

Qualitätssicherungskonzept für die additive Fertigung ermöglicht Serienfertigung in definierter Qualität

(Ein Fachbeitrag aus 2019, Autoren: A. Dsuban, J. Lohn)

Zusammenfassung

Der Einsatz der additiven Fertigungsverfahren bietet alleinstehend oder in Kombination mit klassischen Herstellungsverfahren viele neue Potentiale. Bedingt durch den direkten schichtweisen Aufbau von Bauteilen, aus 3D-CAD Daten, können die additiven Verfahren nahezu jede Struktur realisieren und dabei häufig Material und Kosten im Vergleich zu der konventionellen Produktion einsparen.

Zur Gewährleistung der Bauteilgüte werden auf der DIN EN ISO 9001:2015 aufbauende Qualitätsmanagementnormen in Betracht gezogen, welche von besonderer Relevanz für produzierende Unternehmen sind. Neben den betrachteten Normen des Qualitätsmanagements ist die Reproduzierbarkeit sowie die Nachweisbarkeit einer hohen Produktsicherheit ein wichtiger Punkt der in diesem Beitrag behandelt wird. Hierzu wird dementsprechend ein Qualitätssicherungskonzept mit Hilfe unterschiedlicher Normschriften entwickelt, welches insbesondere bei den pulverbettbasierten Fertigungsverfahren Anwendung findet.

Einleitung

Die additiven Fertigungsverfahren weisen gegenüber den konventionellen subtraktiven (Drehen, Bohren, Fräsen) und formativen Fertigungsverfahren (Schmieden, Gießen, Biegen) viele Vorteile auf. Beispielsweise kann die Produkteinführungszeit durch den direkten Aufbau von Bauteilen aus 3D-CAD Daten signifikant reduziert werden. Zusätzlich bietet der direkte Aufbau aus den Konstruktionsdaten die Möglichkeit der schnellen Prototypengenerierung.

Die Herstellung der entwickelten Produkte unterliegt nur wenigen Restriktionen, sodass die Fertigung individueller und komplexer Bauteile ohne zusätzliche Kosten möglich ist. Weiterhin resultiert aus dem Recyceln von Prozessabfällen eine hohe Wirtschaftlichkeit, durch welche die additive Fertigung gekennzeichnet ist.

Demzufolge wird beispielsweise der Prozessabfall beim selektiven Laser-Strahlschmelzen um 90% reduziert, da nicht aufgeschmolzenes Pulver aus den Zwischenräumen der Bauteile nach durchlaufen eines Siebvorgangs erneut zur Fertigung genutzt werden kann [1, 2].

Unter Berücksichtigung dieser Besonderheiten wird der additiven Fertigung ein disruptives Potential nachgesagt, da sie durch ihr spezielles Fertigungsverfahren nicht an bestehende konventionelle Produktionsverfahren anknüpft, sondern ein völlig neuartiges Feld der Güterproduktion besetzt [1].

Um das Potential dieser Technologie zukünftig optimal nutzen zu können, müssen noch viele Aspekte näher untersucht werden. Hierzu gehört neben der kontinuierlichen Erweiterung des Werkstoffspektrums auch ein standardisiertes Qualitätssicherungskonzept, das eine reproduzierbare Qualität der gefertigten Bauteile ermöglicht, wodurch das Einsatzspektrum für 3D gedruckte Güter erweitert wird.

Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzepts für die additive Fertigung

Die Schaffung und Erhaltung von Produkten und Dienstleistungen, die einer definierten Qualität entsprechen, unterliegen unterschiedlichen Qualitätssicherungskonzepten. Dabei ist das letztendliche Anwendungsgebiet der produzierten Güter ein maßgebender Faktor für den Umfang des anzuwendenden Qualitätsmanagements.

Aufgrund des hohen Potentials der additiven Fertigungsverfahren für zahlreiche Industriebereiche, wie u. a. der Luft- und Raumfahrt, sind geeignete Qualitätssicherungskonzepte gesucht, die den jeweiligen Anwendungsbereichen entsprechen. Vor diesem Hintergrund werden im weiteren Verlauf eine Reihe von Qualitätssicherungskonzepten vorgestellt, die auf die Erfüllung geforderter Qualitätsstandards abzielen.

Die grundlegende Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001:2015 [4] (ISO 9001) soll gewährleisten, dass Unternehmen ein funktionierendes Managementsystem besitzen und ihr Möglichstes tun, um Produkte und Dienstleistungen in hoher Qualität anbieten zu können. Eine Prüfung durch sachkundige Auditoren erfolgt jährlich und wird dem jeweiligen Unternehmen durch die Aushändigung eines Zertifikats bestätigt. Das ISO 9001 Zertifikat hilft Kunden bei der Identifikation von Unternehmen, die sich der Einhaltung von geforderten Standards verpflichtet haben und diese umsetzen.

Die geforderten Standards basieren auf den „sieben Grundsätzen des Qualitätsmanagements“: Kundenorientierung, Führung, Einbeziehung von Personen, Prozessorientierter Ansatz, Verbesserung, Faktengestützte Entscheidungsfindung und Beziehungsmanagement [3].

Die ISO 9001 fordert von dem zu prüfenden Unternehmen die Einhaltung und den Nachweis der im Prozessmodell (Abbildung 1) aufgeführten Punkte.

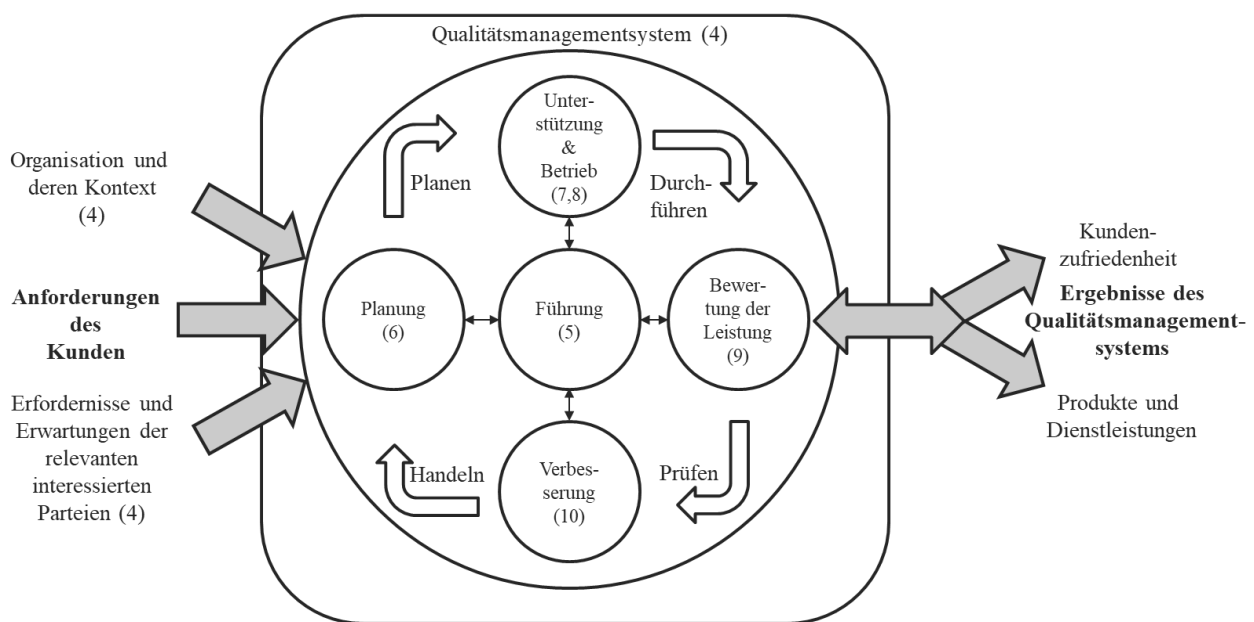


Abbildung 1: Prozessmodell mit einzelnen Normkapiteln [4]

Der Nachweis der einzelnen Punkte kann mit Hilfe eines Handbuches erfolgen. Dieses sogenannte „Qualitätsmanagementhandbuch“ kann individuell oder den Normkapiteln nach untergliedert werden. Entsprechend der Normuntergliederung ist in Kapitel 4.1 das Verständnis der Organisation und dessen Kontextes zu beschreiben. Im darauffolgenden Teilkapitel 4.2 sind die interessierten Parteien des Unternehmens zu identifizieren und deren Erfordernisse sowie Erwartungen aufzuführen. In den Kapiteln 4.3 und 4.4 sind der Anwendungsbereich des Qualitätsmanagementsystems und dessen Prozesse zu betrachten. In Kapitel 5 ist die Führungsebene und dessen Aufgaben im Rahmen des Qualitätsmanagements festzulegen und zu charakterisieren.

Das Kapitel 6 soll einen Überblick über die Planung im Unternehmen geben.

Bei der Planung ist zu beachten, dass Maßnahmen zum Umgang mit Risiken und Chancen definiert sind. Weiterhin sind Qualitätsziele zu benennen und geeignete Maßnahmen zu deren Umsetzung abzuleiten.

Im darauffolgenden Kapitel 7 sind die zur Unterstützung des Unternehmens dienenden Ressourcen aufzudecken und zu beschreiben.

In Kapitel 8 ist der eigentliche Betrieb des Unternehmens zu verdeutlichen. Hierzu kann auf Unternehmensprozesse eingegangen werden und deren Rolle im wertschöpfenden Prozess genauer definiert werden.

Im darauffolgenden Kapitel 9 ist, unter Berücksichtigung der kontinuierlichen Verbesserung, eine ausführliche Analyse der Qualität im Unternehmen durchzuführen. In diesem Zusammenhang sind u. a. die Produkte und Dienstleistungen zu bewerten, auf die Kundenzufriedenheit einzugehen und eine Bewertung des Qualitätsmanagementsystems (QMS) durchzuführen.

Abschließend sind in Kapitel 10 die zur Verbesserung des Unternehmens beitragenden Möglichkeiten zum Ausdruck zu bringen [3, 4, 5].

Die IATF 16949 umfasst den Qualitätsmanagementstandard der Automobilindustrie und baut auf [4] auf. Sollte ein Unternehmen bereits ISO 9001 zertifiziert sein, kann ein Upgrade auf die IATF 16949 die Auditdauer um bis zu 50% reduzieren.

Sie wurde im Jahr 2016 veröffentlicht und löst seitdem die bis zum 14. September 2018 geltende ISO/TS 16949:2009 ab [6]. Der neue Qualitätsmanagementstandard der Automobilindustrie zielt auf einen besonders ausgeprägten kontinuierlichen Verbesserungsprozess ab. Dieser soll dabei helfen Fehlerquellen zu entdecken und diese zu vermeiden sowie die Streuung und Verschwendung entlang der Lieferketten zu minimieren. Die Kunden werden im Rahmen der IATF 16949 noch weiter in den Fokus gestellt als bei der ISO 9001. Demzufolge müssen kundenspezifische Anforderungen bewertet und im Qualitätsmanagementsystem berücksichtigt werden.

Darüber hinaus ist dem Kunden eine verstärkte Rückverfolgbarkeit der Produkte während des Fertigungsprozesses und nach der Auslieferung, über einen definierten Zeitraum, zu gewährleisten. Vor dem Hintergrund der Produktsicherheit müssen Mitarbeiter, die an der Herstellung und Prüfung sicherheitsrelevanter Produkte beteiligt sind, die dafür entsprechenden Schulungsbedarfe erfüllen [7].

Die DIN EN 9100:2016 (EN 9100) ist eine Qualitätsmanagementnorm, die auf die Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung abzielt.

Die EN 9100 beinhaltet den vollen Umfang der ISO 9001 und wird zusätzlich um eine Reihe von Anforderungen erweitert.

Diese Anforderungen werden im Normentext in Kursivschrift dargestellt, um eine bessere Differenzierung von den klassischen ISO 9001 Bestandteilen vornehmen zu können. Wesentliche Unterschiede entstehen dabei u. a. durch die Einführung eines Konfigurationsmanagements sowie die Erhöhung der Anforderungen in Hinblick auf die Produktsicherheit und den Umgang mit gefälschten Teilen.

Der Qualitätsmanagementstandard setzt weiterhin eine erhöhte Dokumentierung und Auswertung der im Unternehmen ablaufenden Prozesse voraus.

In diesem Zusammenhang wird das, der ISO 9001 entsprechende, Risikomanagement ausgedehnt und ein proaktives risikobasiertes Denken und Handeln in allen Tätigkeiten (auch strategisch/betriebliche Ebene) des Unternehmens praktiziert.

Ein weiterer Punkt, den es verstärkt zu betrachten gilt, ist die Lieferantenüberwachung. Diesbezüglich wird mindestens eine Messung der Produkt- beziehungsweise Dienstleistungskonformität und der Liefertermintreue gefordert. Im Gegensatz zur ISO 9001 sieht die EN 9100 weiterhin einen QM-Beauftragten vor, der die Erfüllung der Normanforderungen operativ durchsetzt [8, 9].

In Anbetracht einer häufig geforderten Produktsicherheit wird die DIN 65124:2018-10 herangezogen. Diese wurde speziell für die Luft- und Raumfahrt konzipiert und legt hohe Anforderungen für die Herstellung metallischer Bauteile durch das selektive Laserschmelzverfahren fest.



Die im nachfolgenden Verlauf genannten Anforderungen dienen als Ergänzung und zur besseren Umsetzung eines QM-Standards.

Um als Zulieferer im industriellen Bereich additiv gefertigte Bauteile anzubieten, muss ein Unternehmen eine Vielzahl von Faktoren erfüllen.

Als Grundlage ist zunächst eine geeignete Betriebsstätte mit konstanten Peripheriebedingungen und zulässiger betrieblicher Ausstattung bereitzustellen. Dies setzt unter anderem den Einsatz von Maschinen voraus, die gemäß den Aufstellbedingungen des Maschinenherstellers installiert und in regelmäßigen Wartungsintervallen von fachkundigem Personal geprüft werden.

Die für die Herstellung von Laserstrahlschmelzbauteilen benötigten Ressourcen, wie z. B. das verwendete Metallpulver sind von dem Materialhersteller für den additiven Fertigungsprozess zu qualifiziert und muss den spezifischen Prozessanforderungen entsprechen. Wichtige zu prüfende Einflussfaktoren sind z.B. die Partikelgrößenverteilung und die chemische Zusammensetzung des Pulvers.

Die spezifischen Kenngrößen der gelieferten Pulvercharge sind hierbei in einem 3.1 Abnahmeprüfzeugnis zu dokumentieren und dem Kunden bei der Lieferung bereitzustellen. Der Kunde steht anschließend in der Pflicht auf ein verantwortungsvolles Pulverhandling zu achten.

Ein Pulverhandling gemäß DIN 65124 setzt dabei eine Handhabung voraus, bei der das Pulver nicht durch Fremdkörper (Staub, Trocknungsmittel, Fremdpulver) verunreinigt werden kann. Zusätzlich gilt die Einhaltung der Präventivmaßnahmen, hinsichtlich der Oxidation und der Feuchtigkeitsaufnahme des Metallpulvers. Um das Pulverhandling möglichst transparent zu gestalten, muss eine Chargendokumentation durchgeführt werden, wodurch das Pulver jederzeit identifiziert und zurückverfolgt werden kann. Diese Dokumentationspflicht gilt auch für Pulvermischungen. Das Metallpulver kann mehrfach für den Bau von Laserstrahlschmelzbauteilen verwendet werden solange die Vorgaben der Entwicklungsstelle eingehalten werden [10].

Damit eine Prozessqualifikation entlang des Fertigungsprozesses erfolgen kann, wird vorausgesetzt, dass die in der Fertigungskette angewandten Methoden den erforderlichen Qualifikationsvorgaben entsprechen.

In diesem Zusammenhang ist mit dem Auftraggeber im Vorfeld zu definieren, welche Funktion und Anforderung sein Bauteil hat. Demzufolge sind Laserstrahlschmelzbauteile gemäß DIN 65124 in drei Sicherheitsklassen zu kategorisieren [10]:

Sicherheitsklasse I:	Ein Versagen unter Betriebsbedingungen hat ein Verlust des Luft- und Raumfahrtgerätes bzw. der Hauptbestandteile zur Folge, sodass Personen geradewegs gefährdet sind.
Sicherheitsklasse II:	Ein Versagen unter Betriebsbedingungen verursacht Funktionsstörungen. Die Transportaufgabe ist jedoch bis zum Abschluss nicht gefährdet.
Sicherheitsklasse III:	Die Sicherheit und Transportfunktion ist nicht von diesem Bauteil abhängig.

Zusätzlich zur Sicherheitskategorisierung sind die Einstellparameter entlang des Wertschöpfungsprozesses festzuhalten. Die Dokumentation dient der besseren Bauprozessüberwachung und muss neben den Belichtungsparametern, den Maschinentyp einschließlich Hardware-/ Softwarestand und Seriennummer, den Aufstellort, die Pulvercharge, die Beschichterart, die Gasspezifikation (Sorte), die Gaseinstellungen sowie den Einfluss aller genannten Faktoren auf das Bauteil beinhalten. Weiterhin sind Angaben zum angewendeten Fertigungsverfahren, der Pulverspezifikation, der Materialspezifikation des generierten Bauteils und der gewählten Nachbehandlungsart festzuhalten. Darüber hinaus müssen Befunde hinsichtlich zulässiger und unzulässiger Bauteilmerkmale sowie zur Bauteilprüfung gemacht werden. Zur Erzielung möglichst reproduzierbarer Bauergebnisse sind anlagenspezifische Daten festzulegen und zu dokumentieren. Diese geben Auskunft über die Bauteilorientierung im Bauraum, die Art und Anordnung der gewählten Stützstrukturen sowie die Anzahl und Positionierung der Bauteile. Bei der Trennung der Bauteile von der Substratplatte und der Entfernung der Stützstrukturen sieht die DIN 65124 Verfahren vor, die keinen negativen Einfluss auf die Bauteilqualität nehmen. Somit können Verfahren wie Drahterodieren und Sägen zur Verwendung kommen. Für die abschließende Oberflächenbehandlung und Erreichung der geforderten Oberflächenrauheit der Bauteile, können u. a. Strahlverfahren (Korund, Glasperlen) und Schleifverfahren angewendet werden. Eine nachträgliche Reparatur der Bauteile oder

Ausbesserungen von Fehlstellen ist nur durch die Einhaltung eines entsprechenden Qualifikationsprogramms zulässig. Dieses Qualifikationsprogramm gibt vor, dass die Reparaturen nur unter schriftlicher Zustimmung des Kunden erfolgen dürfen, diese durch entsprechendes Fachpersonal durchzuführen sind und in einem dem Bauteil eindeutig zuordenbaren und ausführlichen Protokoll zu dokumentieren sind. Abschließend sind die in den Bauunterlagen festgelegten Prüfverfahren durchzuführen. An dieser Stelle kann der Kunde zerstörungsfreie und/oder zerstörende Prüfverfahren an den generierten Bauteilen und Begleitproben fordern. Die hierfür zulässigen Prüfverfahren sind in der DIN 65123 aufgeführt. Die Dokumentation der Auftragsunterlagen muss gemäß den Vorgaben der DIN EN 9133 und E DIN EN 9130 erfolgen. Für eine ausreichende Dokumentation sind mindestens folgende Informationen zu dokumentieren: Anordnung und Art der Supportstrukturen, Anordnung des Bauteils im Bauraum, Anordnung und Positionierung einzelner Bauteile, eingesetztes Pulver, verwendete Bauplattform, verwendetes Schutzgas, die in der Fertigungsanweisung festgehaltenen Informationen und die Fertigungsnummer [10].

Validierung des Vorgehens anhand eines laserstrahlgeschmolzenen Radträgers

Bevor mit der eigentlichen Bauteilfertigung des Radträgers mittels selektiven Laser-Strahlschmelzens (SLM) begonnen werden kann, muss die Baudatenvorbereitung erfolgen. Bei der Baudatenvorbereitung wird das 3D-CAD Model des Radträgers mit entsprechenden Stützstrukturen versehen (Abbildung 2). Die Art der gewählten Strukturen sowie die Ausrichtung des Radträgers im Bauraum wird zur Reproduzierbarkeit dokumentiert und der erstellte Baujob gespeichert.

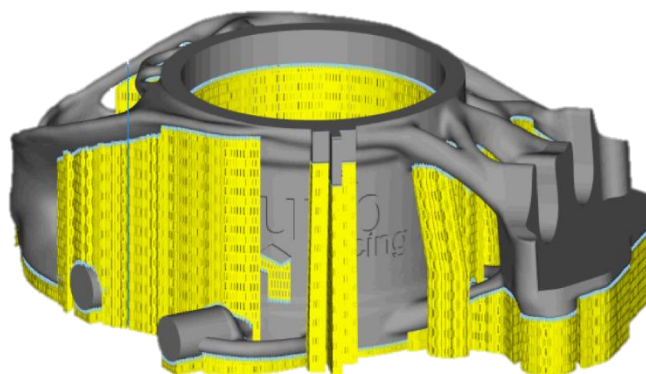


Abbildung 2: Radträger mit Stützstrukturen

Im nächsten Schritt sind die Eigenschaften des zu verwendenden Pulvers zu ermitteln. Auf diese Art und Weise kann sichergestellt werden, dass regelmäßige Qualitätskontrollen des Pulvers stattfinden und dieses für die Verarbeitung mittels des SLM-Verfahrens geeignet ist. Vor diesem Hintergrund wird für das verwendete AlSi10Mg Pulver zunächst die mittlere Pulverpartikelverteilung ermittelt (Abbildung 3a). Die Partikelverteilung weist einen annähernd normalverteilten Verlauf auf.

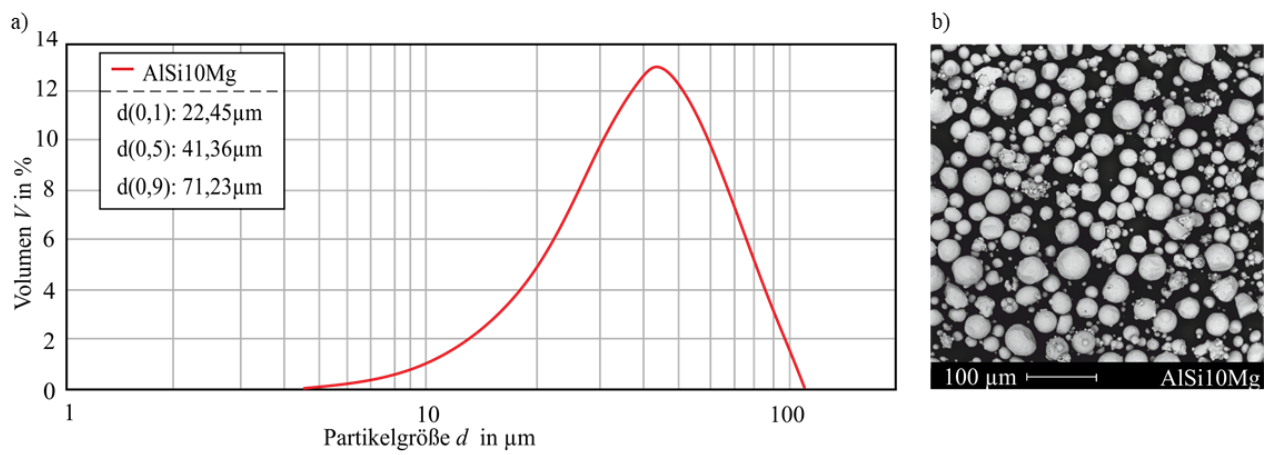


Abbildung 3: Visualisierung relevanter Pulvereinflussgrößen

- a) mittlere Pulverpartikelverteilung der AlSi10Mg-Legierung
- b) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des AlSi10Mg-Pulvers

Darüber hinaus zeigt die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme aus Abbildung 3b, dass die einzelnen Aluminiumpartikel eine sphärische Struktur besitzen und wenige Anhaftungen in Form von sogenannten Satelliten aufweisen.

Die zusätzlich mit einem Infrarot-Feuchtebestimmer gemessene Feuchtigkeit des AlSi10Mg Pulvers beträgt 0,24%.

Insgesamt weist das Pulver gute Eigenschaften auf und ermöglicht das Ablegen einer homogenen Pulverschicht. Für das Ablegen der Pulverschicht wird eine Stahlklinge verwendet die passend zum prozessierten Werkstoff das Pulver auf einer Substratplatte aus Aluminium verteilt. Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Pulvers entlang der Bauteilgeometrie zu gewährleisten, wird das Bauteil im 45° Winkel zur Beschichtungsrichtung positioniert. Additional werden die für die Durchführung von qualitätssichernden Maßnahmen benötigten Probenkörper ebenfalls auf der Substratplatte gemäß VDI 3405 orientiert (Abbildung 4).



Abbildung 4: Validierung des Qualitätssicherungskonzeptes anhand eines laserstrahlgeschmolzenen Radträgers des Direct Manufacturing Research Center der Universität Paderborn

Nach der Fertigstellung wird das überschüssige Pulver mit einem materialspezifischen Werkzeug-Set aus dem Bauraum entfernt und die hergestellten Bauteile mit einer Bandsäge von der Substratplatte getrennt. Anschließend erfolgen die Entfernung der Supportstrukturen und die Oberflächenbehandlung.

Im darauffolgenden Schritt wird eine Sichtprüfung des Bauteils durchgeführt. Diese optische Kontrolle dient dazu, dass mögliche Defekte am Bauteil möglichst früh erkannt werden können, bevor weitere Schritte im Rahmen der Nachbearbeitung sowie der Qualitätssicherung eingeleitet werden. Zur Unterstützung dieses Prüfprozesses kann ein Messschieber zur Hilfe genommen, um Maßabweichungen zu ermitteln.

Im Anschluss an die Sichtprüfung werden noch vorhandene Supportreste vom Radträger entfernt, Funktionsflächen nachgeschliffen und das Bauteil erneut sandgestrahlt. Nachdem die Nachbearbeitungsschritte abgeschlossen sind, wird mit dem Prozess der Qualitätsicherung fortgefahren. In diesem Zusammenhang wird zunächst eine Farbeindringprüfung gemäß ISO 3452 am Radträger durchgeführt, um z. B. Risse oder eine erhöhte Porosität, an der Bauteiloberfläche kenntlich zu machen (Abbildung 5).

Nachdem das Eindringmittel in vorhandene Oberflächendefekte eingedrungen ist, wird das überschüssige Farbmittel mit einem Spezialreiniger entfernt. Daraufhin wird der Entwickler aufgebracht, sodass mittels der Kapillarwirkung das in den Ungängen verbliebende Farbeindringmittel herausgezogen wird. Dabei entsteht ein zweidimensionaler Farbverlauf der Aufschluss über mögliche Fehlstellen gibt. Wie in Abbildung 5 erkenntlich ist, ist der untersuchte Radträger frei von oberflächennahen Defekten. Lediglich die Unterseite des Radträgers weist vereinzelte Farbverläufe auf, welche auf eine verstärkte Porosität zurückzuführen sind.



Abbildung 5: Farbeindringprüfung gemäß ISO 3452 am Beispiel eines Radträgers

Zur besseren Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit des Radträgers, werden mit dem Bauteil zusammen zwei rechteckige Probenkörper ($l = 20 \text{ mm}$, $h = 30 \text{ mm}$, $b = 2 \text{ mm}$) in gleicher Raumorientierung prozessiert und anschließend eine taktile Rauheitsmessung nach DIN EN ISO 4287 im as-built und im sandgestrahlten Zustand durchgeführt. Die hierbei ermittelten Werte weisen eine deutliche Reduzierung der Oberflächenrauheit durch das abrasive Sandstrahlen auf. Demnach konnte der arithmetische Mittenrauwert R_a von $23,4 \text{ }\mu\text{m}$ auf $5,7 \text{ }\mu\text{m}$ und die gemittelte Rautiefe R_z von $141,0 \text{ }\mu\text{m}$ auf $35,6 \text{ }\mu\text{m}$ reduziert werden.

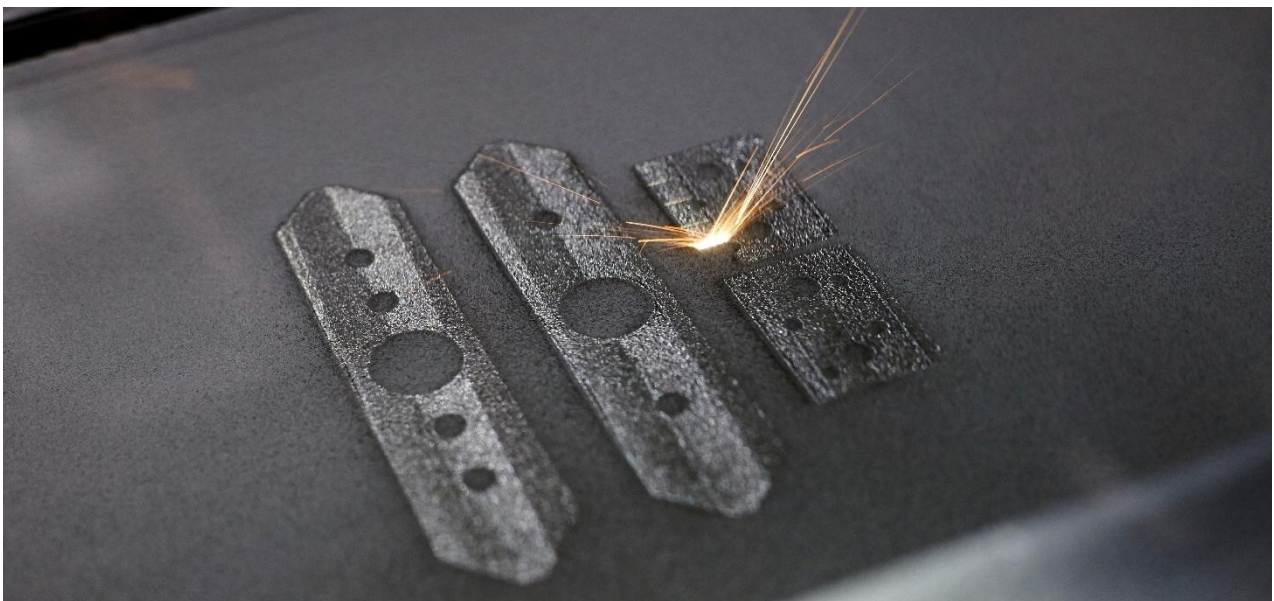
Laser-Strahlschmelzbauteile besitzen typischerweise eine relative Dichte von über 99% [11]. Um eine Aussage über die Gesamtporosität des Radträgers zu treffen, werden zusammen mit der Struktur Referenz-Probenwürfel mit einer Kantenlänge von 10 mm prozessiert. Die Würfel werden daraufhin für die Dichtemessung gemäß DIN EN ISO 3369 eingesetzt.

Bevor die Auftriebswägung jedoch zur Anwendung kommen kann, müssen die verfahrensbedingten Stützstrukturen sowie die Oberflächenrauheit durch nachträgliches Schleifen entfernt und auf ein Minimum reduziert werden. Wird dieser Arbeitsschritt vernachlässigt, kann die anschließende Wiegung im Prüfmedium durch anhaftende Luftblasen verfälscht werden.

Für die statistische Genauigkeit wird die Dichtemessung an fünf unterschiedlichen Probenwürfeln durchgeführt. Zusätzlich wird die Gewichtsmessung in Flüssigkeit als auch in Luft dreimal wiederholt, um durch Bildung des arithmetischen Mittelwertes mögliche Messungenauigkeiten zu verringern.

Die Dichte des Isopropanols entspricht bei einer Prüftemperatur von 21°C dabei $0,786 \text{ g/cm}^3$. Als Referenzwert für die Materialdichte der AlSi10Mg Legierung wird $2,67 \text{ g/cm}^3$ angenommen [12].

Die Auftriebswägung hat gezeigt, dass die ermittelten Dichtewerte ab der dritten Nachkommastelle Veränderungen aufweisen, was auf eine reproduzierbare Bauteildichte hindeutet.



Als Ergebnis kann demnach ein Mittelwert von $2,66 \text{ g/cm}^3$ ermittelt werden, woraus eine relative Materialdichte von 99,75% für die Probenwürfel resultiert. Die hohe relative Materialdichte der Probenwürfel kann repräsentativ für den Radträger gewertet werden, sodass von einer hohen Bauteilqualität ausgegangen werden kann.

Ein zusätzlich generierter Probenwürfel wird für die Ermittlung der Bauteilhärte eingesetzt. Hierfür wird für den Würfel eine Härtemessung mithilfe des Verfahrens nach VICKERS, durchgeführt. Die Probe wird zuvor in Epoxidharz eingebettet und anschließend geschliffen, sodass eine glatte und waagerechte Prüfoberfläche entsteht. Anschließend wird die Härtemessung auf dieser Fläche mit einer Prüfkraft von 19,61 N (HV2) durchgeführt. Für die statistische Genauigkeit werden fünf Messungen durchgeführt, die jeweils höchsten und niedrigsten Messwerte gestrichen und der Mittelwert aus den verbleibenden drei Werten berechnet. Der ermittelte durchschnittliche Härtewert beträgt ca. 107 HV2.

Neben der ermittelten Bauteildichte und -härte sind auch die statischen Festigkeitskennwerte des Bauteils von signifikanter Bedeutung. Für die Ermittlung der Festigkeitskennwerte werden Begleitproben in Form von zylindrischen Rohlingen, in drei unterschiedlichen Ausrichtungen gemäß VDI 3405 auf der Substratplatte positioniert. Nach dem additiven Fertigungsprozess werden die Probenkörper gemäß DIN 50125-B auf die entsprechende Probenform abgedreht und nach Norm geprüft.

Eine weitere Prüfmethode, die im Rahmen dieses Beitrages durchgeführt wird, ist die Computertomografie (CT). Mit Hilfe der Computertomografie werden dreidimensionale Informationen eines Bauteils generiert. Hierzu wird das zu prüfende Objekt in einem CT-Scanner auf einem Drehtisch positioniert und eine Vielzahl von Röntgenprojektionen aus verschiedenen Winkeln aufgenommen. Anschließend werden die Projektionsbilder durch ein Rekonstruktionssystem verarbeitet und ein dreidimensionales CT-Bild erstellt. Hierbei können anhand der generierten Informationen maßliche Abweichungen und Defekte, auch in komplexen Bauteilen, detektiert werden. Bei jedem CT-Scan entstehen sogenannte Artefakte, welche das Ergebnis des Scans negativ beeinflussen. Das Auftreten dieser Artefakte hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Die relevantesten Einflussgrößen werden im nachfolgenden Verlauf näher beschrieben.

Die Objektgröße ist ein maßgebender Einflussfaktor bei der Durchführung eines CT-Scans. Hierbei stehen die Objektgröße und die generierte Auflösung des CT-Scans in signifikanter Abhängigkeit zueinander (Abbildung 6).

Je kleiner das zu scannende Objekt ist, desto näher kann dieses vor der Strahlenquelle positioniert und ein größeres Bild auf dem Detektor projiziert werden. Hieraus werden abschließend die Scandaten generiert.

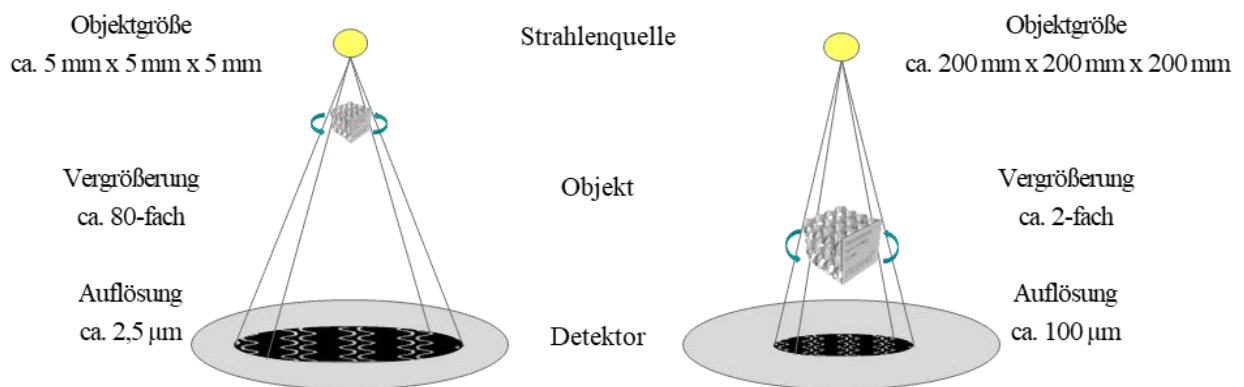


Abbildung 6: Objektgrößenabhängigkeit beim CT-Scan

Bei der Durchführung eines CT-Scans ist stets die Wandstärke des Objektes zu berücksichtigen. Je massiver die zu durchstrahlende Fläche ist, umso mehr weichen die erzeugten CAD-Daten vom Originalbauteil ab. Es ist stets zu berücksichtigen, dass ein Objekt beim Scannen um 360° rotiert wird. Aus diesem Grund kann das Bauteil in entsprechender Ausrichtung zur Strahlenquelle eine große zu durchstrahlende Fläche aufweisen. Bei großen zu durchstrahlenden Geometrien entstehen vermehrt Artefakte. Diese Artefakte führen bei der Datenrekonstruktion dazu, dass ein verzerrtes Bild der Realität erzeugt wird.

Ein weiterer Einflussfaktor, welcher das Ergebnis bzw. die generelle Realisierbarkeit des CT-Scans beeinflusst ist das Material des Objekts. Mit zunehmender Materialdichte wird die Bestimmung der Bauteiloberfläche erschwert. Aufgrund der hohen Materialdichten bei Metallen sind schnell die physikalischen Grenzen der Computertomografie erreicht und störende Artefakte treten vermehrt auf. Um diesen Effekt zu veranschaulichen wurden zwei mittels SLM-Verfahren prozessierte Gyroiden aus Aluminium und Stahl im CT-Scanner aufgenommen. In Abbildung 7 ist dargestellt, inwiefern die Oberflächenbestimmung mit zunehmender Materialdichte erschwert wird.

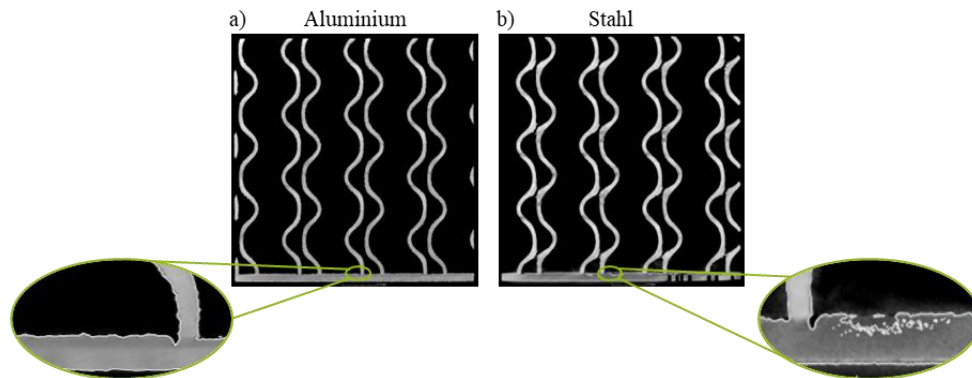


Abbildung 7: Materialabhängigkeit beim CT-Scan

- a) CT-Aufnahme eines Gyroiden aus Aluminium mit wenig Artefakten
- b) CT-Aufnahme eines Gyroiden aus Stahl mit einer Vielzahl an Artefakten

Die Aufnahme in Abbildung 7a zeigt eine homogen ermittelte Oberfläche wohingegen die Aufnahme in Abbildung 7b eine Vielzahl an Artefakten aufweist. Diese Artefakte bilden nicht die realen Eigenschaften des gescannten Bauteils ab und verfälschen somit das Ergebnis des CT-Scans. Aus diesem Grund könnte mit derart verfälschten Daten keine repräsentative Qualitätssicherung mit Hilfe eines Soll-Ist-Vergleichs durchgeführt werden.

Für die Erstellung eines Soll-Ist-Vergleichs, werden zunächst dreidimensionale Informationen eines Bauteils generiert. Die gewonnenen Daten (Ist-Daten) werden anschließend mit den bereitgestellten CAD-Daten (Soll-Daten) über eine bestimmte Ausrichtungslogik, der sogenannten „Best-Fit“ Methode übereinandergelegt (Abbildung 8). Im nächsten Schritt werden vorhandene Abweichungen über ein Falschfarbenmodell dargestellt. Das Falschfarbenmodell visualisiert, in welchen Bereichen die erstellten CAD-Daten des 3D-gedruckten Bauteils von den bereitgestellten Soll-Daten abweichen. Somit ermöglicht die Computertomografie das Vermessen von komplexen oder auch innen liegenden Geometrien und Freiformflächen.

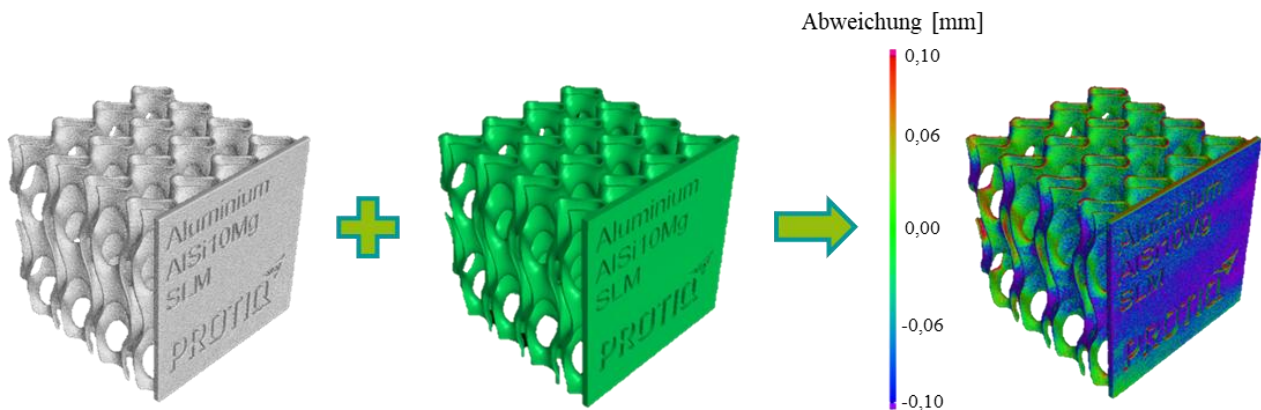


Abbildung 8: Ablauf eines Soll-Ist-Vergleichs eines laserstrahlgeschmolzenen Gyroiden

Der grüne Bereich zeigt hierbei eine Übereinstimmung der Soll und Ist Daten. Bereiche in welchen das Bauteil größer als die Soll-Daten ist werden rötlich dargestellt und Bereiche in welchen das Bauteil kleiner als die Soll-Daten ist werden bläulich abgebildet. Die nachfolgende Abbildung 9 visualisiert das Falschfarbenmodell des prozessierten Radträgers aus vier unterschiedlichen Ansichten. Die überwiegende Grünfärbung zeigt, dass das Bauteil nur wenig Abweichungen vom ursprünglichen CAD-Modell besitzt.

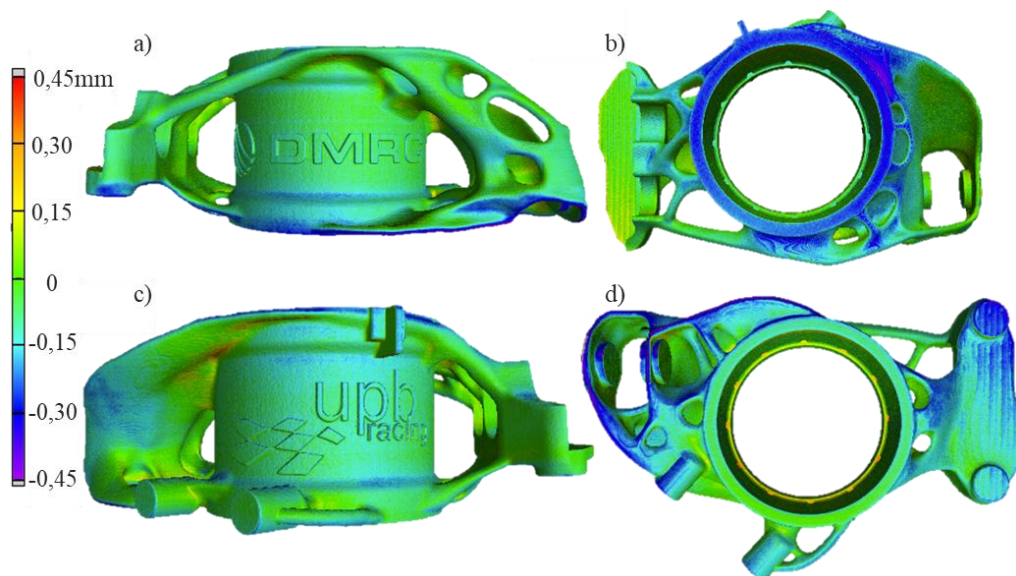


Abbildung 9: Soll-Ist-Vergleich des Aluminium-Radträgers

- a) Frontansicht
- b) Draufsicht
- c) Rückansicht
- d) Ansicht von unten

Insbesondere die Frontansicht und die Rückansicht weisen überwiegend grüne Flächen auf, sodass von einer Abweichung von nahezu 0 mm ausgegangen werden kann. Die meisten Abweichungen sind in den Verbindungspunkten zum unteren Querlenker zu verzeichnen. Hier zeigt die Draufsicht eine Abweichung von mehrheitlich 0,15-0,30 mm, welche zum Rand hin auf über 0,45 mm ansteigt. Auf der Unterseite hingegen sind die Abweichungen etwas geringer mit 0-0,15 mm. Lediglich die runden Verbindungsbereiche weisen eine negative Abweichung auf, welche jedoch auf das mechanische Abtragen im Nachbearbeitungsprozess zurückzuführen ist. Insgesamt sind die Abweichungen des prozessierten Radträgers jedoch sehr gering und liegen überwiegend in dem angegebenen Toleranzbereich von 0,7% [13].

Zusammenfassung und Ausblick:

Durch den Einsatz der additiven Fertigung für die direkte und werkzeuglose Produktion von Endprodukten ist ein hohes Qualitätsniveau zu garantieren. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden in Anlehnung an geltende Normen geeignete Prüfmethoden ausgewählt und exemplarisch angewendet, um die Übertragbarkeit auf die additive Fertigung zu zeigen. Untersucht wurden die Eigenschaften des Pulver-Rohmaterials, die Werkstoffeigenschaften der aufgebauten Bauteile sowie die Geometriegenauigkeit der Bauteile. Um auch zerstörende Prüfungen durchzuführen wurden stellvertretend für die Bauteileigenschaften Probenkörper in einem Baujob gemäß der Norm VDI3405 mitgefertigt und geprüft. [11]

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass auf Basis der ermittelten Kennwerte eine Aussage über die erzielte Bauteilqualität getroffen werden kann.

Unregelmäßigkeiten im Bauprozess werden meist unmittelbar durch die Messergebnisse aufgedeckt.

Durch das entwickelte Qualitätssicherungskonzept können bereits eine Vielzahl der Einflussgrößen kontrolliert und Grenzwerte definiert werden. Deutlich wurde allerdings, dass eine weitere Optimierung der Maschinen- und Anlagentechnik für eine prozesssichere Produktion mit gleichbleibender Qualität erforderlich ist. Erstrebenswert sind die Integration von zusätzlichen Onlineprozessüberwachungsinstrumenten, wie z.B. Thermografie, optischen Systemen und weiteren Sensoren.

Literatur

- [1] Som, O.; Thielmann, A.; Schnabl, E.; Daimer, S.; Berghäuser, H.; Rothengatter, O.: Anwendung- und Entwicklungsperspektiven der Additiven Fertigung für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Fraunhofer- Institut für System- und Innovationsforschung, 2016.
- [2] Schleifbaum, J. H.: Verfahren und Maschine zur individualisierten Produktion mit High Power Selective Laser Melting. Shaker Verlag, Aachen, 2012.
- [3] Brugger-Gebhardt, S.: Die DIN EN ISO 9001:2015 verstehen. Die Norm sicher interpretieren und sinnvoll umsetzen. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016.
- [4] DIN EN ISO 9001:2015-11, Deutsches Institut für Normung, Qualitätsmanagementsysteme- Anforderungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015.
- [5] Behrends, K-U.; Seybold, A.; Lehrke, M.: DIN EN ISO 9001:2015- kompakt und verständlich. Ein Leitfaden für Anwender zum Verstehen der ISO 9001:2015, mit dem Ziel das Bewusstsein und die Eigenverantwortung zu stärken. Lehrke Verlag GmbH, Hamburg, 2016.
- [6] TÜV-Rheinland: Fragen und Antworten zur ISO/TS 16949:2009 und IATF 16949:2016. TÜV-Rheinland Group, Köln, 2017.
- [7] IATF16949:2016-10, International Automotive Task Force, Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktionen in der Automobilindustrie. Qualitäts Management Center (QMC) im Verband der Automobilindustrie, Berlin, 2016.
- [8] DIN EN 9100:2018-08, Deutsches Institut für Normung, Qualitätsmanagementsysteme- Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [9] M. Hinsch: Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie. Die EN 9100:2016 verständlich erklärt, 2. Auflage. Springer Vieweg, Hamburg, 2016.
- [10] DIN 65124:2018-10, Deutsches Institut für Normung: Luft - und Raumfahrt - Technische Lieferbedingungen für additive Fertigung metallischer Werkstoffe mit Pulverbettverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
- [11] VDI 3405-2:2013-08, Verein Deutscher Ingenieure: Additive Fertigungsverfahren Strahlschmelzen metallischer Bauteile Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- [12] EOS: EOS GmbH Datenblatt Aluminium AlSi10Mg: [Url:https://lightway-3d.de/download/LIGHTWAY_EOS_Aluminium_AlSi10Mg_de_Datenblatt.pdf](https://lightway-3d.de/download/LIGHTWAY_EOS_Aluminium_AlSi10Mg_de_Datenblatt.pdf)
- [13] PROTIQ GmbH.: Blomberg, 2019.