; Hopkinson, N.; Newlyn, H.; Hague, R.; Dickens, P. (2002): *Layer thickness and draft angle selection for stereolithography injection mould tooling*. In: International Journal of Production Research, Nr. 3, S. 1–20.
- [73] Hopkinson, N.; Dickens, P. (2000): *A comparison between stereolithography and aluminium injection moulding tooling*. In: Rapid Prototyping Journal, Nr. 4, S. 1–24.
- [74] Colton, J. S.; LeBaut, Y. (2000): *Thermal effects on stereolithography injection mold inserts*. In: Polymer Engineering & Science, Nr. 6, S. 1360–1368.
- [75] Palmer, A. E.; Colton, J. S. (2000): *Failure mechanisms in stereolithography injection molding tooling*. In: Polymer Engineering & Science, Nr. 6, S. 1395–1404.
- [76] Cedorge, T.; Colton, J. (2000): *Draft angle and surface roughness effects on stereolithography molds*. In: Polymer Engineering & Science, Nr. 7, S. 1581–1588.
- [77] Pasquali, F.; Costa, C. Alberto (2014): *Application of rapid tooling and rapid prototyping in low pressure injection molding process of ceramic parts*.
- [78] Attanasio, D. C.; Hopkinson, N.; Kehrberger, R.; Sridhar, A.; Witt, G. (2006): *Application and modelling of hybrid stereolithography injection mould tooling*. In: Virtual and Physical Prototyping, Nr. 3, S. 1–21.
- [79] Mischkot, M.; Hofstätter, T.; Michailidou, I.; Chavarri, C. Herrán; Lunzer, A.; Tosello, G.; Pedersen, D. Bue; Hansen, H. Nørgaard (2018): *Performance Simulation and Verification of Vat Photopolymerization Based, Additively Manufactured Injection Molding Inserts with Micro-Features*. In: Industrializing Additive Manufacturing - Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017, S. 162–168.
- [80] Shinde, P.; Patil, S.; Awati, S. (2017): *Development of Plastic Injection Mold using Simulation Technique Analysis Result*. In: International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET), S. 66–70.
- [81] Kumar, S.; Singh, A. Kumar (2020): *Volumetric shrinkage estimation of benchmark parts developed by rapid tooling mold insert*. In: Sādhanā, Nr. 1, S. 1–9.
- [82] Ramesh Babu, K.; Santhosh, V. (2013): *Design and wrapage analysis of plastic injection mould*. In: National Conference on Challenges in Research & Technology in the Coming Decades (CRT 2013), S. 3.29-3.29.
- [83] Dizon, J. Ryan C.; Valino, A. D.; Souza, L. R.; Espera, A. H.; Chen, Q.; Advincula, R. C. (2019): *Three-dimensional-printed molds and materials for injection molding and rapid tooling applications*. In: MRS Communications, Nr. 4, S. 1267–1283.
- [84] Colton, J.; Blair, B. (1999): *Experimental study of post-build cure of stereolithography polymers for injection molds*. In: Rapid Prototyping Journal, Nr. 2, S. 72–81.

## F5 – Support-Evaluation anhand Fallstudie A

Anhang F5 enthält Ergebnisse und Daten aus Fallstudie A, welche zur Support-Evaluation durchgeführt wurde. Abbildung F5.1 zeigt die von Wolfinger (2022)<sup>3</sup> erstellten Filter-Fidelity-Profile. Die hergestellten AT-Formeinsätze zur Produktion des Besteck-Sets sind in Abbildung F5.2 abgebildet. Tabelle F5.1 enthält die Fertigungsparameter zur Herstellung des Besteck-Sets.

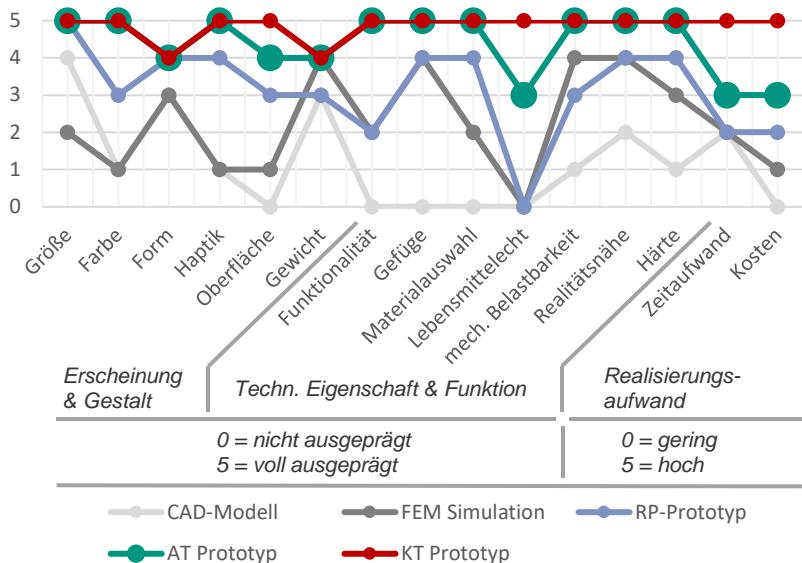


Abbildung F5.1: Filter-Fidelity-Modell mit verschiedenen Profilen für das „Besteck-Set“ (in Anlehnung an Wolfinger, 2022)<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>4</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

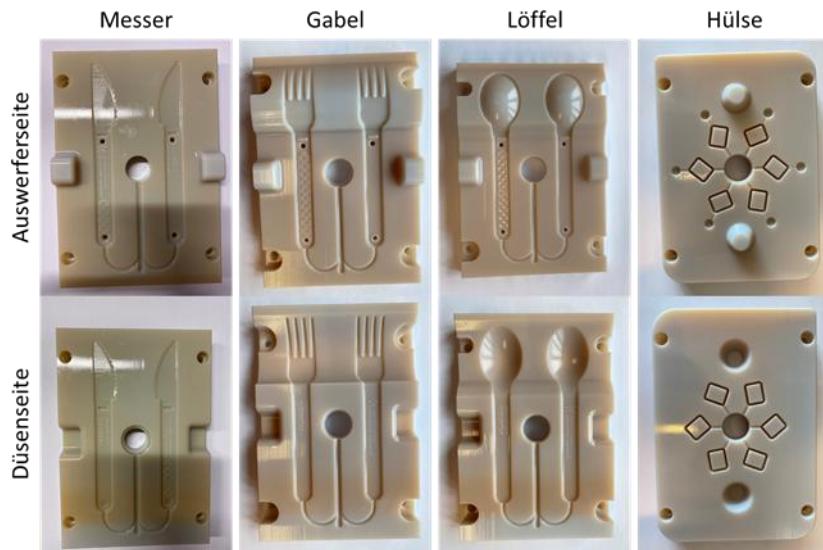


Abbildung F5.2: AT-Formeinsätze zur Herstellung von AT-Prototypen eines Besteck-Sets

Tabelle F5.1: Fertigungsparameter für die Formteile des Besteck-Sets

Formteil:	Messer	Gabel	Löffel	Hülse	
Material <sup>1</sup> :	ABS	ABS	ABS	ABS	HDPE
Zuhaltkraft (kN)	110-120	100	100	190	295
Einspritzdruck (bar)	480-500	490-510	490-535	480	220
Einspritzgeschw. (cm <sup>3</sup> /s)	10-16	16	14-18	14-20	15
Einspritzvolumen (cm <sup>3</sup> )	26	26	30	20	16
Einspritztemp. (°C)	260	260	260	260	200
Einspritzzeit (s)	1,7-2,4	2,13	2,1-3,9	2,1	1,3
Nachdruck (bar)	250	150	150	250	150
Nachdruckzeit (s)	4	3	4,5	2	2,2
Restkühlzeit (s)	180	180	180	150-180	180
Pausenzeit (s) <sup>2</sup>	90	90	90	90	90
Anzahl Formteile	39	28	29	20	19

<sup>1</sup> ABS = ABS Starex HG-0760GP, HDPE = HDPE SABIC® M200056

<sup>2</sup> Druckluftkühlung AT-Formeinsätze bis Werkzeugwandtemperatur <= 40°C

Tabelle F5.2: Zusammengefasste Bewertung der AT-Systematik aus Wolfinger (2022)<sup>5</sup>

<b>1: Für sehr wichtig halte ich die ...</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
1.1: ... Ermittlung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs. (Phase 1)				●
1.2: ... Prüfung, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet. (Phase 2)			●	
1.3: ... Unterstützung in Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge. (Phase 3)				●
1.4: ... Unterstützung in der Anwendung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung. (Phase 4)				●
1.5: ... Auswertung und Beurteilung der Testergebnisse. (Phase 5)				●
1.6: ... Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte. (Phase 6)				●
<b>2: Aussagen zur Bewertung</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
2.1: Die systematische Vorgehensweise hat bei der Realisierung und Nutzung der Validierungsumgebung mit AT-Anwendung geholfen.				●
2.2: Die empfohlene systematische Vorgehensweise hat wesentlich zum Projekterfolg beigetragen.				●
2.3: Die in der Systematik empfohlenen Aktivitäten sind sinnvoll und hilfreich.				●
2.4: Die Systematik ist einfach zu verstehen.				●
2.5: Die Systematik sollte in mehr Phasen gegliedert werden.	●			
2.6: Die Systematik sollte in weniger Phasen gegliedert werden.	●			
<b>3: Die AT-Systematik ...</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
3.1: ... hat ein angemessenes Verhältnis von Aufwand und Nutzen.				●
3.2: ... ist für den Produktentwickler einfach anwendbar.			●	
3.3: ... ist in sinnvolle Arbeitsschritte gegliedert.				●
3.4: ... hat einen angemessenen Detailierungsgrad.				●
3.5: ... lässt sich leicht in bestehende Prozesse der Produktentwicklung integrieren.				●
3.6: ... lässt sich leicht auf unterschiedliche Produkte und Industrien übertragen.				●

0 = stimme nicht zu, 1 = stimme eher nicht zu, 2 = stimme eher zu, 3 = stimme voll zu

<sup>5</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.



# Anhang G – Fallstudien B, C & D

## G1 – Fragebogen 1: Selbsteinschätzung

Ziel dieser Umfrage ist es, Informationen darüber zu sammeln, wie Sie Ihren Kenntnisstand in verschiedenen Bereichen der Produktentwicklung, Konstruktion und Fertigung von Spritzgussprodukten und additiver Fertigung bewerten.

Info: Die Bewertung erfolgt auf einer 7-stufigen Likert-Skala von „*keine (0)*“ Kenntnisse (=am schlechtesten) bis „*ausgezeichnet (6)*“ (=am besten) mit gleichbleibendem Skalenabstand.

Die Befragung hat keinen Einfluss auf die Note im Wahlfach und wird anonymisiert ausgewertet.

### Allgemeine Angaben

1. Bitte tragen Sie hier Ihre anonyme Teilnehmernummer ein, welche Sie zu Beginn des Workshops erhalten haben:

### Kategorie 1: Produktentwicklung

2. Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse im Bereich der Produktentwicklung (PE) ein?

	Keine (0)	Sehr gering (1)	Eher gering (2)	Mittelmäßig (3)	Eher gut (4)	Sehr gut (5)	Ausgezeichnet (6)
Methoden der Produktentwicklung (z.B. integrierte Produktentwicklung, VDI2221, usw.)							
Unterstützende Methoden in der PE (z.B. Nutzwertanalyse, Morphologischer Kasten, usw.)							
Organisation und Dokumentation von PE-Projekten (z.B. Projektpläne, Meilensteine, Arbeitspakete)							
Kostenkalkulation von Projekten und Produkten							
Erfassen von Kundenanforderungen							
Validieren und Verifizieren von Kundenanforderungen bzw. Produkteigenschaften							
Auswahl geeigneter Prototypen bzw. Prototypingtechnologien							

3. Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse im Umgang mit folgenden Methoden und Tools ein?

	Keine (0)	Sehr gering (1)	Eher gering (2)	Mittelmäßig (3)	Eher gut (4)	Sehr gut (5)	Ausgezeichnet (6)
Quality Function Deployment (QFD) – insbesondere das House of Quality (HoQ)							
Filter-Fidelity-Modell (FFM)							
Design-Structure-Matrix (DSM)							
CAD-Software (z.B. Catia, Solidworks, Creo, usw.)							
FEM-Software für Strukturmechanische Simulation (z.B. ANSYS, Abaqus, usw.)							
FEM-Software für Füllstudien von Spritzgussprodukten (z.B. Moldflow, usw.)							

4. Ich habe Fragen oder Anmerkungen zu dieser Kategorie:

**Kategorie 2: Spritzgießen**

5. Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse im Bereich Spritzgießen ein?

	Keine (0)	Sehr gering (1)	Eher gering (2)	Mittelmäßig (3)	Eher gut (4)	Sehr gut (5)	Ausgezeichnet (6)
Grundlegende Funktionsweise der Fertigungstechnologie							
Designregeln für Spritzgussprodukte							
Auslegung von konventionell gefertigten Spritzgießwerkzeugen							
Auslegung von additiv gefertigten Spritzgießwerkzeugen							
Eigenschaften von Kunststoffen (Materialverhalten usw.)							
Auswahl geeigneter Kunststoffe für spezifische Anwendungen							

6. Ich habe Fragen oder Anmerkungen zu dieser Kategorie:

**Kategorie 3: Additive Manufacturing (AM)**

7. Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse im Bereich der additiven Fertigung (Additive Manufacturing (AM)) ein?

	Keine (0)	Sehr gering (1)	Eher gering (2)	Mittelmäßig (3)	Eher gut (4)	Sehr gut (5)	Ausgezeichnet (6)
Grundlegende Funktionsweise der Fertigungstechnologie							
Grundlegende Funktionsweise der PolyJet-Technologie (PJM, auch bekannt als MultiJet-Modeling (MJM))							
Generelle Designregeln für die Additive Fertigung (Design for Additive Manufacturing (DfAM))							
Spezielle Designregeln für die Additive Fertigung von Spritzgusswerkzeugen mittels PolyJet (oder vergleichbaren Verfahren)							
Verfügbare PolyJet-Materialien (oder vergleichbare) und deren Eigenschaften							

8. Ich habe Fragen oder Anmerkungen zu dieser Kategorie:

**Feedback zur Umfrage oder zum Workshop Additive Tooling**

9. Ich habe Fragen oder Anmerkungen zu dieser Umfrage oder allgemeines Feedback zum Workshop Additive Tooling:

## G2 – Fragebogen 2: Bewertung der AT-Systematik

Ziel dieser Umfrage ist die Bewertung der im *Workshop Additive Tooling* eingesetzten *AT-Systematik* und der darin empfohlenen Teilaktivitäten, Methoden und Tools.

Der Fragebogen ist in drei Abschnitte mit insgesamt 15 Fragen gegliedert:

- 1) Einleitung und Bewertung der Systematik
- 2) Bewertung der Methoden und Tools
- 3) Offene Fragen

Hinweis: Die Befragung hat keinen Einfluss auf die Note im Wahlfach und wird anonymisiert ausgewertet.

### Allgemeine Angaben

1. Bitte tragen Sie hier Ihre anonyme Teilnehmernummer ein, welche Sie zu Beginn des Workshops erhalten haben:

### Abschnitt 1: Einleitung und Bewertung der AT-Systematik

Ziel der *AT-Systematik* ist die Unterstützung eines Entwicklungsteams bei der Realisierung und Nutzung einer Additive Tooling (AT) basierten Validierungsumgebung. (Die Validierungsumgebung enthält sämtliche Informationen und Ressourcen zur Erfüllung der Validierungsaufgabe.)

Im folgenden Schaubild sehen Sie die Gliederung der AT-Systematik in sechs generische Phasen mit einer kurzen Beschreibung der jeweiligen Phase. Die Phasen sollen dabei in den übergeordneten Aktivitäten der Produktentwicklung „Validieren & Verifizieren“ und „Prototyp Aufbauen“ durchlaufen werden.

Die *Phasen 1 und 6* können recht *allgemein* auf eine Vielzahl von möglichen Entwicklungsprojekten angewendet werden.

Die *Phasen 2 bis 5* dagegen sind *speziell* auf die Anwendung von Additive Tooling ausgelegt.

Um die Inhalte der einzelnen Phasen besser nachvollziehen zu können, sehen Sie unter den Phasen zusätzlich *konkrete, situationsspezifische Aktivitäten*, welche Sie im Laufe des Workshops größtenteils kennengelernt haben.

**AT-Systematik mit Beschreibung:**

Phase 1: Validierungsziele festlegen	Phase 2: Validierungs- technologie prüfen	Phase 3: Validierungsum- gebung aufbauen	Phase 4: Validierungs- umgebung nutzen	Phase 5: Ergebnisse auswerten	Phase 6: Nachbereiten & Lernen
Es wird ermittelt, welcher Validierungs-/ Verifizierungsbedarf besteht.	Es wird geprüft, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet.	Durchführung von Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge bzw. AT-basierten Validierungsumgebung.	Anwendung der AT-basierten Validierungs-umgebung zur Erfüllung der Validierungsaufgabe.	Die Testergebnisse werden ausgewertet und beurteilt.	Wissen wird aufbereitet und für Folgeprojekte zur Verfügung gestellt. Verbesserung des Validierungsprozesses.

Auswahl geeigneter Methoden, Tools, Leitfäden und Konstruktionsempfehlungen entlang der Prozesskette

**AT-Systematik mit konkreten Aktivitäten:**

Phase 1: Validierungsziele festlegen	Phase 2: Validierungs- technologie prüfen	Phase 3: Validierungsum- gebung aufbauen	Phase 4: Validierungs- umgebung nutzen	Phase 5: Ergebnisse auswerten	Phase 6: Nachbereiten & Lernen
1. Anforderungsprofil erfassen 2. QFD Matrix aufbauen und ergänzen 3. Validierungs- und Verifizierungsziele festlegen 4. Bauteil CAD-Daten erstellen	5. Anforderungen an Prototypen definieren 6. Abgleich mit Verfahrensprofil und Bewertung durch SG & AM-Experten 7. Kostenabschätzung 8. Machbarkeit durch Simulation (FEM & Füllstudie) belegen	9. Werkzeug konstruieren + Optional: Durch strukturmech. Simulation prüfen 11.Pre-Processing & Additive Fertigung 12.Post-Processing & Nacharbeit	13.Werkzeug rüsten & Prozessparameter einstellen 14.Abstimmungsprozess durchführen 15.Qualität der Spritzgussbauteile beurteilen 16.Test durchführen	16.Test auswerten 17.Abgleich mit Validierungs- und Verifizierungszielen	18.Ergebnisse und Prozess final dokumentieren 19.Nachbereiten und Lernen + Optional: Systematik anpassen und optimieren

Auswahl geeigneter Methoden, Tools, Leitfäden und Konstruktionsempfehlungen entlang der Prozesskette

## 2. Umfang der AT-Systematik. Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

	Ich stimme...	voll zu (3)	ehler zu (2)	ehler nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Die Ermittlung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs halte ich für sehr wichtig. (Phase 1)						
Die Prüfung, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet, halte ich für sehr wichtig. (Phase 2)						
Die Unterstützung in Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge bzw. AT-basierten Validierungsumgebung halte ich für sehr wichtig. (Phase 3)						
Die Unterstützung in der Anwendung der AT-basierten Validierungsumgebung zur Erfüllung der Validierungsaufgabe halte ich für sehr wichtig. (Phase 4)						

Die Auswertung und Beurteilung der Testergebnisse halte ich für sehr wichtig. (Phase 5)					
Die Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte halte ich für sehr wichtig. (Phase 6)					

3. Bedarf, Gestaltung und Nutzen der AT-Systematik. Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

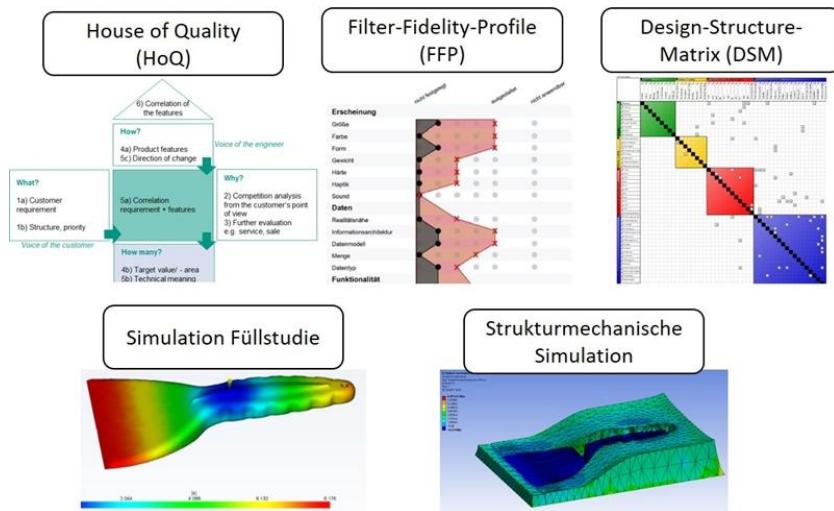
Ich stimme...	voll zu (3)	ehler zu (2)	ehler nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Der Aufbau einer AT-basierten Validierungsumgebung hat mich vor neue Herausforderungen gestellt.					
Ich sehe einen Unterstützungsbedarf im Einsatz AT-basierter Validierungsumgebungen.					
Die empfohlene systematische Vorgehensweise hat bei der Realisierung und Nutzung der Validierungsumgebung geholfen.					
Die empfohlene systematische Vorgehensweise hat wesentlich zum Projekterfolg beigetragen.					
Die Systematik sollte in mehr Phasen gegliedert werden.					
Die Systematik sollte in weniger Phasen gegliedert werden.					
Die Systematik ist einfach zu verstehen.					
Die in der Systematik empfohlenen Aktivitäten sind sinnvoll und hilfreich.					
Die Systematik ist einfach anzuwenden.					
Ich würde für weitere AT-Projekte wieder nach der AT-Systematik vorgehen.					

### **Abschnitt 2: Bewertung der Methoden und Tools**

Für einzelne Aktivitäten wurden Ihnen gezielt spezielle Methoden und Tools vorgeschlagen. Dieser Abschnitt der Umfrage zielt darauf ab, in Erfahrung zu bringen, für wie hilfreich diese Empfehlungen von Ihnen eingestuft werden.

Auch wenn Sie die Methode oder das Tool nicht selbst angewendet haben, können Sie eventuell dennoch eine Aussage darüber treffen. Sollten Sie sich nicht sicher sein, wählen Sie „keine Antwort möglich“.

Ein detailliertes Feedback zu den Methoden und Tools können Sie in Abschnitt 3 „Offene Fragen“ geben.



4. House of Quality (HoQ). Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

	Ich stimme...	voll zu (3)	ehrer zu (2)	ehrer nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Die empfohlene QFD-Methode mit dem HoQ hat wesentlich zum Projekterfolg beigetragen.						
Das HoQ bot eine wichtige und sinnvolle Unterstützung zum Management von Kundenanforderungen und Produkteigenschaften.						
Das HoQ trug wesentlich zum gemeinsamen Verständnis und zur Kommunikation von Anforderungen und Zielen innerhalb des Projektteams bei.						
Ich würde das HoQ in diesem Kontext wieder nutzen.						

5. Filter-Fidelity-Model (FFM). Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

	Ich stimme...	voll zu (3)	ehrer zu (2)	ehrer nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Das empfohlene FFM hat wesentlich zum Projekterfolg beigetragen.						

Das FFM bot eine wichtige und sinnvolle Unterstützung zur Auswahl von geeigneten Prototyping-technologien.					
Das FFM trug wesentlich zum gemeinsamen Verständnis und zur Kommunikation von Eigenschaften unterschiedlicher Prototypingtechnologien innerhalb des Projektteams bei.					
Ich würde das FFM in diesem Kontext wieder nutzen.					

6. Prozesssimulation (Simulation des Spritzgussprozesses und des Formteils). Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

Ich stimme...	voll zu (3)	ehrer zu (2)	ehrer nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Die empfohlene Bauteilsimulation in Form einer Prozesssimulation hat wesentlich zum Projekterfolg beigetragen.					
Ich würde eine Prozesssimulation in diesem Kontext wieder nutzen um eventuelle Unsicherheiten in der Werkzeuggestaltung zu reduzieren.					
Ich würde eine Prozesssimulation in diesem Kontext wieder nutzen um Daten für die weitere Werkzeuggestaltung zu generieren (z.B. Informationen zu Kräften, Drücken, Temperaturen usw.).					
Zur Durchführung einer Prozesssimulation im Kontext des Additive Tooling besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					

7. Strukturmechanische Simulation des Werkzeuges. Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

Ich stimme...	voll zu (3)	ehrer zu (2)	ehrer nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Die empfohlene strukturmechanische Simulation hat wesentlich zum Projekterfolg beigetragen.					
Ich würde eine strukturmechanische Simulation in diesem Kontext wieder nutzen um eventuelle Unsicherheiten in der Werkzeuggestaltung zu reduzieren.					

Zur Durchführung einer strukturmechanischen Simulation im Kontext des Additive Tooling besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					
---	--	--	--	--	--

8. AT-Design-Structure-Matrix (AT-DSM). Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

Ich stimme...	voll zu (3)	ehrer zu (2)	ehrer nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Die empfohlene AT-DSM hat wesentlich zum Projekterfolg beigetragen.					
Ich würde die AT-DSM in diesem Kontext wieder nutzen <i>zur Planung und Anwendung</i> einer AT-basierten Validierungsumgebung.					
Ich würde die AT-DSM in diesem Kontext wieder nutzen <i>zur Dokumentation von Parametern und Wirkbeziehungen</i> in einer AT-basierten Validierungsumgebung.					
Zum Management von Prozessparametern und Wirkbeziehungen im Kontext des AT besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					

9. Weiterer Unterstützungsbedarf: Zusätzlich zu den empfohlenen Aktivitäten, Methoden und Tools. Bitte nehmen Sie Stellung zu folgenden Aussagen:

Ich stimme...	voll zu (3)	ehrer zu (2)	ehrer nicht zu (1)	überhaupt nicht zu (0)	Keine Antwort möglich
Zur Ermittlung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					
Zur Prüfung, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet, besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					
Zur Entwicklung der AT-Werkzeuge bzw. AT-basierten Validierungsumgebung besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					
Zur Anwendung der AT-basierten Validierungsumgebung besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					
Zur Auswertung und Beurteilung der Testergebnisse besteht weiterer Unterstützungsbedarf.					

Zur Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte besteht weiterer Unterstützungsbedarf.						
---	--	--	--	--	--	--

10. Falls Sie die vorangegangene Frage nach dem Unterstützungsbedarf (Frage 9) mit „*stimme voll zu*“ oder „*stimme eher zu*“ beantwortet haben:

Bitte begründen Sie Ihre Auswahl. (Wo genau sehen Sie den Unterstützungsbedarf? Was waren die Probleme? Wie haben sich diese im Projekt ausgewirkt?)

### **Abschnitt 3: Offene Fragen**

Hinweis: Bitte die Antworten mit einer entsprechenden Begründung formulieren! Nehmen Sie sich für diesen Teil bitte einen Moment Zeit und lassen Sie das Projekt nochmals Revue passieren.

11. Diese (bitte min. drei) Hürden/Probleme stellten die größten Herausforderungen im Projekt aus meiner Sicht dar:

12. In folgenden Punkten bot die AT-Systematik die höchste Unterstützung:

13. In folgenden Punkten bot die AT-Systematik die geringste Unterstützung:

14. Bitte begründen Sie kurz, warum Sie oder warum Sie nicht wieder nach der AT-Systematik (bzw. der darin vorgeschlagenen Vorgehensweise) vorgehen würden, um AT in einem Entwicklungsprojekt zu nutzen:

15. In folgenden Punkten sollte die AT-Systematik angepasst oder ergänzt werden:

16. Ich habe Feedback zu den genutzten Methoden (HoQ, FFM, Simulation etc.):

17. Ich habe weiteres Feedback:

### G3 – Strukturmechanische Simulation

Abbildung G3.1 zeigt die Lager- und Lastfälle sowie das Simulationsergebnis für die von Mises Vergleichsspannung am Beispiel der AT-Formeinsätze zur Herstellung des Tesla-Ventils (Fallstudie C).

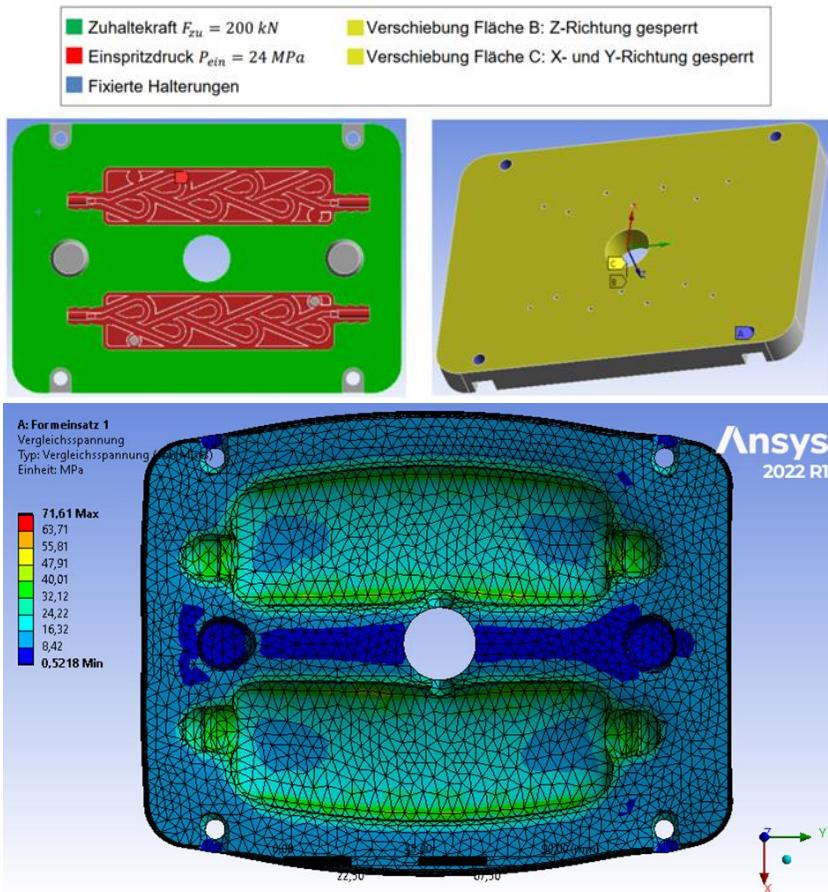


Abbildung G3.1: Simulationsrandbedingungen (oben) und Simulationsergebnis für die von Mises Vergleichsspannung (unten) anhand des Beispiels „Tesla-Ventil“ (Bildquellen: nicht veröffentlichte Abschlussberichte von Team 3: Frank, Luisa (oben), Kusser, Patrick (unten))

## G4 – Fertigungsparameter der Fallstudien B bis D

Tabelle G4.1: Fertigungsparameter für die AT-Formeinsätze der Fallstudien B bis D (siehe Abschnitt 5.2)

<b>AM-Anlage</b>	J750 (Stratasys)
<b>AM-Material</b>	Digital ABSplus (RGD515 + RGD531)
<b>Druckmodus</b>	High Quality
<b>Schichtstärke</b>	14 µm
<b>Oberflächenmodus</b>	Glossy

Tabelle G4.2: Spritzgussparameter für die Formteile *Eiskratzer*, *Karabiner* (a,b) und *Teslaventil* der Fallstudien B bis D (siehe Abschnitt 7.2)

<b>Fallstudie:</b>	<b>B</b>	<b>C</b>		<b>D</b>
	<b>Formteil:</b>	<b>Eiskratzer</b>	<b>Karabiner, Teil (a)</b>	<b>Karabiner, Teil (b)</b>
Material	ABS	ABS	ABS	ABS
Einspritzvolumen (cm <sup>3</sup> )	46	20	15	33
Zuhaltkraft (kN)	80	80	60	200
Einspritztemp (°C)	260	260	260	260
Einspritzgeschw. (cm <sup>3</sup> /s)	10	10	10	10
Einspritzdruck (bar)	280	236	205	240
Nachdruck (bar)	200	120	150	200
Nachdruckzeit (s)	1,5	4,0	4,0	5,5
Restkühlzeit (s)	300	180	180	180
Pausenzeit* (s)	180	90	90	90-120
Anzahl Formteile	29	40	33	40

\*Druckluftkühlung für AT-Formeinsätze bis Werkzeugwandtemperatur <= 40°C

## G5 – Entwicklungsgenerationen „Eiskratzer“

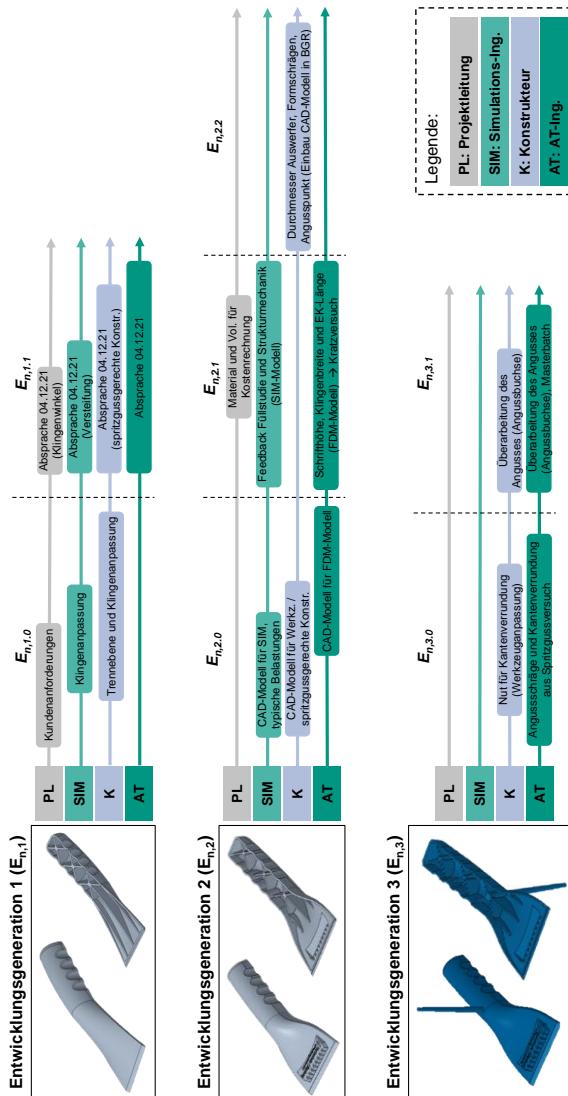


Abbildung G5.1: Entwicklungsgenerationen von Team 1 „Eiskratzer“

## G6 – Kalkulation zu den Fallstudien B bis D

Tabelle G6.1: Kostenschätzung von Projektpartner Braunform GmbH für Rohmaterial (ohne Zukaufteile) für das konventionelle Tooling

	<b>Eiskratzer</b>	<b>Karbiner</b>	<b>Tesla-Ventil</b>
<b>Materialkosten</b>	450,00 €	450,00 €	450,00 €

Tabelle G6.2: Schätzung von Fertigungszeiten und -kosten von Projektpartner Braunform GmbH für das konventionelle Tooling

<b>Eiskratzer</b>	Stundensatz	Stunden	Summe
NC-Programmierung	55,00 €	4	220,00 €
Fertigung (Fräsen, Bohren)	72,00 €	12	864,00 €
Senkerodieren	65,00 €	2	130,00 €
Polieren	35,00 €	2	70,00 €
Nacharbeiten, Korrekturen	60,00 €	1	60,00 €
Montage	55,00 €	1	55,00 €
<b>Fertigungszeit &amp; -kosten</b>	<b>22</b>		<b>1.179,00 €</b>
<b>Karbiner</b>	Stundensatz	Stunden	Summe
NC-Programmierung	55,00 €	4	220,00 €
Fertigung (Fräsen, Bohren)	72,00 €	16	1.152,00 €
Senkerodieren	65,00 €	2	130,00 €
Polieren	35,00 €	4	140,00 €
Nacharbeiten, Korrekturen	60,00 €	1	60,00 €
Montage	55,00 €	1	55,00 €
<b>Fertigungszeit &amp; -kosten</b>	<b>28</b>		<b>1.537,00 €</b>
<b>Tesla-Ventil</b>	Stundensatz	Stunden	Summe
NC-Programmierung	55,00 €	4	220,00 €
Fertigung (Fräsen, Bohren)	72,00 €	16	1.152,00 €
Senkerodieren	65,00 €	2	130,00 €
Polieren	35,00 €	4	140,00 €
Nacharbeiten, Korrekturen	60,00 €	1	60,00 €
Montage	55,00 €	1	55,00 €
<b>Fertigungszeit &amp; -kosten</b>	<b>28</b>		<b>1.537,00 €</b>

Tabelle G6.3: Eigene Kostenkalkulation für den Materialeinsatz für das Additive Tooling (ohne Zukaufteile)

Materialart	Einzel- preis	Eiskratzer		Karabiner		Tesla-Ventil	
		Ver- brauch	Summe	Ver- brauch	Summe	Ver- brauch	Summe
Dig.ABS Komp. I (RGD515)	0,211 €/gr.	1374 gr.	290,08 €	952 gr.	200,99 €	1120 gr.	236,45 €
Dig.ABS Komp. II (RGD531)	0,229 €/gr.	741 gr.	169,93 €	607 gr.	139,20 €	652 gr.	149,52 €
Supportmaterial (SUP706B)	0,065 €/gr.	136 gr.	8,82 €	141 gr.	9,14 €	136 gr.	8,82 €
Reinigungs- material	5,00 €	1 Stk.	5,00 €	1 Stk.	5,00 €	1 Stk.	5,00 €
<b>Summe Materialkosten</b>			<b>473,82 €</b>		<b>354,32 €</b>		<b>399,79 €</b>

Tabelle G6.4: Eigene Kalkulation von Fertigungszeiten und -kosten für das Additive Tooling (ohne Zukaufteile)

Eiskratzer	Stundensatz	Stunden	Summe
Druckeinstellungen	55,00 €	0,5	27,50 €
Additive Fertigung	35,00 €	17	595,00 €
Entnahme & Reinigung	35,00 €	0,5	17,50 €
Nacharbeit (Bohren, Reiben)	60,00 €	1	60,00 €
Montage	55,00 €	1	55,00 €
<b>Fertigungszeit &amp; -kosten</b>		<b>20</b>	<b>727,50 €</b>

Karabiner	Stundensatz	Stunden	Summe
Druckeinstellungen	55,00 €	0,5	27,50 €
Additive Fertigung	35,00 €	17	595,00 €
Entnahme & Reinigung	35,00 €	0,5	17,50 €
Nacharbeit (Bohren, Reiben)	60,00 €	1	60,00 €
Montage	55,00 €	1	55,00 €
<b>Fertigungszeit &amp; -kosten</b>		<b>20</b>	<b>727,50 €</b>

Tesla-Ventil	Stundensatz	Stunden	Summe
Druckeinstellungen	55,00 €	0,5	27,50 €
Additive Fertigung	35,00 €	14	490,00 €
Entnahme & Reinigung	35,00 €	0,5	17,50 €
Nacharbeit (Bohren, Reiben)	60,00 €	1	60,00 €
Montage	55,00 €	1	55,00 €
<b>Fertigungszeit &amp; -kosten</b>		<b>17</b>	<b>622,50 €</b>



## Anhang H – Fallstudie E

Im Folgenden wird der Rechenweg zur Berechnung der mittleren Werkzeugzuhaltkraft ( $F_{Z(\text{Mittel})}$ ) anhand Formel 6.1 aufgezeigt. Die Berechnung erfolgte im Rahmen der vom Verfasser co-betreuten Abschlussarbeit von Bühler (2022)<sup>1</sup>:

Formel 6.1:

$$F_Z \text{ (kN)} = \text{spez. Zuhaltkraft (kN/cm}^2\text{)} \times \text{proj. Fläche (cm}^2\text{)} \times \text{Anzahl Kavitäten}$$

Weiterhin gilt:

$$F_{Z(\text{Mittel})} = \frac{F_{Z(\text{Min})} + F_{Z(\text{Max})}}{2}$$

Aus Schötz (2013, S. 39)<sup>2</sup> wurden folgende Richtwerte ermittelt:

- *spez. Zuhaltkraft* für den Kunststoff Polypropylen (PP):

- $F_{Z(\text{Min})} = 3,0 \text{ kN/cm}^2$
- $F_{Z(\text{Max})} = 6,5 \text{ kN/cm}^2$

Weiterhin sind bekannt:

- *proj. Fläche* = 48,36 cm<sup>2</sup>
- *Anzahl Kavitäten* = 1

Daraus folgt:

$$F_{Z(\text{Mittel, PP})} = \left( \frac{3+6,5}{2} \right) \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 48,36 \text{ cm}^2 \times 1 = 229,71 \text{ kN}$$

---

<sup>1</sup> Unveröffentlichte Abschlussarbeit, vom Verfasser co-betreut.

<sup>2</sup> Schötz, A. (2013). Abmusterung von Spritzgießwerkzeugen. Strukturierte und analytische Vorgehensweise. München: Hanser. <https://doi.org/10.3139/9783446436114>



# Anhang I – Interviewstudie 3

## I1 – Experteninterview Nr. 3: Fragebogen

### 1. Fragen zur Person

Name, Vorname:	
Kontakt (E-Mail):	
Unternehmen:	
Branche:	
Unternehmensgröße:	
Fachbereich:	
Beruf:	
Art der Ausbildung:	
Berufserfahrung in Jahren:	

### 2. Aussagen zum Unterstützungsbedarf

Aussage: <b>Für sehr wichtig halte ich...</b>	Stimme nicht zu (1)	Stimme eher nicht zu (2)	Stimme eher zu (3)	Stimme voll zu (4)
1) ...die Ermittlung und Konkretisierung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs.				
2) ...die Prüfung, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet.				
3) ...die Unterstützung in Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge.				
4) ...die Unterstützung in der Anwendung der AT-basierten Validierungsumgebung.				
5) ...die Auswertung und Interpretation der Testergebnisse.				
6) ...die Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte.				

### 3. Aussagen zur Unterstützungsleistung (Vollständigkeit) der AT-Systematik

Aussage: <b>Die AT-Systematik unterstützt bei...</b>	Stimme nicht zu (1)	Stimme eher nicht zu (2)	Stimme eher zu (3)	Stimme voll zu (4)
--	------------------------	-----------------------------	-----------------------	-----------------------

1) ...der Ermittlung und Konkretisierung des Validierungs- bzw. Verifizierungsbedarfs. (Phase 1)				
2) ...der Prüfung, ob sich Additive Tooling für die Validierungsaufgabe eignet. (Phase 2)				
3) ...den nötigen Aktivitäten zur Entwicklung der AT-Werkzeuge. (Phase 3)				
4) ...der Anwendung der AT-basierten Validierungs-umgebung. (Phase 4)				
5) ...der Auswertung und Interpretation der Testergebnisse. (Phase 5)				
6) ...der Aufbereitung von Wissen und Bereitstellung für Folgeprojekte. (Phase 6)				

#### **4. Aussagen zur Anwendbarkeit der AT-Systematik**

Aussage: <u>Die AT-Systematik...</u>	Stimme nicht zu (1)	Stimme eher nicht zu (2)	Stimme eher zu (3)	Stimme voll zu (4)
1) ...ist einfach zu verstehen.				
2) ...ist einfach anzuwenden.				
3) ...ist in sinnvolle Schritte gegliedert.				
4) ...besitzt einen angemessenen Detailierungsgrad.				
5) ...besitzt ein angemessenes Aufwand-Nutzen-Verhältnis.				

#### **5. Aussagen zur Unterstützungsleistung (Erfolgsbeitrag) der AT-Systematik**

Aussage: <u>Die AT-Systematik...</u>	Stimme nicht zu (1)	Stimme eher nicht zu (2)	Stimme eher zu (3)	Stimme voll zu (4)
1) ...enthält die/alle notwendigen Aktivitäten zur Nutzung von AT.				
2) ...stellt das notwendige Wissen bzw. eine Unterstützung zur Herleitung dieses Wissens zur Verfügung.				
3) ...adressiert die relevanten Handlungsfelder des AT in der PE und unterstützt diese.				
4) ...ist in der industriellen Praxis anwendbar.				
5) ...ist auf unterschiedliche Projekte übertragbar.				
6) ...hilft bei der Realisierung und Nutzung des AT.				
7) ...steigert die Akzeptanz zur Anwendung von AT.				

**6. Aussagen zu den vorgestellten Hilfsmitteln**

Aussage: Ich stimme zu, dass...	Stimme nicht zu (1)	Stimme eher nicht zu (2)	Stimme eher zu (3)	Stimme voll zu (4)
1) ...die AT-Checkliste einen Mehrwert bietet.				
2) ...die AT-Checkliste so beibehalten werden sollte.				
3) ...ich die AT-Checkliste nutzen würde.				
4) ...die AT-DSM einen Mehrwert bietet.				
5) ...die AT-DSM so beibehalten werden sollte.				
6) ...ich die AT-DSM nutzen würde.				
7) ...der AT-Konstruktionskatalog einen Mehrwert bietet.				
8) ...der AT-Konstruktionskatalog so beibehalten werden sollte.				
9) ...ich den AT-Konstruktionskatalog nutzen würde.				

**7. Zusammenfassende Bewertung der Erfolgschancen ohne und mit der AT-Systematik**

1) Wie gut schätzen Sie Ihre Erfolgschancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT ohne Unterstützung ein? (Begründung?)

Sehr schlecht (1)	Schlecht (2)	Eher schlecht (3)	Eher gut (4)	Gut (5)	Sehr gut (6)
-------------------	--------------	-------------------	--------------	---------	--------------

2) Wie gut schätzen Sie Ihre Erfolgschancen für eine erfolgreiche Anwendung von AT mit der vorgestellten AT-Systematik und den empfohlenen Hilfsmitteln ein? (Begründung?)

Sehr schlecht (1)	Schlecht (2)	Eher schlecht (3)	Eher gut (4)	Gut (5)	Sehr gut (6)
-------------------	--------------	-------------------	--------------	---------	--------------

3) Steigert die AT-Systematik Ihrer Meinung nach die Chancen für eine erfolgreiche Anwendung des AT? (Begründung?)

Ja	Nein
----	------

**8. Offene Fragen zur AT-Systematik / Diskussion**

- 1) Mir gefällt / gefällt nicht an der AT-Systematik ...
- 2) Es fehlt ...
- 3) Folgendes sollte unbedingt beibehalten / geändert werden ...
- 4) Folgendes sollte ergänzt / entfernt werden ...
- 5) Hier sehe ich weiteres Verbesserungspotential / Probleme ...
- 6) Sonstiges / Weiteres Feedback?

## I2 – Experteninterview Nr. 3: Expertenpanel

Tabelle I2.1: Expertenpanel der dritten Interviewstudie (n=11)

ID	Branche	Expertise	Berufserfahrung* (Jahre)	Interviewdauer (hh:mm)
I1	Forschung, Entwicklung & Bildung	Ehemals Leiter Entwicklung Inno-Bereich: Kunststoffprodukte & Produktion. Aktuell Professur u.a. für Produktentwicklung und Kunststofftechnik	15	2:02
I2	Forschung, Entwicklung & Bildung	Ehemals Entwickler im Fachbereich Kunststoffforschung und -technik. Später Professur für Kunststofftechnik ( <i>mittlerweile a.D.</i> )	38	1:16
I3	Dienstleister Engineering	Projektleiter und techn. Vertrieb, Fachbereich Kunststofftechnik	30	1:13
I4	Werkzeug- und Formenbau	Dipl. Ing. Maschinenbau, Fachbereich Business Development	32	1:52
I5	Bildung & Forschung	Dipl. Ing. Maschinenbau, Fachbereich Kunststoffverarbeitung, Werkstoffprüfung Kunststoffe, Mess- & Regelungstechnik	16	2:56
I6	Werkzeugmaschinen & Kunststoffverarbeitung	Industriemechaniker und Geschäftsführer in Entwicklung und Vertrieb von Spritzgussmaschinen, aktuell Student im Studiengang Mechatronik	4	2:16
I7	Entwicklung & Produktion von Kunststoffteilen	Entwicklungsing. im Fachbereich Additive Manufacturing, Masterabschluss im Studiengang Fertigungstechnik (M.Sc.)	1	1:23
I8	Werkzeug- und Formenbau	Abteilungsleiter, Fachbereich Konstruktion von Spritzgusswerkzeugen, Masterabschluss im Maschinenbau	23	1:52
I9	Kunststoffverarbeitung	Geschäftsführer im Fachbereich Kunststofftechnik und -verarbeitung (Spritzgießen), Ausgebildeter Werkzeugmacher und Maschinenbautechniker	34	1:57
I10	Werkzeug- und Formenbau	Leiter Prozesstechnik und stellv. techn. Leiter Formenbau, Ausgebildeter Werkzeugmacher	30	1:16
I11	Entwicklung & Produktion von Kunststoffteilen	Entwicklungsing. im Fachbereich F&E Mechanik, Bachelorabschluss im Studiengang Maschinenbau (B.Eng.)	2	1:45

\*ohne Ausbildungszeiten