
1 Einleitung

Neben den konventionellen Fertigungsverfahren ist die additive Fertigung in den letzten Jahren zum Zukunftsträger und Forschungsschwerpunkt geworden [2]. Der schichtweise Aufbau ermöglicht eine endkonturnahe Fertigung ohne Verwendung zusätzlicher Werkzeuge [3]. Insbesondere bei geringen Stückzahlen und komplexen Geometrien bieten additive Verfahren aufgrund der Gestaltungsfreiheit eine kostengünstige Alternative zur konventionellen Fertigung an [4]. Diverse Großunternehmen sehen inzwischen das Potential dieser Technologie, die eine nachhaltige Veränderung der industriellen Wertschöpfungskette bewirken kann [5].

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Vorteile additiver Verfahren in der Serienfertigung von komplexen Bauteilen in kleinen Stückzahlen finden insbesondere in der Luft- und Raumfahrtindustrie großen Anklang [6]. Aufgrund komplexer Strukturen wären potenziell bereits mehr als 75 % konventioneller Triebwerkskomponenten durch additiv gefertigte wirtschaftlich substituierbar [7]. Insbesondere für die überwiegend verwendeten schwer zerspanbaren Materialien wäre durch die endkonturnahe additive Fertigung eine Reduzierung des Zerspanungsgrades um bis zu 97 % möglich [8].

Das Laserstrahlschmelzen (englisch: Powder Bed Fusion of Metal with Laser Beam, PBF-LB/M) ist eines der serienmäßig verwendeten additiven Verfahren für die Fertigung komplexer Triebwerkskomponenten [7]. Konstruktive Möglichkeiten wie beispielsweise Integralbauweise oder belastungsangepasste Auslegung bieten Gewichtseinsparungen im Betrieb des Triebwerks und infolgedessen enormes Potential für zukünftige Triebwerksgenerationen [9–11].

Durch Freiheiten in der Positionierung beliebiger 3D-Objekte innerhalb eines Bauraums und Verwendung von Laserstrahlung als formgebendes Element, benötigt das PBF-LB/M-Verfahren keine auf individuelle Fertigungsaufgaben angepassten Werkzeuge [3]. Prämisse für die Verwendbarkeit von PBF-LB/M-Bauteilen sind jedoch bauraumpositionsunabhängige Bauteilcharakteristika, die nur eingeschränkt gewährleistet werden können. So können lokale Variationen diverser Prozesscharakteristika, wie beispielsweise der Energieeinkopplung [12], des Pulverauftrages [13] oder der Schutzgasströmung [14], eine Beeinflussung der Bauteilcharakteristika bewirken.

Wie in Abbildung 1.1 dargestellt, werden im Bereich der Turbine vorwiegend Nickel-Basis-Legierungen verwendet [15]. Turbinenkomponenten erfahren im Betrieb große thermische und mechanische Beanspruchungen, wodurch eine Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens auftritt [16]. Insbesondere bei additiven Verfahren wird das Ermüdungsverhalten allerdings durch mögliche Rissinitiierung beeinträchtigt [17]. Als wesentliche Mechanismen hierfür können Diskontinuitäten im Bauteil, wie beispielsweise Lagenbindefehler, oder die Oberflächentopografie identifiziert werden [18, 19].

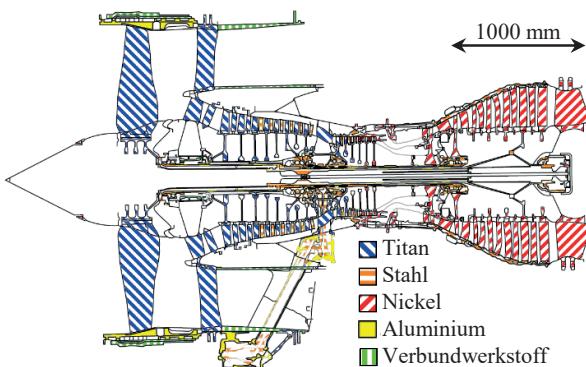


Abbildung 1.1 – Schnittdarstellung des Mantelstromtriebwerks Rolls-Royce Trent 800 inklusive der Hauptlegierungselemente in Anlehnung an REED [15]

1.2 Handlungsbedarf und Zielsetzung

Aufgrund der verfahrensbedingten Gestaltungsfreiheit bietet die additive Fertigung enormes Potential für zukünftige Triebwerks-generationen [20]. Die dargestellte Ausgangssituation zeigt jedoch einen Handlungsbedarf in mehreren Bereichen auf.

Die verfahrensspezifische große Oberflächenrauheit von additiv hergestellten Bauteilen schränkt deren Leistungsfähigkeit ein [21]. Besonders die Ermüdungseigenschaften werden von der Oberflächen-topografie definiert [22]. Eine Zunahme der Oberflächenrauheit führt tendenziell zu einer schnelleren Rissinitiierung [23]. Die resultierenden Kerbwirkungen führen zu einer Reduzierung der Festigkeitseigen-schaften des PBF-LB/M-Materials um bis zu 60 % im Vergleich zu nachbearbeiteten Oberflächen [17]. Das Ermüdungsverhalten kann daher im Vergleich zur additiv gebauten Oberfläche durch zusätzliche Oberflächennachbearbeitungen wie Fräsen, Strahlen, Elektropolieren oder Wärmebehandlungen erheblich verbessert werden [24–26]. Die Entstehungsursache der PBF-LB/M-Oberflächenrauheit ist jedoch nicht vollständig verstanden [27].

Darüber hinaus kann das Ermüdungsverhalten ebenfalls durch Diskon-tinuitäten, wie beispielsweise Lagenbindefehler, beeinträchtigt werden. Eine Rissinitiierung kann durch die scharfkantige Geometrie von unvollständig umgeschmolzenem Material verursacht und die Festig-keitseigenschaften infolgedessen beeinflusst werden [28, 29]. Das Ermüdungsverhalten wird hierbei durch Morphologie, Anzahl, Größe und Lage der Diskontinuitäten beeinträchtigt [30, 31] und kann nur bis zu einem bestimmten Grad durch Nachbearbeitungsschritte wie dem Heiß-Isostatischen-Pressen angepasst werden [32, 33].

Die Notwendigkeit von Nachbearbeitungsprozessen steht jedoch im Kontrast zu den Vorteilen des PBF-LB/M-Verfahrens und limitiert dieses. Konstruktive Möglichkeiten wie beispielsweise Hinterschneidungen, integrierte Gitterstrukturen oder bionisches Design können unter diesen Voraussetzungen nur eingeschränkt umgesetzt werden. Teure Nachbearbeitungsprozesse reduzieren darüber hinaus die Wirtschaftlichkeit und infolgedessen die Umsetzung neuer Bauteile, weshalb Lösungen innerhalb des PBF-LB/M-Verfahrens zu bevorzugen sind [34, 35]. Ebenfalls ist eine vollständige Egalisierung des Ausgangszustandes durch Nachbearbeitungsprozesse kaum möglich [36].

Die beschriebenen Limitierungen in der Anwendbarkeit additiv hergestellter Triebwerkskomponenten aus Nickel-Basis-Legierungen bilden daher eine Motivation dieser Arbeit. Diese Arbeit soll einen Anteil dazu beitragen zukünftige additive Triebwerkskomponenten sicher gestalten und reproduzierbar fertigen zu können. Hierdurch soll eine Basis für die Anwendung von sicherheitsrelevanten additiven Bauteilen gelegt werden.

Für die Erreichung dieses übergeordneten Ziels soll im Rahmen dieser Arbeit die Bauraumpositionsabhängigkeit des PBF-LB/M-Verfahrens analysiert und reduziert werden. Die lokale Variation diverser Prozesscharakteristika des PBF-LB/M-Verfahrens resultiert in einer lokalen Beeinflussung der Bauteilcharakteristika. Obwohl die Bauraumpositionsabhängigkeit einzelner Prozesscharakteristika inzwischen partiell thematisiert wird, ist eine ganzheitliche Einflussevaluation dieser, inklusive derer Wechselwirkungen, ausstehend. Erst durch dieses Wissen kann die Verfahrenstechnik in zukünftiger Anlagentechnik adaptiert und die verfahrensbedingte Bauraumpositionsabhängigkeit reduziert werden.

1.3 Forschungsfragen und Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Beitrag geleistet werden, eine Bauraumpositionsunabhängigkeit zu ermöglichen und die Etablierung des PBF-LB/M-Verfahrens zu unterstützen. Hierfür sollen nachfolgend definierte Forschungsfragen systematisch weiterführend zum Stand der Wissenschaft und Technik beantwortet werden:

- Welche lokalen Veränderungen der Prozesscharakteristika des PBF-LB/M-Verfahrens haben in welcher Ausprägung einen signifikanten Einfluss auf resultierende Bauteilcharakteristika?
- Durch welche Prozess- und Anlagenadaptionen kann eine Homogenisierung der lokalen Prozess- sowie der resultierenden Bauteilcharakteristika potenziell erreicht werden?
- Kann mittels ausgewählter Prozess- und Anlagenadaptionen eine Homogenisierung der rissinitiiierenden Bauteilcharakteristika erreicht werden?

Die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit wird für die Beantwortung der Forschungsfragen in acht Kapiteln strukturiert. Anschließend an die Einleitung in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 der derzeitige Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben. Insbesondere wird das Verfahrensprinzip des PBF-LB/M sowie dessen Prozessnebenprodukte und -störungen erläutert. Abschließend erfolgt eine Betrachtung verfahrensbedingter Bauraumpositionsabhängigkeiten. Im weiteren Verlauf werden in Kapitel 3 die verwendeten Materialien und Methoden dargelegt. Anfangs wird die Versuchsumgebung basierend auf der Versuchsanlage, dem Pulvermaterial, den Prozessparametern sowie der Schutzgasatmosphäre vorgestellt. Nachfolgend werden die verwendeten Messmethoden und -geräte für die Quantifizierung von Prozess- und Bauteilcharakteristika sowie die statistischen Analysemethoden

dargestellt. In Kapitel 4 erfolgt die Versuchsvorbereitung und -definition. Dies basiert auf der Diskretisierung der Messposition und -dimension sowie der Versuchsdefinition der lokalen Prozess- sowie Bauteilcharakteristika. Die Beantwortung der ersten Forschungsfrage erfolgt anschließend in Kapitel 5, in dem der Einfluss lokaler Prozess- auf die rissinitierenden Bauteilcharakteristika identifiziert wird. Während anfangs die Prozesscharakteristika auf Homogenität analysiert werden, erfolgt anschließend die jeweilige Einflussevaluation der Bauteilcharakteristika mittels Regressionsmodellen. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und dem Stand der Wissenschaft und Technik gegenübergestellt. Auf Basis der Erkenntnisse und des gesteigerten Prozessverständnisses der Untersuchungen gemäß Kapitel 5 kann in Kapitel 6 die Synthese von Homogenisierungskonzepten angestrebt werden. Dieses Kapitel stellt die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage dar. In diesem werden Homogenisierungskonzepte auf Basis von Bewertungskriterien in einer Nutzwertanalyse gegeneinander gewichtet. Anschließend erfolgt die konstruktive Ausgestaltung der geeigneten Homogenisierungskonzepte gemäß der vorherigen Gewichtung. Im darauffolgenden Kapitel 7 wird die dritte Forschungsfrage beantwortet. In diesem werden die Veränderungen der Prozesscharakteristika durch die Homogenisierungskonzepte quantifiziert und die definierten Regressionsmodelle mit den Messergebnissen validiert. Nach der separaten Validierung der einzelnen Regressionsmodelle der rissinitierenden Bauteilcharakteristika erfolgt anschließend eine erneute Diskussion der Messergebnisse sowie der Modellgüte des Regressionsmodells. Im abschließenden Kapitel 8 werden die Erkenntnisse zusammengefasst sowie ein Ausblick zu weiterführenden Untersuchungen des Themengebiets dargelegt.