

1 Einleitung

Zu Beginn werden in dieser Dissertationsschrift die Ausgangssituation und die Motivation dargestellt (vgl. Kapitel 1.1). Aufbauend werden die Zielsetzung der Untersuchung und die Haupt- und Unterrforschungsfragen formuliert (vgl. Kapitel 1.2). Abschließend erfolgt die wissenschaftstheoretische Einordnung (vgl. Kapitel 1.3) zur Strukturierung des Vorgehens.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Joseph R. Biden Jr. (46ster Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika):

„Investments in die additive Fertigung werden dazu beitragen, die Kosten [...] zu senken, indem sie die Wettbewerbsfähigkeit kleinerer und mittelgroßer [...] Hersteller verbessern, hochbezahlte Arbeitsplätze in der Fertigung schaffen und erhalten und die Widerstandsfähigkeit der Lieferkette verbessern.“¹

Globalisierung, intensiver Wettbewerb und die Nachfrage nach umfassender Individualisierung stellen einige der zentralen Herausforderungen dar, denen sich die moderne Fertigungsindustrie gegenüberstellt. Unternehmen in der Produktion sind bestrebt, Sachleistungen zu erbringen, die den Erwartungen ihrer Kunden gerecht werden. Der wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens wird gewährleistet, indem das Endprodukt, hervorgegangen aus dem Ergebnis eines vielschichtigen Produktionsprozesses, effizient hergestellt wird. Die effektive Nutzung von Unternehmensressourcen und die Erzielung eines wirtschaftlichen Ertrags sind entscheidend für den geschäftlichen Erfolg. Die Leistungsfähigkeit von Prozessen wird in der Regel anhand von Zeit-, Kosten- und Qualitätszielen gemessen. In diesem Spannungsfeld müssen sich neuartige Fertigungstechnologien gegenüber etablierten behaupten. Effizienz und ihre flexible Anwendung sind entscheidend für die Schaffung einer Grundlage für ein erfolgreiches Tagesgeschäft.

¹ Vgl. Das weiße Haus von Amerika (2022) *Biden Administration Celebrates Launch of AM Forward*, S.1

In vielen Branchen wie der Automobilindustrie, Medizin und Haushaltsgeräteindustrie haben Kunststoffbauteile bereits breite Anwendung gefunden. Das Interesse an der Verwendung von Kunststoffbauteilen gründet sich vor allem auf dem Streben nach Kosten- und Gewichtseinsparungen. Die Fertigungstechnik muss dem Bedarf nach erhöhter Gestaltungsfreiheit in der Auslegung von Kunststoffbauteilen bei gleichzeitig optimalen Bauteileigenschaften gerecht werden. Dabei sollen wettbewerbsfähige Kosten auch bei geringen Stückzahlen erzielt werden.

Die additive Fertigung zeichnet sich durch die generative Herstellung von Bauteilen aus und weckt die Erwartung, insbesondere hinsichtlich des Materialeinsatzes ressourcenschonender zu sein als zerspanende Verfahren. Darüber hinaus kann diese Technologie einen positiven Einfluss auf die Verkürzung der Produktentwicklungszyklen und Lieferzeiten haben, was den Bestrebungen einer nachhaltig ausgerichteten Produktion entspricht. Die Prozessgestaltung steht jedoch vor einigen Herausforderungen, um eine flächendeckende und branchenübergreifende Anwendung dieser Technologien zu ermöglichen. Zum einen mangelt es an verfahrensübergreifendem Prozesswissen für eine generische Anwendbarkeit, und zum anderen führen Prozesslimitationen zu einer eingeschränkten Nutzbarkeit im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren. Die technischen Potenziale und die damit verbundenen Chancen, politische Ziele zur Ressourcenschonung, Wettbewerbsvorteile und dezentrale Wertschöpfung zu erreichen, sind vielfältig (vgl. Abbildung 1-1).²



Abbildung 1-1: Darstellung des Mehrwerts durch additive Fertigung in Anlehnung an das Positionspapier des VDMA

² Vgl. Verein Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (2021) *VDMA AM Roadmap zur Smart Factory*, S. 1

Die additive Fertigung gewinnt durch den Ausbau ihres Lösungspotfolios in Form von Produktivitätssteigerung und Automatisierung kontinuierlich an Bedeutung. Neben dem Einsatz im Prototypenbau qualifizieren sich additive Produktionssysteme zunehmend für Anwendungen in der Serienproduktion. Eine bedeutende Herausforderung bei der Integration additiver Fertigungstechnologien in industrielle Herstellprozesse besteht in hohem Maß an notwendiger Nachbearbeitung und dem erforderlichen Prozesswissen, um die gewünschten Bauteilqualitäten zu erreichen. Der zusätzliche Druck, wirtschaftlich und ressourcenschonend zu agieren, zwingt Unternehmen dazu, ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich innovativer Produktions-technik auszubauen.

Diese Studie fokussiert sich auf die additive Fertigung mit multidirektionalem Aufbau und analysiert das Leistungsspektrum der Materialextrusion für die ressourceneffiziente Produktion von Kunststoffbauteilen. Dabei spielen die Wirkmechanismen eines segmentorientierten Aufbaus im Rahmen des Strangablageprozesses eine zentrale Rolle. Die wissenschaftliche Untersuchung beabsichtigt, Anwendern und Maschinen-entwicklern durch die Analyse von Prozessparametern Einblicke in die Prozessgestal-tung zur Herstellung geometrisch komplexer Bauteile mit einem zuverlässigen mechani-schen Eigenschaftsprofil zu gewähren. Besonders bei geringen Stückzahlen von Bau-teilen stehen flexible Produktionsprozesse im Fokus produzierender Unternehmen. Die steigende Kundennachfrage nach innovativen und qualitativ hochwertigen Pro-dukten geht mit einer erhöhten Bereitschaft einher, für diese Qualität höhere Preise zu akzeptieren. Eine Verkürzung der wirtschaftlichen Produktlebensdauer ist erkenn-bar, was die Notwendigkeit beschleunigter Markteinführungszeiten durch verkürzte Entwicklungszyklen bedingt. Zudem nimmt die Kundenanforderung nach Individua-lisierung weiter zu und führt zu einer wachsenden Variantenvielfalt.³ Der Trend zur individualisierten Massenproduktion verfolgt das Ziel, Produkte und Dienstleistungen anzubieten, die den unterschiedlichen Erwartungen einzelner Kunden gerecht werden und dabei hocheffizient hergestellt werden können.⁴ Unternehmen stehen daher zu-nehmend vor der Entscheidung, wie sie konventionelle Fertigungsverfahren in der Zu-kunft durch innovative Verfahren erweitern können.

Additive Fertigungsverfahren haben sich in der Vergangenheit als wesentlicher Befä-higer der steigenden Individualisierung ausgezeichnet, um gegenüber

³ Vgl. Kampker, A. et al. (2013) *Life cycle oriented evaluation of flexibility in investment decisions for auto-mated assembly systems*, S. 276.

⁴ Vgl. Piller, F./Tseng, M. (2009) *Introduction: Mass Customization Thinking: Moving from Pilot Stage to an Established Business Strategy*, S. 3.

werkzeuggebundenen Verfahren gezielt Variantenvielfalt anzubieten.⁵ Immer häufiger fordern Unternehmen, den Schwerpunkt bei der additiven Fertigung von komplexen Bauteilen in der Ersatzteilefertigung, Kleinserienproduktion oder im Prototypenbau auf die Gestaltungsfreiheit zu legen. Dies dient dazu, andere wichtige Bauteilmerkmale, wie beispielsweise die Festigkeitseigenschaften, nicht zu vernachlässigen.⁶ Andere Vertreter aus der Industrie erkennen das bedeutende Potenzial der additiven Fertigung und verzeichnen bereits kontinuierliche Erfolge bei Produktinnovationen, beispielsweise in der Greifertechnik durch Topologieoptimierungen und der Umsetzung von bionischen Strukturen.⁷ Mit dieser Entwicklung gehen erhebliche Herausforderungen bei der Integration und Implementierung von additiven Fertigungsprozessen in Unternehmen einher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Philosophie verfolgt wird, bestehende Bauteile aus Produktdatenbanken mittels additiver Fertigung zu produzieren. Enttäuschung tritt auf, wenn additiv hergestellte Bauteile die geforderten Anforderungen nicht erfüllen. Die Ursachen hierfür liegen in einem mangelnden Erfahrungswissen über die optimale Konfiguration des Produktionsprozesses, was oft zu einer kritischen Haltung bis hin zur Frustration gegenüber additiven Fertigungsverfahren führt.⁸ Neben Bestrebungen, Bauteilgeometrien mittels fertigungsgerechter Konstruktion für die additive Fertigung (*engl. Design for Additive Manufacturing, kurz DfAM*) zu optimieren, wird die Anpassung, Erweiterung oder Neuentwicklung der Fertigungsprozesse als zentraler Forschungsgegenstand charakterisiert.⁹ Die Forschung und Entwicklung konzentrieren sich auf unterstützende Maßnahmen in der Bauteilkonstruktion, um eine auf das Produkt ausgerichtete Herstellung nahtlos in die Fertigungsvorbereitung zu integrieren. Ziel ist es, das Erfahrungswissen effektiv in die Maschine zu übertragen und dadurch bedeutende Fortschritte in Bezug auf die Bauteilqualität zu erzielen.¹⁰

Bei genauerer Analyse des aktuellen Zustands der Materialextrusion ist festzustellen, dass bei der Herstellung komplexer Strukturen und Hinterschneidungen vermehrt Ineffizienzen auftreten. Insbesondere zusätzliche Aufwände in Bezug auf Prozesszeit

⁵ Vgl. Eversheim, W./Schuh, G. (2005) *Integrierte Produkt- und Produktionsprozessgestaltung Prüfmitteleinsatzplanung*, S. 191.

⁶ Vgl. Kunovjanek, M. et al. (2022) *Additive manufacturing and supply chains – a systematic review*, S. 1246.

⁷ Vgl. Schuh, G. et al. (2022) *Assessment for CO₂-reduced Production by using Additively Manufactured Lightweight Robot Grippers*, S. 1411–14.

⁸ Vgl. Kampker, A. et al. (2019) *Activity-based Cost Model for Material Extrusion Processes Along the Additive Manufacturing Process Chain*, S. 491.

⁹ Vgl. Schuh, G. et al. (2020) *Feature-based Print Method for Multi-Axis Material Extrusion in Additive Manufacturing*, S. 87.

¹⁰ Vgl. Hohenstein, S. et al. (2021) *Decision basis for multi-directional path planning for post-processing reduction in material extrusion*, S. 466.

und Materialkosten für Stützstrukturen mindern die angestrebte Vision eines wirtschaftlichen und nachhaltigen Einsatzes der additiven Fertigung.¹¹ Darüber hinaus führt der schichtweise Aufbau zu einer Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften von Bauteilen durch das Abgleiten der Schichten bei Querkräften, bekannt als Delamination. Dies resultiert in schwachen Bereichen zwischen benachbarten Schichten mit maximalen Eigenspannungen, was die mechanische Integrität beeinträchtigt.¹²

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die additive Fertigung ihr Potenzial als flexible Produktionstechnologie für Endbauteile noch nicht ausreichend ausschöpft. Es besteht ein Bedarf an innovativen ökonomischen und ökologischen Prozessgestaltungen. Die technische Konzeption und die detaillierte Ausgestaltung von additiven Fertigungssystemen stellen eine herausfordernde Aufgabe dar, um eine nachhaltige Produktivität von Unternehmen zu gewährleisten.

1.2 Zielsetzung und Konzeptionierung der Forschungsfragen

Die Darstellungen der Ausgangssituation und der Motivation des Forschungsvorhabens führen zur übergeordneten Zielsetzung dieser Arbeit. Die mangelhafte Ausgangssituation bei der Anwendung der additiven Fertigung zur Herstellung von Kunststoffbauteilen zeigt sich häufig durch unzureichende Produktqualitäten, trotz eines hohen Ressourceneinsatzes für die Nachbearbeitung des gedruckten Produkts.

Daher zielt die vorliegende Untersuchung darauf ab, einen multidirektionalen Aufbau in der additiven Fertigung von Bauteilen einzuführen, um die Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Herstellungsmethoden zu verbessern. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens lautet daher wie folgt:

Das übergeordnete Ziel der wissenschaftlichen Untersuchung:

Analyse und Bewertung des multidirektionalen Aufbaus in der additiven Fertigung zur Qualifizierung mehrachsiger Fertigungssysteme.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein wissensbasierter Ansatz verfolgt. Dieser Ansatz beinhaltet die Verwendung eines mathematischen Modells, um das Systemverhalten eines additiven Fertigungssystems zu beschreiben. Ziel

¹¹ Vgl. Caviezel, C. et al. (2017) *Additive Fertigungsverfahren. Innovationsanalyse*, S. 187–88.

¹² Vgl. Lee, C. S. et al. (2007) *Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts*, S. 630.

ist es, durch die Optimierung der Prozessparameter inverse Probleme vorherzusagen und zu lösen.

Der zentrale Forschungsschwerpunkt innerhalb des technischen Systems liegt auf der Erhöhung der Materialeffizienz in der Materialextrusion durch die Implementierung des multidirektionalen Bauteilaufbaus. Dieser soll eine Fertigung nahezu ohne Stützstrukturen ermöglichen. Die Untersuchung befasst sich insbesondere mit den Vorteilen einer Erweiterung von drei Freiheitsgraden um zwei zusätzliche Freiheitsgrade, um die Aufbaurichtung während des laufenden Druckprozesses zu verändern. Die Abbildung 1-2 zeigt die eigene Interpretation der fehlenden technologischen, prozess- und werkstoffseitigen Erkenntnisse, deren Anwendung eine produktorientierte Produktion mit maximaler Materialeffizienz ermöglichen würde.

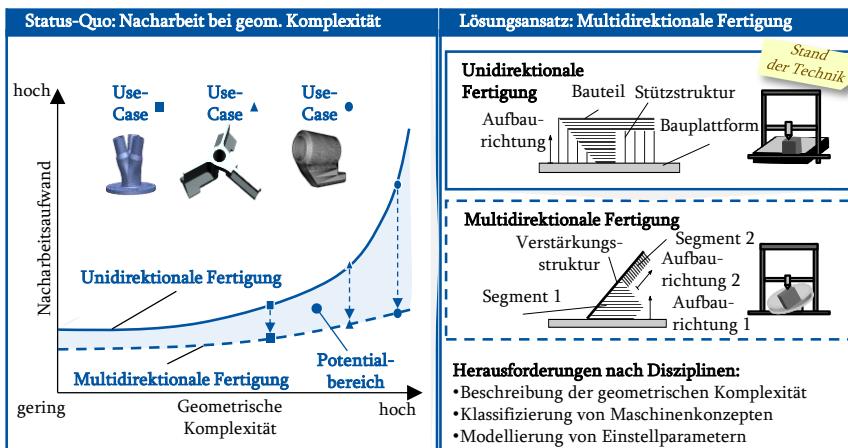


Abbildung 1-2: Darstellung von Status-Quo und Lösungsansatz multidirektionaler Fertigung bei der Materialextrusion¹³

Die wirtschaftlichen Defizite manifestieren sich darin, dass die Kosten für die Nachbearbeitung bei geometrisch komplexen Anwendungen steigen. Dies resultiert sowohl aus längeren Prozesszeiten durch die Notwendigkeit von Stützstrukturen als auch aus umfangreicheren Arbeiten für die Nachbearbeitung. In der Prozessvorbereitung wird das geometrische Modell des Bauteils für die optimale Aufbaurichtung ausgewählt.

¹³ Vgl. Eigene Darstellung, in Anlehnung an Wiertalla, J. et al. (2023), Multidirektionale Additive Fertigung: Herausforderungen bei der Umsetzung eines restriktionsfreien Prozesses, S. 2

Anschließend erfolgt der Aufbau ohne Berücksichtigung der volumetrischen Ausprägungen nach einem Schichtmodell in eine Richtung.

Ein vielversprechender Ansatz zur Überwindung der bisherigen Einschränkungen ist die Anwendung der 3+2-achsigen Verfahrensweise, die besonders bei zerspanenden Fertigungsoperationen eingesetzt wird. Dieses Verfahren erfordert die Zerlegung eines Bauteils in Subvolumina, um jedes Segment mit einer individuellen Aufbaurichtung zu erstellen.¹⁴ Die Änderung der Aufbaurichtung während des Prozesses erfordert eine Weiterentwicklung der Fertigungsvorbereitung. Zwischen den Drucksegmenten entstehen Grenzflächen, die aufgrund des Treppenstufeneffekts eine unebene Oberfläche aufweisen. Dadurch entsteht eine eingeschränkte Haftung für die ersten Schichten des angrenzenden Subvolumens. Bisherige Erkenntnisse deuten darauf hin, dass dies zu einer labilen Verbindung durch Porenbildung an der Materialverbindung führt, was zu einem instabilen Bauteil führen kann.¹⁵

Ein besonderer Forschungsbedarf besteht daher im multidirektionalen Aufbau infolge einer Segmentierung und Sequenzierung. Das Ziel ist, den Nachbearbeitungsaufwand von additiv hergestellten Bauteilen zu reduzieren und eine ressourcenschonendere Produktion zu ermöglichen. Dabei ergeben sich die folgenden zwei wissenschaftlichen Herausforderungen:

Zunächst sind bei der multidirektionalen Fertigungsplanung im Vergleich zu einer unidirektionalen Methode Volumenelemente, auch als Drucksegmente bezeichnet, zu berücksichtigen. Dies dient dazu, die geometrische Komplexität von Bauteilen fertigungstechnisch abzubilden und den Reifegrad additiver Fertigungsverfahren für industrielle Anwendungen zu erhöhen. Eine Erweiterung der Achszahl auf mehr als drei Achsen unterstützt den segmentorientierten Aufbau.

Des Weiteren weisen Übergänge zwischen den Drucksegmenten unterschiedliche Oberflächengegebenheiten auf, was zu Herabsetzungen der Bauteilfestigkeiten an den Grenzflächen führen kann. In diesem Zusammenhang können Anpassungen von Prozessparametern zur Festigkeitsoptimierung genutzt werden.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, lautet das wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit:

¹⁴ Vgl. Islam, M. S./Prabhakar, P. (2017) *Interlaminar strengthening of multidirectional laminates using polymer additive manufacturing*, S. 337.

¹⁵ Vgl. Das, A. et al. (2021) *Advances in modeling transport phenomena in material-extrusion additive manufacturing: Coupling momentum, heat, and mass transfer*, S. 15.

Wissensbasiertes Design von Prozessparametern bei Segmentübergängen zur Erhöhung der mechanischen Leistungsfähigkeit multidirektional additiv gefertigter Bauteile.

Zur Erfüllung der formulierten Zielsetzung sollen theoretische und experimentelle Untersuchungen unternommen werden, welche sich an der folgenden **Hauptforschungsfrage** orientieren:

Wie können Prozessparameter in der Materialextrusion dazu verwendet werden, eine Erhöhung der Festigkeit von multidirektional gedruckten Bauteilen hervorzurufen?

Zur Ordnung des forschungsmethodischen Vorgehens wird die Hauptforschungsfrage in weitere Unterforschungsfragen (UFF) gegliedert:

- *UFF1: Welche bestehenden Ansätze bieten einen erhöhten Nutzen, um die multidirektionale additive Fertigung umzusetzen?*
- *UFF2: Welche Auswirkungen haben Änderungen von Prozessparametern auf die Festigkeit an Grenzflächen?*
- *UFF3: Welche Genauigkeit lässt sich bei der Vorhersage der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Prozessparameter mithilfe eines empirischen Modells erzielen und können maximale Festigkeiten durch eine Optimierung des Modells erreicht werden?*

Die aus der Forschung gewonnenen Erkenntnisse richten sich in erster Linie an Unternehmen der Kunststoffverarbeitung, die eine Kleinserienproduktion durch additive Fertigung beabsichtigen. Ebenso sind Anlagenentwickler und -hersteller sowie Softwareunternehmen, die Systemlösungen herstellen und Anwendungen von funktionalen Bauteilen forcieren, angesprochen. Die vorliegende Arbeit trägt wissenschaftlich zum Forschungsprojekt BioME bei, das von der DEUTSCHE BUNDESSTIFTUNG UMWELT (DBU) unterstützt wird. Innerhalb des Projekts wird an der RWTH Aachen University und durch wesentliche Beiträge der Konsortialpartner, PEISELER GMBH & Co. KG und 3BOTS 3D ENGINEERING GMBH, eine Prototypenanlage einer 5-achsigen Anlage aufgebaut.

Das Projekt BioME zielt darauf ab, durch einen kinematischen Aufbau von drei translatorischen Achsen und zwei rotatorischen Achsen materialeffizient Bauteile aus dem automobilen Betriebsmittelbau herzustellen. Ein Extruder wird entwickelt, um Biopolymere in Granulatform aufzuschmelzen und kontinuierlich mit erhöhten Austragsraten auszutragen. Das Forschungsprojekt wird im Rahmen eines weiteren Projekts namens ORAM fortgeführt, das sich auf die Zertifizierung von recycelten Hochleistungs-

polymeren durch additive Fertigung in der Luftfahrt konzentriert (Förderkennzeichen: 20K2104A), finanziell gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima.

Die vorliegende Arbeit erklärt den dargestellten Lösungsansatz, um den multidirektionalen Aufbau in der Forschungslandschaft zu verorten. Die Untersuchung der Festigkeit an kritischen Übergängen soll den Weg zu einem industrialisierten 3+2-achsigen Fertigungsprozess ebnen. Der Fokus liegt auf der Untersuchung und Modellierung des Einflusses von Prozessparametern auf die Festigkeit an mechanischen Schwachstellen des Bauteils. Geplant ist die Entwicklung eines empirischen Modells, das die Vorhersage der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Prozessparameter ermöglicht, um eine Optimierung zu erreichen.

1.3 Wissenschaftliche Einordnung und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation verfolgt das Ziel, ein praktikables Modell zur Etablierung multidirektionaler Fertigung zu entwickeln. Dieses Vorgehen soll eine solide Grundlage schaffen, um die Wettbewerbsfähigkeit additiver Fertigungsverfahren zu bewerten und zu steigern. Zur Erreichung dieses Ziels werden Konstruktionsstrategien aus der empirischen Forschung herangezogen. Dabei orientiert sich das Vorgehen an der Auffassung von KUBICEK, der die Forschung als einen kontinuierlichen Lernprozess beschreibt. Hierbei wird neues Erfahrungswissen durch die Beantwortung von Theoriefragen an die Realität gewonnen.¹⁶

Die zentralen Anforderungen an den Lernprozess durch Forschung umfassen die Motivation, Zielsetzung und das Vorverständnis des Autors bezüglich des vorliegenden Praxisproblems. Im Zentrum des Forschungsprozesses steht ein heuristischer Bezugsrahmen, der das Vorwissen des Forschers erfasst und den Forschungsprozess steuert. Dieser heuristische Bezugsrahmen dient der geleiteten Gewinnung von Erfahrungswissen, basierend auf dem Vorwissen des Autors, durch die Ausarbeitung differenzierter Perspektiven (vgl. Abbildung 1-3).

Bedeutende Bestandteile des heuristischen Bezugsrahmens bilden die additive Fertigung, Nachhaltigkeit und Modellierungen von Produktionsprozessen. Der Erarbeitungsprozess zur Erlangung von Erfahrungswissen erfolgt durch die kontinuierliche

¹⁶ Vgl. Kubicek, H. (1976) *Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung*, S. 25.