

1 Einleitung

Der Flugverkehr nimmt immerzu eine größere Rolle im globalen Geschehen ein. Das zeigen aufstrebende Zahlen an beförderten Passagieren und geflogenen Meilen: Waren es 2018 noch rund 4,3 Mrd. Flugpassagiere weltweit, werden für 2050 mit 10,0 Mrd. schon mehr als doppelt so viele prognostiziert (s. Abbildung 1.1). Diese Entwicklung unterstreicht zum einen die wichtiger werdende Rolle von Luft-Reise- und Handelswegen. Zum anderen ergibt sich daraus ein zunehmender Druck auf die Luftfahrzeugbetreiber, ihre Betriebskosten effizienter zu gestalten. Im besonderen Maße werden diese durch eine geringere Luftfahrzeugmasse, d. h. effiziente, lastangepasste Strukturen verringert [1].

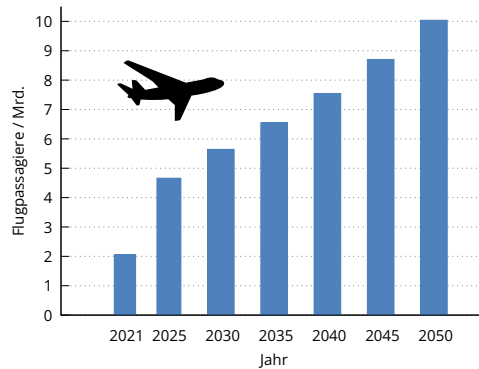


Abbildung 1.1: Entwicklung und Prognose des weltweiten Aufkommens an Flugpassagieren [2]

Die Auslegung von Luftfahrzeugstrukturen erhielt in den letzten Jahren durch intensive Forschung und Entwicklung im Bereich additive Fertigung (AF) eine noch nie dagewesene Freiheit. Additiv gefertigte Bauteile können durch ihren schichtweisen Aufbau deutlich komplexere Formen annehmen, die durch konventionelle subtraktive (z. B. Fräsen, Bohren) oder umformende Verfahren (z. B. Biegen) nicht ohne Weiteres realisierbar sind [3, Kap. 1]. Im Zusammenspiel mit Strukturoptimierung führen organisch geformte Integralbauteile schnell zu einer geringeren Strukturmasse und in zahlreichen Fällen auch zu verringerten Kosten in der Konstruktion und Herstellung [4]. Zudem wird dadurch die notwendige Antriebsenergie und folglich der Treibhausgasausstoß gesenkt.

Allerdings stehen der gesteigerten Effizienz additiv gefertigter Bauteile auch Herausforderungen im Bereich der Materialeigenschaften und daraus resultierenden eingeschränkten Bauteilzuverlässigkeit gegenüber. AF-Verfahren gehen prozessbedingt mit Imperfektionen im Bauteil wie z. B.

Poren, rauen Oberflächen oder Eigenspannungen einher, welche die Strukturqualität beeinträchtigen [5, Kap. 2.9]. Damit solche Bauteile den hohen Qualitätsanforderungen der Luftfahrtindustrie gerecht werden, sind zahlreiche Schritte zur Nachbehandlung und Qualitätsprüfung notwendig, welche wiederum die Herstellungskosten potenzieren.

Ein vielversprechender Ansatz zur Kostenreduktion bei der Herstellung von AF-Bauteilen sind Nachweisproben. Diese erfüllen den Zweck, die Qualität eines Fertigungsprozesses oder des herzustellenden Materials schon während des Fertigungsschritts abzubilden. Da die Proben gleichzeitig mit einem Referenzbauteil produziert werden und somit dasselbe erfahren, treten sie gewissermaßen als Zeugen für Ereignisse auf, welche die Qualität beeinträchtigen. Daher werden sie auch *witness specimens*, Zeugenproben, genannt [6]. Deren Qualität soll die eines Referenzbauteils oder -prozesses hinreichend genau repräsentieren, wodurch Ist-Aussagen unmittelbar nach der Fertigung möglich sind. Entscheidungen über notwendige Nachbehandlungsschritte finden damit schon früh im Herstellungsprozess statt und können Kostenzuweisungen effizienter gestalten.

Diese Arbeit hat zum Ziel, eine Methodik zur Erzeugung einer Nachweisprobe vorzuschlagen, welche die strukturelle Qualität eines additiv gefertigten Referenzbauteils stellvertretend abbildet. Diese Art von Probe wird hier mit *Struktur-Nachweisprobe* bezeichnet, da sie strukturelle Merkmale direkt in ihre Funktion integriert. Im Gegensatz zu bekannten Ansätzen soll der Fokus der Struktur-Nachweisprobe in diesen Untersuchungen auf der Repräsentation kritischer Positionen in einem Referenzbauteil liegen. Aufgrund der *a priori* unbekannten Geometrie kommen Verfahren der Topologieoptimierung (TO) zum Einsatz. Dazu wird in Kapitel 2 ausgeführt, welche AF-Verfahren für diese Arbeit grundsätzlich relevant sind und wie sich die Struktur-Nachweisprobe in die Qualitätssicherung der produzierten Bauteile einordnet. Kapitel 3 beleuchtet das grundlegende Vorgehen zur Erzeugung von Struktur-Nachweisproben und bietet als Schwerpunkt generelle Ansätze zur TO der Nachweisprobe. Diese werden weiter konkretisiert und im Kapitel 4 mittels evolutionärer Algorithmen (EA) umgesetzt. Das darauffolgende Kapitel 5 ordnet das Optimierungsproblem in bekannte, gradientenbasierte Optimierungsverfahren ein und bewertet die Möglichkeit zur Problemskalierung. Die erzeugten Optimierungslösungen werden im Kapitel 6 in reale Geometrien übertragen und sowohl mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen validiert. Daran knüpft die Demonstration der Methodik anhand eines Praxisbeispiels in Form einer Türverriegelungswelle des Airbus A350XWB an. Im Anschluss folgt eine Diskussion über die Grenzen der vorgestellten Ansätze sowie die Verwendbarkeit der Ergebnisse für den industriellen Einsatz (Kapitel 7). Zuletzt werden die Ausführungen zusammengefasst.

Mithilfe einer Nachweisprobe zur Bewertung der strukturellen Qualität soll das Grundkonzept der Nachweisproben weniger allgemein für den AF-Prozess gelten, sondern stärker an Referenzbauteile angepasst sein. Es wird sich dadurch erhofft, ein alternatives, taugliches Mittel für eine kosteneffiziente Qualitätsbewertung und -sicherung bereitzustellen.

2 Qualitätssicherung bei additiv gefertigten Luftfahrzeugstrukturen

2.1 Additive Fertigung als disruptive Technologie

Seit Entwicklung der ersten AF-Verfahren in den 1980er Jahren hat sich die damit erreichte Bauteilqualität stetig verbessert. Wurde die Technologie zuvor im Allgemeinen noch mit *Rapid Prototyping* verbunden [7], also der schnellen Produktion von nicht voll-funktionalen Prototypen und Modellen, wandelten insbesondere Verfahren zur Verarbeitung von Metallen die Ansprüche hin zum *Rapid Manufacturing*, d. h. der direkten, einsatzfähigen Fertigung von strukturellen Bauteilen [8, 9]. Gleichzeitig hat sich die Freiheit im Strukturdesign durch AF deutlich erweitert, sodass wesentlich komplexere Strukturen fertigbar sind [3, Kap. 1]. Dadurch können schlanke, lastangepasste Strukturbauteile realisiert werden mit dem Ziel, die Luftfahrzeugmasse deutlich zu senken [1]. Abbildung 2.1 zeigt im Fokus ein komplex geformtes additiv gefertigtes Bauteil, bei dem konventionelle Fertigungsverfahren wie z. B. Fräsen an die Realisierungsgrenzen stoßen. Durch den schichtweisen Aufbau gestaltet sich die AF problemlos bei deutlich effizienterem Einsatz des Rohmaterials.



Abbildung 2.1: Additiv gefertigte Metall-Bauteile mit komplexer Geometrie

AF ermöglicht nicht allein komplexere Geometrien, sondern u.a. damit einhergehend auch wirtschaftlichere Herstellungsprozesse. Die Bedeutung von AF-Verfahren hat für die Industrie somit deutlich zugenommen und besitzt als Technologie disruptives Potential: Attaran [4] beschreibt verschiedene Vorteile der AF von dezentralisierter, an Kundenwünsche angepasster Produktion über eine höhere Prozesseffizienz und Bauteilqualität bis hin zu Ansätzen zur nachhaltigen

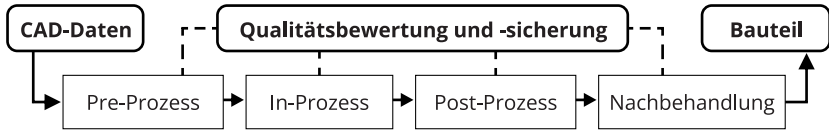


Abbildung 2.2: Darstellung des Entstehungsprozesses von additiv gefertigten Bauteilen [9]

Produktion aufgrund des geringen Verschnitts. Gerade der entstehende Materialabfall ist bei der Komponentenfertigung im Luftfahrtbereich ein wichtiger Kostenfaktor in Form des *Buy-to-fly*-Verhältnisses aus Rohmaterialmenge zum verwendeten Material im finalen Luftfahrzeug-Bauteil. Während Godec u.a. [10, Kap. 6.4.1] es bei konventionellen Verfahren wie z. B. Fräsen auf 1:12 bis 1:25 beziffern, kann es mittels AF-Verfahren auf 1:3 bis 1:12 reduziert, die Wirtschaftlichkeit folglich wesentlich gesteigert werden. Die grundlegende Bedeutung dezentraler Fertigung liegt in der Verkürzung von Lieferketten und -zeiten, indem z. B. Hersteller nötige Ersatzteile direkt vor Ort an der Stelle des Bedarfs produzieren können.

AF-Verfahren haben überdies die Hürde zwischen der digitalen Repräsentation des Bauteils als Daten im *Computer Aided Design* (CAD)¹ und der Umsetzung in der Fertigung wesentlich gesenkt [9, 11]. Oft können Fertigungsschritte schon direkt auf Grundlage der CAD-Daten geplant und ausgeführt werden. Die VDI-Richtlinie 3405 [9] definiert hier einen ganzheitlichen AF-Prozess beginnend bei der digitalen Bauteilrepräsentation in Form von CAD-Daten. Nach dem Pre-Prozess zur Vorbereitung der Daten und Fertigungsmaschine erfolgt der In-Prozess, die eigentliche Fertigung. Danach steht der Post-Prozess mit Maßnahmen zur Bauteilentformung und -säuberung vor den Nachbehandlungsschritten zur Erfüllung der Bauteilanforderungen wie z. B. der mechanischen Eigenschaften oder der Oberflächenqualität. Während des gesamten Entstehungsprozesses werden Methoden der Qualitätsbewertung und -sicherung angewandt. Dazu zählen Schritte nach der Fertigung (In-Prozess) wie etwa computertomografische Untersuchungen, 3D-Scans, Sicht- und Farbeindringprüfungen oder auch Schritte während der Fertigung, z. B. die optische Pulverbett- und Schmelzbadüberwachung. Abbildung 2.2 skizziert diesen Prozess in seinen Einzelschritten. Da in allen Schritten des AF-Prozesses umfangreiche Parameter- und Messdaten verarbeitet werden, handelt es sich bei einem vollständig datengestützten und -gesteuerten Prozess um ein wichtiges Ziel für höhere Bauteilqualität, bessere Effizienz und Wirtschaftlichkeit [12].

Die genannten Vorteile bestimmen nach wie vor die bedeutende, disruptive Rolle der AF-Technologie in wichtigen Branchen wie der Luftfahrtindustrie und den Bedarf für weitere Forschung und Entwicklung.

¹ CAD-Daten werden üblicherweise mithilfe von geometrischen Formen, z. B. Linien oder Kreissegmenten, beschrieben. Geschlossene Konturen ergeben Flächen, geschlossene Flächen das Bauteilvolumen.

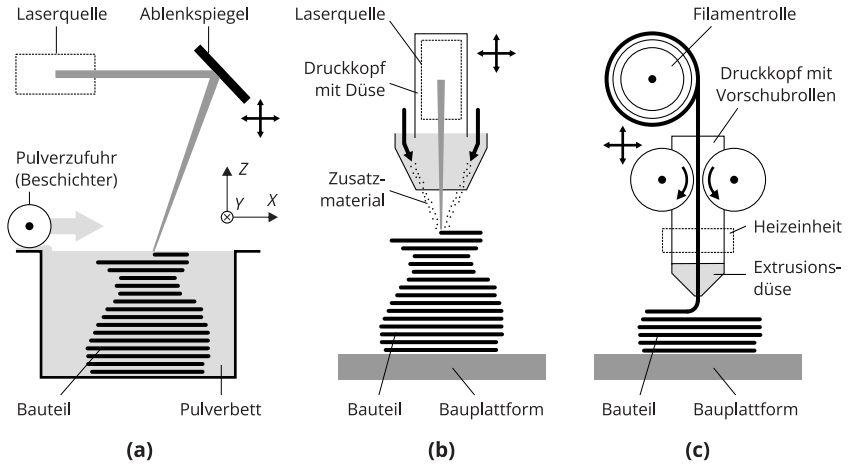


Abbildung 2.3: Prinzipdarstellung des (a) pulverbettbasierten Schmelzens (nach [19]), (b) Materialauftrag mit gerichteter Energieaufbringung (mit Pulver als Zusatzmaterial nach [5]) und (c) der Materialextrusion (nach [20])

Nicht alle verfügbaren AF-Verfahren sind für die Luftfahrtindustrie gleich relevant. Laut DIN-Norm 8580 [13] wird die AF zu den Urformverfahren, seit 2020 als eigene Gruppe 1.10 gezählt. Dabei wird zwischen den wesentlichen Verfahrensprinzipien unterschieden:

- Freistrah-Bindemittelauftrag (BJT, *binder jetting*),
- Materialauftrag mit gerichteter Energieaufbringung (DED, *directed energy deposition*),
- Materialextrusion (MEX, *material extrusion*),
- Freistrah-Materialauftrag (MJT, *material jetting*),
- Pulverbettbasiertes Schmelzen (PBF, *powder bed fusion*),
- badbasierte Photopolymerisation (VPP, *vat photopolymerisation*).

Industriell werden für metallische Werkstoffe PBF- und DED-Verfahren aufgrund passender struktureller Eigenschaften und hoher Produktivität eingesetzt [14]. Hier bieten vor allem laserbasierte PBF-Prozesse die Möglichkeit, eine hohe Strukturqualität zu erzeugen [15]. Aufgrund geringerer Dichte werden für Strukturbauteile in Luftfahrzeugen vorrangig Aluminium- und Titanlegierungen, u.a. in typischen Zusammensetzungen wie AlSi10Mg und Ti6Al4V, bevorzugt [14]. MEX-Verfahren in der Luftfahrtindustrie gehen überwiegend mit thermoplastischen Materialien wie z. B. dem PEI-Werkstoff Ultem einher [16] und stehen daher stark mit Sekundär- und Interieurstrukturen im Zusammenhang [17, 18]. Abbildung 2.3 zeigt für die drei wichtigen Verfahrenstypen eine Prinzipdarstellung.

2.2 Qualitätssicherung von additiv gefertigten Luftfahrzeugbauteilen

Entscheidenden Vorteilen der AF hinsichtlich Bauteilauslegung und Wirtschaftlichkeit stehen Herausforderungen gegenüber, die hohen Ansprüche an die Luftfahrtzulassung zu erfüllen. Im Zertifizierungsprozess mit konventionellen Fertigungsverfahren wie z. B. Fräsen oder Biegen konnten noch Material und Herstellungsprozess weitgehend getrennt voneinander behandelt werden. Das bedeutet, dass Materialien und Maschinen einzeln qualifiziert wurden². Bei AF-Verfahren entstehen dagegen die relevanten Materialeigenschaften während des Prozesses. Beispielsweise wird beim PBF das finale Material aus einem pulverförmigen Rohmaterial durch schnelles Aufschmelzen und Erstarren erzeugt. Erst dadurch wird das mikroskopische Gefüge ausgebildet, welches die makroskopischen, für die Auslegung relevanten Struktureigenschaften bestimmt [3, Kap. 2.1.2]. Mithin ist die erreichbare Bauteilqualität bei AF stark abhängig von einstellbaren Parametern bezüglich des Rohmaterials, des Fertigungsprozesses oder der Nachbearbeitung [21, 22].

2.2.1 Minimierung von Imperfektionen

Oft sollen bei additiv zu fertigenden Strukturen auftretende Imperfektionen durch geeignete Wahl der Prozessschritte und -parameter minimiert werden. Für PBF-Verfahren bedeutsame Imperfektionen umfassen Poren, Einschlüsse, Eigenspannungen, Formabweichungen, Anisotropie und eine raue Oberfläche (vgl. Abbildung 2.4).

Poren und Einschlüsse schwächen das Material durch Verringerung der Dichte und Steifigkeit und wirken – besonders in Oberflächennähe – als potentielle Rissansatzpunkte bei dynamischer Beanspruchung [23–28]. Hier besteht ein Zusammenhang zur Oberflächenrauigkeit, da sie vor diesem Hintergrund als oberflächliche Porenstruktur betrachtet werden kann [27]. Sie schwächt ebenfalls die statischen und dynamischen Bauteileigenschaften [22, 29, 30]. Eigenspannungen entstehen durch prozessinduziertes Erwärmen und Abkühlen des Materials und sind schwer vorhersehbar im gefertigten Bauteil verteilt [5, 31]. Die Materialfestigkeit liegt damit im Zweifel unter der nominell bestimmten. Eigenspannungen bedingen zudem Formabweichungen und führen so indirekt zu abweichendem Strukturverhalten aufgrund dadurch veränderter Lastflüsse. Insbesondere bei optimierten, lastangepassten Bauteilen, können folglich theoretisch erreichte Ziele in der Praxis verfehlt werden [32]. Aufgrund der schichtweisen Fertigung erzeugen AF-Verfahren in der Regel anisotrope Gefügeeigenschaften [33, 34]. Diese bewirken ein schwerer vorhersagbares Strukturverhalten hinsichtlich Festigkeit und Rissausbreitung [35, 36]. Tabelle 2.1 stellt die

²Die Analyse des Luftfahrt-Zulassungsprozesses mit konventionellen Fertigungsverfahren fand im Rahmen des Projekts AMCOCS (Förderung durch das BMWK, Nr. 01MT19002E) auf Basis von Expertenwissen statt.

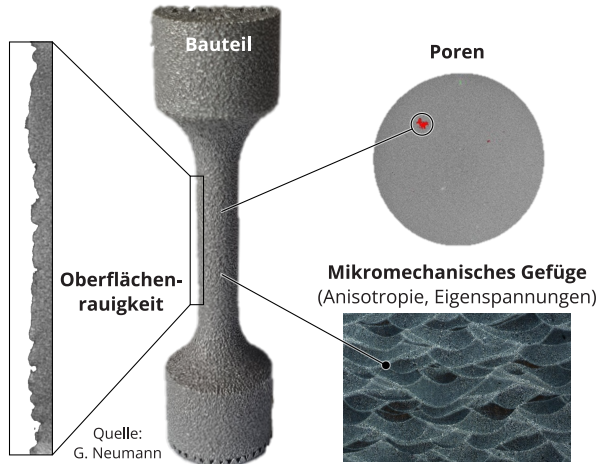


Abbildung 2.4: Überblick über wichtige Imperfektionen bei pulverbettbasierten Schmelzverfahren

genannten Imperfektionen und ihre wichtigsten Auswirkungen auf die Struktureigenschaften gegenüber.

Im Allgemeinen kann qualitativ ermittelt werden, welchen Einfluss Parameter im Entstehungsprozess von additiv gefertigten Bauteilen (s. Abbildung 2.2) auf die Ausbildung von Imperfektionen haben. Für den Fall von PBF-Verfahren zeigt Abbildung 2.5 relevante Parametergruppen, gegliedert nach ihren Quellen.

Größte direkte Auswirkungen auf die Entstehung von Imperfektionen besitzen die Parameter des Fertigungsprozesses – des Schrittes, bei dem der stoffliche Zusammenhalt geschaffen und damit die Grundform des Gefüges bestimmt wird. Am Beispiel von PBF-Verfahren entscheiden neben der Laserleistung die Scangeschwindigkeit, Schichtdicke und der Spurbstand die lokale Wärme-einwirkung im Pulverbett. Daher werden alle vier Parameter in die gemeinsame Volumenenergie zusammengefasst [8, 37]. Diese korreliert mit der Entstehung von Poren und Schmelzfehlern sowie einer besonders rauen Oberfläche [38]. Vor allem die Scangeschwindigkeit beeinflusst das entstehende Eigenspannungsfeld im Materialgefüge [39]. Hohe Pulverschichtdicken wiederum bewirken höhere Formabweichungen aufgrund geringerer Konturauflösung [40]. Wird der Spurbstand ungünstig gewählt, treten vermehrt Poren auf [41].

Nur indirekt beeinflussbar aber mit wesentlichen Auswirkungen auf die Gefügeentstehung sind die auftretenden Temperaturverhältnisse. Bei hohen Abkühlraten im Material wird das lokale Kornwachstum behindert, wodurch ein feingranulares Gefüge mit hohen Festigkeiten und Zähig-

Tabelle 2.1: Übersicht der wichtigsten Imperfektionen bei pulverbettbasierten Schmelzverfahren und ihre Auswirkungen auf die Struktureigenschaften

Imperfektion	Beeinflusste mechanische Eigenschaften
Poren, Einschlüsse	geringere Dichte geringere Steifigkeit geringere Ermüdungsfestigkeit
raue Oberfläche	deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit
Eigenspannungen	mechanische Eigenschaften schwer vorhersagbar
Formabweichung	geringere Maßhaltigkeit <i>lastoptimierte Strukturen</i> : geringere Steifigkeit und Festigkeit
Anisotropie	geringere Steifigkeiten bzw. Festigkeiten in die schwächere Richtung

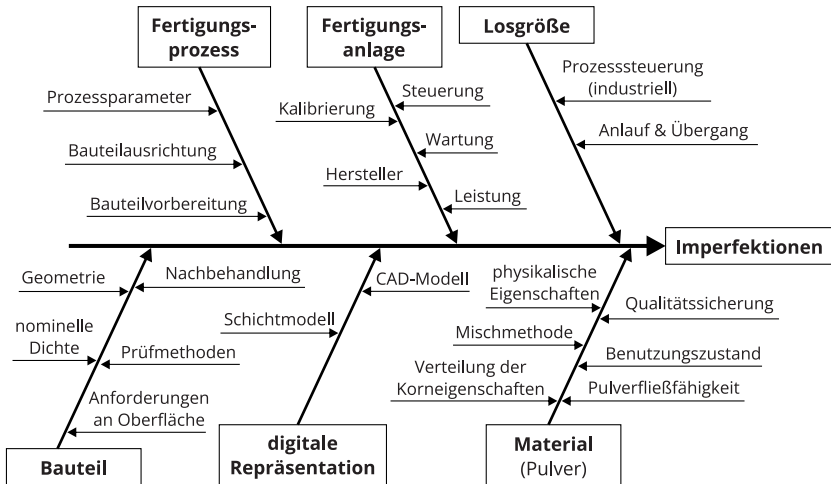


Abbildung 2.5: Einflussparameter für die Entstehung von Imperfektionen bei pulverbettbasierten Schmelzverfahren [23]

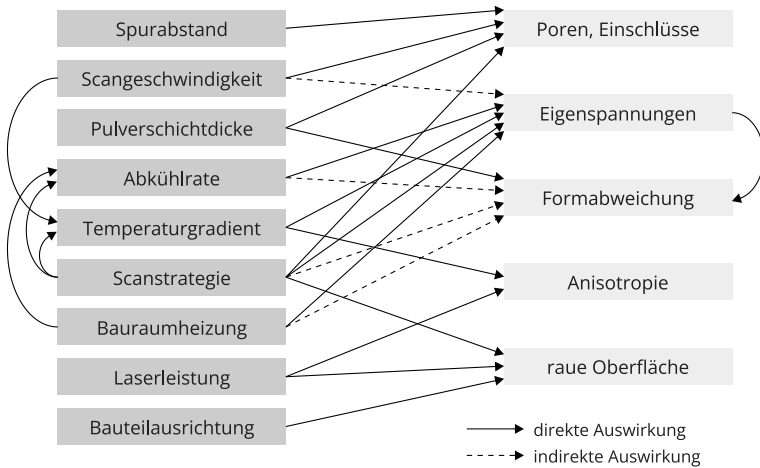


Abbildung 2.6: Wichtige Einflüsse von Prozessparametern bei pulverbettbasierten Schmelzverfahren auf die Entstehung von Imperfektionen

keiten entsteht [42]. Allerdings ist hierbei auch mit deutlicherem Verzug durch Eigenspannungen zu rechnen [43]. Negativen Auswirkungen hoher Abkühlraten kann durch eine Beheizung der Bauplattform oder des gesamten Bauraums begegnet werden [44]. Durch den schichtweisen Materialauftrag bleibt ein beständiger räumlicher Temperaturgradient in Aufbauichtung erhalten, sodass im Gefüge längliche Körner über Schichtgrenzen hinweg wachsen können. Dadurch kommt es zu anisotropem Materialverhalten [45, 46].

Zur Kompensation dieser temperaturbedingten Effekte werden unterschiedliche Scanstrategien und Bauteilausrichtungen im Bauraum vorgeschlagen. Ein lagenweiser Wechsel des Scanpfades erzielt ein regelmäßigeres Gefüge [45, 46] und damit weniger anisotrope Eigenschaften sowie insgesamt eine glattere Oberfläche [47]. Ansätze für bestimmte Füllmuster je Schicht umfassen kreuzförmige Schlängelmuster, Schachbrettmuster und Eigenspannungen reduzierende Scanpfade [45, 48].

Die Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Imperfektionen sind vielschichtig. Zum einen können direkte Effekte nachgewiesen werden, zum anderen bedingen sich Prozessparameter auch gegenseitig, wodurch Auswirkungen verkettet werden. Abbildung 2.6 versucht, diesen Umstand zu verdeutlichen.

In den Prozessschritten Post-Prozess und Nachbehandlung (vgl. Abbildung 2.2) müssen trotz optimaler Fertigungsparameter verbleibende Imperfektionen weiter minimiert werden. Dies geschieht bereits beim Entformen beispielsweise durch Sandstrahlen, um Pulverrückstände zu

entfernen und die Oberfläche leicht zu glätten. Deren Rauigkeit wird durch Überfräsen, Polieren oder Vibrationsgleitschleifen weiter verringert [29, 49, 50]. Besonders für Funktionsflächen mit hohen Anforderungen an Form- und Maßhaltigkeit spielen Fräsen und Polieren als subtraktive Fertigungsverfahren in der Nachbehandlung eine übergeordnete Rolle. Das heißsostatische Pressen prägt unter Wärmeeinwirkung einen hohen Druck auf das additiv gefertigte Bauteil auf, wodurch der Porenvolumengehalt sinkt [51]. Allerdings verändert sich aufgrund hoher Temperaturen das Material, sodass sich die Festigkeit verringert. Methoden der Wärmebehandlung wie z. B. Spannungsarmglühen können hingegen gezielt dazu eingesetzt werden, Imperfektionen wie Eigenspannungen und anisotropes Materialverhalten durch Anpassung des Gefüges weiter zu reduzieren [49, 51].

2.2.2 Prüfverfahren und Qualifikation

Verfahren zur Material- und Bauteilprüfung sind für die Qualitätssicherung unerlässlich. Es wird dabei in zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren unterschieden. Bei der klassischen Qualitätsprüfung von Hochleistungsmaterialien ermöglichen vorwiegend zerstörende Verfahren, eine sichere Aussage über die vorliegenden Materialeigenschaften zu treffen [52, 53]. Für die AF können während des gesamten Prozesses Daten über die aktuelle Bauteilqualität mithilfe von zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfverfahren aufgenommen werden (vgl. Abbildung 2.2, Qualitätsbewertung und -sicherung). Tabelle 2.2 listet mögliche Gruppen von für die AF relevanten Prüfverfahren auf.

Für die Qualifikation von Werkstoffsystemen zum Einsatz in der Luftfahrt sind Materialeigenschaften mit ausreichender Sicherheit zu bestimmen. Aufgrund von Abweichungen im Material unterliegen Eigenschaftswerte immer einer Streuung, der durch statistische Absicherung begegnet wird. Von Bedeutung für die allgemeine Qualifikation sind Werte der A- und B-Basis, welche eine Untergrenze für 99 % bzw. 90 % aller ermittelten Werte mit 95 %-Konfidenz bilden [53, 54]. Für prozessintensive Materialien werden Werte mit zusätzlichem Bestimmungsaufwand in der C- und D-Basis ermittelt. Diese entsprechen der A- und B-Basis, enthalten jedoch zusätzliche Maßnahmen zur Qualifikation von Fertigungsmaschinen und -prozess [55]. Ursache dafür sind höhere Unsicherheiten der finalen Materialeigenschaften aufgrund der hohen Anzahl an Einflussfaktoren und damit einer schwierigeren Sicherstellung eines reproduzierbaren Prozesses. Diese Kategorisierung in eine C- und D-Basis trifft auf die AF zu. Der gesamte Prüfaufwand bei AF zur Materialqualifikation für den Einsatz in der Luftfahrt steigt somit im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren erheblich. Herausforderungen in diesem Zusammenhang umfassen [10]:

- eine ausreichende Qualität des Rohmaterials,
- eine hohe Prozesskomplexität,
- die entscheidende Rolle von Nachbehandlungsschritten,