PAiCE

KONFORMITÄT UND ZERTIFIZIERUNG FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG

BEDARFE | LÖSUNGSANSÄTZE | HERAUSFORDERUNGEN

Impressum

Herausgeber

Begleitforschung PAiCE
iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI / VDE Innovation + Technik GmbH
Peter Gabriel
Steinplatz 1
10623 Berlin
gabriel@iit-berlin.de

Autor

Dr. Wolfgang Klebsch, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Gestaltung

Loesch*Hund*Liepold
Kommunikation GmbH
Hauptstraße 28 | 10827 Berlin
paice@lhlk.de

Stand

August 2020

Bilder

Begleitforschung PAiCE

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PAiCE

KONFORMITÄT UND ZERTIFIZIERUNG FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG

BEDARFE | LÖSUNGSANSÄTZE | HERAUSFORDERUNGEN

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PAiCE – Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering

iit – Institut für Innovation und Technik
in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Steinplatz 1
10623 Berlin

Executive Summary

Die Additive Fertigung ermöglicht die flexible Herstellung von Komponenten mit geringen Losgrößen, beispielsweise von Ersatzteilen, und hat mittlerweile industrielle Reife erlangt. Kunden erwarten daher von additiv gefertigten Komponenten, dass sie zuverlässig und sicher sind sowie von stets gleichbleibend hoher Qualität. Diese Anforderungen sicherzustellen, setzt voraus, dass sich alle am Entwicklungs-, Fertigungs- und Logistikprozess Beteiligten als Teil eines stabilen und reproduzierbaren Gesamtprozesses sehen. Zudem sollten sie befähigt sein, Konformität mit den erforderlichen Regelsetzungen und Normen zu wahren, und deren Einhaltung beispielsweise in Form eines Zertifikates oder Prüfsiegels nachweisen können.

Im Idealfall bedeutet die Beherrschung des Herstellungsprozesses in allen seinen Details, dass das additiv gefertigte Bauteil exakt der Spezifikation entspricht und alle Bauteile derselben Serie identische Qualität aufweisen. In diesem Fall könnte theoretisch auf die zum Teil sehr zeit- und kostenintensive Qualifizierung eines Bauteiltyps verzichtet werden.

Von diesem Idealzustand ist die Additive Fertigung heute noch sehr weit entfernt. Die Gründe dafür liegen etwa in der Vielfalt der etablierten 3D-Druckverfahren und verfügbaren Druckmaterialien, aber auch in der unendlichen Anzahl möglicher Bauteil-Designs und -Anforderungen. Zumindest für die Qualifizierung und Zertifizierung der Dienstleister gibt es mit DIN SPEC 17071 immerhin einen ersten Aufschlag für ein Regelwerk (vgl. DIN SPEC 17071:2019-12). Für die Verlässlichkeit der digitalen Bereitstellung der Entwurfsdaten und für den Schutz des geistigen Eigentums kann auf etablierte Standards und Zertifizierungsverfahren der Informations- und Kommunikationstechnik zurückgegriffen werden.

Die laufenden Aktivitäten namhafter, auf Verfahren und Prozesse der Additiven Fertigung spezialisierter Forschungseinrichtungen stimmen optimistisch, dass mittelfristig die Bauteilqualität präzise vorhersehbar wird. In aufwändigen Ringversuchen wurden bereits umfangreiche Daten zur Korrelation zwischen Bauteilqualität, 3D-Druckverfahren und Materialeigenschaften gewonnen. Die Bauteilqualifizierung soll langfristig damit durch datenbasierte und simulationsunterstützte Prognosen ersetzt oder zumindest signifikant vereinfacht und kostengünstiger werden. Der Vorgang der Prüfung und Zertifizierung von Bauteilen wäre damit digitalisiert, und es wäre eine Ausweitung der Additiven Fertigung in Richtung eines Massenmarktes für hoch-individualisierte Produkte möglich, deren Prüfung und Zertifizierung dank Virtualisierung erheblich weniger zeit- und kostenaufwändig sein werden als heute.

Für die Unternehmen, die in der additiven Fertigung tätig sind, gibt es einen hohen Handlungsbedarf, die Simulation von Druckprozessen und -materialien voranzutreiben und daraus Regelwerke für die virtuelle Abnahme und Zertifizierung von Bauteilen abzuleiten. Den Plattformen für den 3D-Druck, wie sie u. a. auch im BMWi-Technologieprogramm PAiCE erprobt worden sind, kommt dabei eine entscheidende Rolle zu, weil sie relevante Akteure bündeln.

Inhalt

Executive Summary 4
1 Einleitung 6

2 Additive Fertigung und Zertifizierung: grundlegende Begriffe 8
2.1 Überblick zu additiven Fertigungsverfahren 8
2.1.1 Stereolithografie-Verfahren 9
2.1.2 Pulverbettverfahren 9
2.1.3 Material-Extrusions-Verfahren 10
2.1.4 Auftrag-Verfahren 11
2.2 Konformität, Prüfung und Zertifizierung von Assets 11
2.2.1 Standardisierung und Normung 11
2.2.2 Konformität und Prüfung 12
2.2.3 Zertifizierung und Prüfzeichen 12
2.2.4 Konformitätsbewertung und Akkreditierung 12

3 Konformität und Zertifizierung in der Additiven Fertigung 13
3.1 Prozesse der additiven Fertigung im Ersatzteilbau 13
Entwicklungs-Prozesskette 14
Fertigungs-Prozesskette 14
Logistik-Prozesskette 14
QS-Prozesskette bezogen das Bauteil 14
3.2 Konformitätsbedarfe und erste Lösungsansätze für die Zertifizierung 15
3.2.1 Qualifizierung und Zertifizierung der Dienstleister 15
3.2.2 Verlässlichkeit der Datenbereitstellung und Schutz des geistigen Eigentums . . . 16
3.2.3 Leistungsparameter der 3D-Druckprozesse 17
3.2.4 Qualifizierung additiv gefertigter Bauteile 18
3.3 Ausblick: Die Virtualisierung von Freigaben und Zertifizierungen 19

4 Fazit und Handlungsempfehlungen 21
5 Literaturverzeichnis 22
Anhang 23

A PAiCE-Projekte des 3D-Clusters 23
A.1 Add2Log 23
A.2 DigiKAM 24
A.3 SAMPL 25
A.4 VariKa 27

B Standards und Normen 27
B.1 Technische Regeln und Normen im Bereich der additiven Fertigung 27
B.2 Normen zu Qualitätsmanagementsystemen 28
B.3 Technische Regeln zu Maßhaltigkeit und Prüfmethoden 29
B.4 Technische Regeln zu Simulation und Virtuelle Inbetriebnahme 29

C Interview-Partner 30
D Glossar 30
E Abkürzungen 32

1 Einleitung

Von einigen bahnbrechenden und in den 1980er-Jahren zum Patent angemeldeten Erfindungen ausgehend, hat die Additive Fertigung in den letzten Jahrzehnten eine beeindruckende Entwicklung durchgemacht. In nahezu allen Branchen gibt es Nachfrage für den 3D-Druck unterschiedlichster Gegenstände aus Kunststoff, Keramik, Metall, aber auch aus Baustoffen wie Gips oder Beton. Insbesondere Branchen wie die Bahnindustrie, Luftfahrt oder Medizintechnik zählen heute zu den wichtigsten Abnehmern additiv gefertigter und qualitativ hochwertiger Objekte.

Während in der Vergangenheit beispielsweise die 3D-Stereolithographie für Rapid Prototyping genutzt wurde, um die Entwicklung und Optimierung von Produkten zu beschleunigen, werden additiv gefertigte Teile immer öfter zum eigentlichen Produkt. So stellt das Ersatzteilwesen im Rahmen des Obsoleszenz-Managements von Unternehmen heute ein wichtiges Anwendungsfeld für die additive Fertigung dar. Ein gutes Beispiel dafür bietet die lange Betriebslebensdauer von Schienenfahrzeugen. Diese erfordert die Bereitstellung von Ersatzteilen auch weit über den Zeitraum der Liefergarantie von Herstellern hinaus. Insbesondere im Falle betriebsrelevanter oder gar sicherheitskritischer Komponenten führt deren Nicht-Verfügbarkeit oder lange Beschaffungszeit zwangsläufig zum längerfristigen Ausfall von Fahrzeugen. Die Möglichkeit, solche Bauteile schnell additiv zu fertigen, erweist sich für Instandhaltungswerkstätten als ernstzunehmende Alternative zur erweiterten Lagerhaltung.

In der Bahn- und Luftfahrtindustrie ist es gängige Praxis, die benötigten Ersatzteile nicht selbst herzustellen, sondern diese an externe Fertigungsdienstleister zu vergeben. Die branchentypisch hohen Anforderungen an Sicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität betriebsrelevanter Komponenten bleiben jedoch bestehen. Diese zu erfüllen bedeutet, den gesamten Prozess der Additiven Fertigung von der Datenbereitstellung über den 3D-Druck bis hin zur Auslieferung des Bauteils zu beherrschen. Konformität mit den spezifizierten Vorgaben und Zertifizierungen für ihren Nachweis sind hier grundlegend für die vertrauensvolle Kollaboration des Auftraggebers mit seinen Dienstleistern und Partnern.

In regulierten Industrien[1] wie der Automobilbranche, dem Bahnsektor, der Luft- und Raumfahrt, dem Maschinenbau oder der Medizintechnik kostet es viel Zeit und Geld sicherheitskritische oder betriebsrelevante Bauteile zu qualifizieren. Entsprechend groß ist der Bedarf, durch Digitalisierung eine Beschleunigung der Qualitätssicherungsprozesse zu erreichen – ohne von den hohen Anforderungen an die Bauteilqualität oder die Güte der Herstellungsprozesse Abstriche machen zu müssen. Neuartige Konzepte wie der Digitale Zwilling oder die Nutzung von Künstlicher Intelligenz für zuverlässige Qualitätsprognosen versprechen Fortschritte nicht nur mit Blick auf die Bedarfe dieser Branchen, sondern auch auf die Massenfertigung individueller Konsumprodukte wie Sportschuhe oder ähnlichem.

Anliegen dieser Studie ist es, den Nutzen von Konformität und Zertifizierung für die Additive Fertigung aufzuzeigen, den Status Quo zu erfassen und Möglichkeiten der Vereinfachung durch Digitalisierung und Virtualisierung darzulegen. Der 3D-Druck basiert auf neuartigen Fertigungsverfahren mit Prozessabläufen, die sich von denen herkömmlicher Produktionsanlagen unterscheiden. Viele Fragen zur Konformität der Prozesse und

1 Branchen, deren Produkte oder Leistungen besonderen Auflagen, Bestimmungen, Verordnungen oder Vorschriften unterliegen.

Möglichkeiten der Zertifizierung sind noch nicht beantwortet. Wir präsentieren daher eine Momentaufnahme der aktuellen Diskussion und gehen neben ersten Standards, Normen und Zertifizierungen auch auf Forschungsarbeiten ein, die in diese Richtung weisen.

Die Studie entstand im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PAiCE (Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). In 17 Projekten arbeiten Unternehmen und Forschungseinrichtungen daran, den Einsatz digitaler Technologien in Produktion und Logistik in großen, praxisnahen Pilotprojekten zu erproben.

Grundlage der Studie sind neben einer eingehenden Literatur-Recherche insbesondere Experten-Interviews mit Vertretern von PAiCE-Projekten, die sich schwerpunktmäßig mit Additiver Fertigung auseinandersetzen, sowie mit der Deutschen Bahn und dem TÜV SÜD. Wir möchten uns an dieser Stelle für die Auskunftsbereitschaft und Offenheit aller Gesprächspartner bedanken. Eine Aufstellung mit den Namen der Beteiligten und deren Unternehmen bzw. Organisationen ist im Anhang wiedergegeben. Die Beiträge der Interview-Partner finden in den nachfolgenden Kapiteln ihren Niederschlag, ohne sie, wie vereinbart, direkt zu zitieren.

Die Studie gliedert sich in vier Kapitel. Dieser Einleitung folgt in Kapitel 2 eine Übersicht zu den verschiedenen im Markt etablierten Verfahren der Additiven Fertigung und eine kurze allgemeine Erläuterung des Konzeptes und Anliegens von Konformität, Prüfung und Zertifizierung.

Kapitel 3 setzt auf dieser Grundlage auf. Es beschreibt am Beispiel der Herstellung von Ersatzteilen den gesamten Prozess von der Entwicklung am CAD-System über den 3D-Druck bis hin zur Auslieferung des Bauteils. Anhand der hier erfassten einzelnen Prozessschritte und -schnittstellen wird die gesamte Bandbreite in Frage kommender Konformitätsanforderungen skizziert und Möglichkeiten ihres Nachweises durch Prüfung und Zertifizierung auf der Grundlage von Standards und Normen beschrieben. Besonderes Augenmerk liegt in diesem Kapitel auf der Qualifizierung von additiv gefertigten Bauteilen, die im Falle von Industrien mit hohen Anforderungen an die funktionale Sicherheit streng vorgeschrieben sind und sehr aufwändig sein können. Hier werden einige Ansätze zur systematischen Erfassung von Prozessdaten beschrieben, die als Voraussetzung für eine mögliche Digitalisierung von Prüfung, Zertifizierung und Bauteilfreigaben gesehen werden.

Die Studie wird abgerundet mit Kapitel 4, in dem die Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Kapitel zu einem Fazit verdichtet und eine Reihe von Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Konformität und Zertifizierungen im Bereich der Additiven Fertigung gegeben werden.

2 Additive Fertigung und Zertifizierung: grundlegende Begriffe

Diese Studie verknüpft mit der additiven Fertigung und der Zertifizierung zwei sehr unterschiedliche technische Fachgebiete, mit denen viele Leserinnen und Leser vermutlich nicht gleichermaßen gut vertraut sind. Der nachfolgende Abschnitt 2.1 führt daher in die Vielfalt der additiven Fertigungsverfahren ein, die sich bis heute etabliert haben. Abschnitt 2.2 gibt einen kurzen Überblick über die Konzepte der Konformität, der Prüfung und der Zertifizierung und ihrer besonderen Bedeutung für die Vertrauensbildung zwischen kollaborierenden Industriepartnern.

2.1 Überblick zu additiven Fertigungsverfahren

Additive Fertigung (additive manufacturing, AM) oder 3D-Druck beschreibt ein Verfahren zur Herstellung dreidimensionaler Objekte (Werkstücke) durch schichtweises Auftragen von Material. Bei der subtraktiven Fertigung werden dagegen von einem vorgegebenen Materialblock Schichten abgetragen, um ein Werkstück herzustellen. Additive Fertigung wird auch als generatives Verfahren bezeichnet, denn das physische Objekt wird in einem automatisierten Prozess unmittelbar aus einem 3D-CAD-Datensatz generiert.

Die Vielfalt möglicher Einsatzgebiete und Anwendungen in den verschiedenen Branchen und die unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich Bauteilgröße, Material, Belastbarkeit oder Zuverlässigkeit hat in den vergangenen Jahrzehnten die Entwicklung verschiedenster Verfahren veranlasst. Als Erfinder des 3D-Drucks gilt Charles Hull, der im Jahr 1984 ein Patent für das Fertigungsverfahren Stereolithografie anmeldete und 1987 den ersten kommerziellen Drucker dieses Typs auf den Markt brachte. Zwei weitere wichtige Patentanmeldungen folgten unmittelbar darauf: 1988 Carl Deckards Selektives Lasersintern (SLS) sowie 1989 das Fused Deposition Modeling-Verfahren von Scott Crump. Damit wurden innerhalb weniger Jahre die Grundlagen für alle heute verfügbaren 3D-Druck-Verfahren geschaffen.

Die Additive Fertigung bietet einige Vorteile: Sie erlaubt die Herstellung nahezu beliebig komplex gestalteter Gegenstände und ermöglicht signifikante Einsparungen an Volumen und Gewicht. Zudem eröffnet sie die Möglichkeit hoch-individueller Lösungen für Produkte, die spezifische Bedürfnisse abdecken. Der Personalaufwand ist dabei im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren gering, die Zahl der Prozessschritte niedrig und vor allem kann flexibel und schnell gefertigt werden. Das ist ein Grund dafür, warum die Herstellung von Prototypen und Fertigungswerkzeugen (rapid prototyping, rapid tooling) eine der ersten Anwendungen des 3D-Drucks war.

Als nachteilig erweist sich, dass additiv gefertigte Bauteile aufgrund ihres Schichtaufbaus eine rauere Oberfläche aufweisen (Treppenstufen-Effekt) und daher in der Regel nachbearbeitet werden müssen (vgl. Riemann und Guggenberger 2020). Zudem begrenzt der generative Herstellungsprozess die Möglichkeit, massenhaft zu fertigen. Herkömmliche Verfahren der Massenproduktion sind in dem Maße wirtschaftlicher als auf Individualisierungen der zu fertigenden Produkte verzichtet werden kann.

Additive Fertigung konnte sich als industrielles Verfahren etablieren, weil sowohl Unternehmen als auch Hersteller, Instandhaltungswerkstätten oder Ersatzteile-Händler immer öfter Bedarfe für Bauteile oder Fertigungswerkzeuge haben, die sie nicht selbst produzieren können oder wollen, diese zu komplex oder speziell sind oder nur in geringer Stückzahl benötigt werden. Stattdessen ziehen sie es vor, solche Objekte als Neu- oder Ersatzteile an externe Fertigungs-Dienstleister zu vergeben.[2]

2.1.1 Stereolithografie-Verfahren

Stereolithografie auch SLA- oder SLT-3D-Druck genannt, ist ein generatives Verfahren, bei dem ein flüssiges Photo-Polymer auf Epoxy-, Acryl- oder Vinylbasis in einem Tank mit Hilfe eines Lasers Schicht für Schicht verfestigt wird (siehe Abbildung 1). Das Objekt wird auf einer Plattform aufgebaut, die sich in kleinen Schritten nach unten bewegt. Nach der Fertigstellung wird das Bauteil mittels UV-Strahlung ausgehärtet. Dieses Verfahren wird vor allem für die Herstellung von Prototypen (rapid prototyping), aber auch von additiven Endprodukten (rapid manufacturing) eingesetzt.

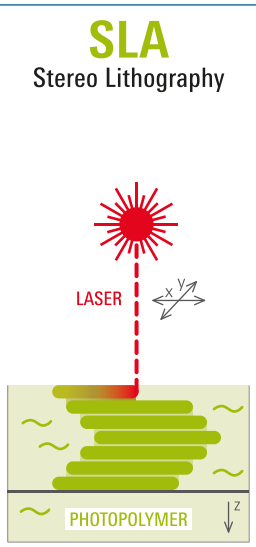


Abbildung 1: Prinzip des Stereolithografie im 3D-Druck (formnext; Steffen Ritter)

2.1.2 Pulverbettverfahren

Ähnlich wie SLA funktioniert das Pulverbettverfahren (powder bed fusion, PBF – vgl. 3DDrucker.de 2020). Auch hier wird das Produkt auf einer beweglichen Plattform aufgebaut, allerdings nicht in einer Flüssigkeit, sondern in einem Pulver (siehe Abbildung 2). Konkret handelt es sich um Materialien wie Kunststoff, Keramik oder Metall. In einem wannenförmigen Bauraum wird auf einer beweglichen Plattform eine durchgehende Pulverschicht ausgelegt. In den Bereichen, in denen das Werkstück entstehen soll, wird das Material gezielt mit Hilfe eines Bindemittels oder durch punktgenaues Schmelzen bzw. Sintern der beteiligten Pulverkörnchen flächig verfestigt. Anschließend wird die Bauform um eine Schichtstärke abgesenkt. Eine weitere durchgehende Pulverschicht wird aufgetragen und wieder werden entsprechende Teilflächen gezielt verfestigt. Dabei dient das überschüssige Pulver in den darunterliegenden Schichten als Stütze. Auf diese Weise wird Schicht für Schicht aufgebaut und es entsteht im Pulverbett das gewünschte Werkstück.

2 Alle Grafiken in diesem Abschnitt haben wir freundlicher Genehmigung von Prof. Dr. Steffen Ritter, Hochschule Reutlingen, dem formnext AM Field Guide entnommen (Richter 2019, www.formnext.com/amfieldguide, CC BY-NC-ND 4.0).

Je nach Konstruktion oder verwendetem Werkstoff werden zusätzliche Stützelemente mitaufgebaut, die am Ende des Druckprozesses ebenso wie das überschüssige Pulver entfernt werden. Ein Teil des Pulvers lässt sich je nach Werkstoff oder Qualitätsanforderung für den nächsten Druck wiederverwenden.

Auf dem Pulverbettverfahren basieren eine Reihe verschiedener 3D-Druck-Verfahren. Sie unterscheiden sich in der Art und Weise wie das jeweilige Pulver gebunden wird. Das kann durch den gezielten Einsatz von Bindemitteln, lokaler Wärmestrahlung, Laser oder Elektronenstrahlen erfolgen. Die verschiedenen Verfahren heißen entsprechend:

- Bindemittel-Spritzen (binder jetting, BJ)
- Selektives Wärme-Sintern (selective heat sintering, SHS)
- Selektives Laserschmelzen (selective laser melting, SLM)
- Selektives Laser-Sintern (selective laser sintering, SLS)
- Selektives Elektronenstrahlschmelzen (electron beam melting, EBM)

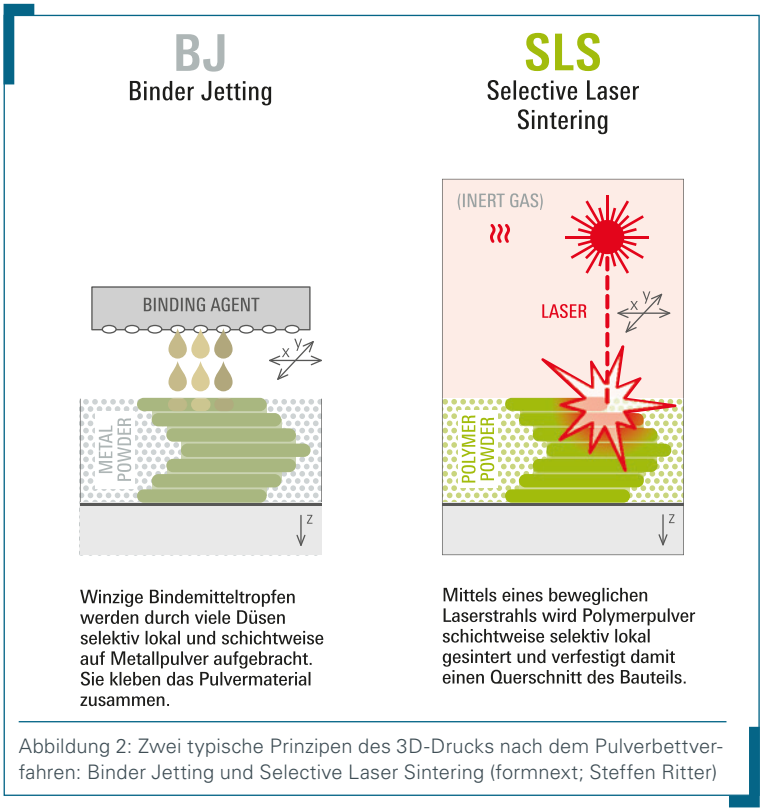


Abbildung 2: Zwei typische Prinzipen des 3D-Drucks nach dem Pulverbettverfahren: Binder Jetting und Selective Laser Sintering (formnext; Steffen Ritter)

2.1.3 Material-Extrusionsverfahren

Beim Material-Extrusionsverfahren (fused deposition modeling, FDM) wird thermoplastisches Material als Kunststoffdraht (Filament) in Düsen am Druckkopf gepresst und dort erhitzt (siehe Abbildung 3). Mit dem verflüssigten Werkstoff generiert der Druckkopf eine dünne Schicht mit den vorgegebenen Abmessungen. Sobald sich diese Schicht gefestigt hat, werden in gleicher Weise die nächste und alle folgenden Schichten aufgetragen, bis das Werkstück fertiggestellt ist.

Eine Variante des FDM ist das Verfahren Multi Jet Fusion (MJF), das höhere Genauigkeit und deutlich schnelleren Druck ermöglicht. Hiermit sollen sich bis zu 5.000 Bauteile wirtschaftlich additiv fertigen lassen (vgl. 3Faktur 2020).

Auf dem Konzept der Extrusion basierend lässt sich auch metallisches Material durch erhitzte Düsen der entsprechenden Druckköpfe in zeilenförmigen Bahnen Schicht für Schicht aufbauen (metal extrusion, metal-FDM). Das Material wird hier in Form eines Metalldrahtes oder -strangs zugeführt (vgl. Riemann und Guggenberger 2020). Im Vergleich zu PBF soll mit Metal-FDM ein schnellerer Aufbau möglich sein.

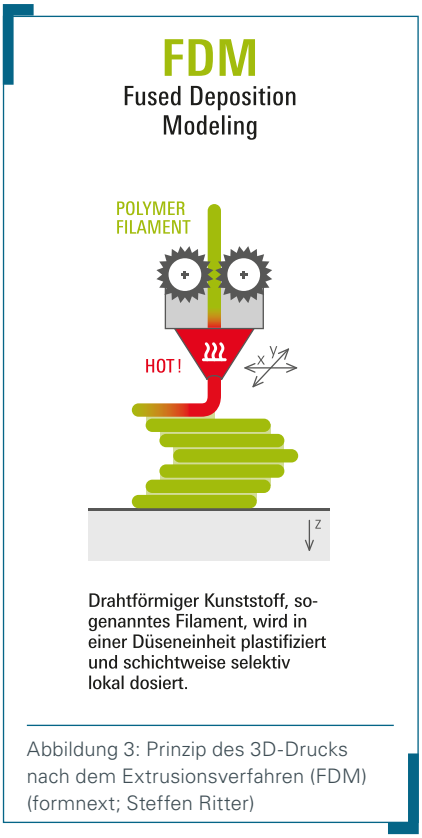


Abbildung 3: Prinzip des 3D-Drucks nach dem Extrusionsverfahren (FDM) (formnext; Steffen Ritter)

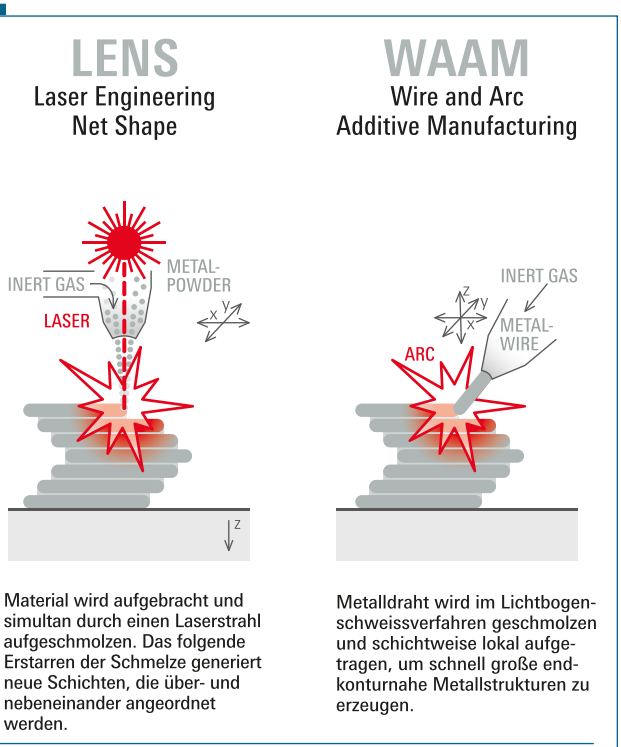


Abbildung 4: Zwei typische Prinzip des 3D-Drucks nach dem Auftrag-Verfahren: Laser Engineering Net Shape und Wire and Arc Additive Manufacturing (formnext; Steffen Ritter)

2.1.4 Auftragverfahren

Das Auftragverfahren basiert auf dem traditionellen Auftragschweißen, bei dem mit Hilfe eines Zusatzwerkstoffs durch Schweißen Volumen aufgebaut wird. Bei dem Laser Metal Deposition (LMD-) oder Direct Energy Deposition (DED-)Verfahren (siehe Abbildung 4) wird Metallpulver über eine Düse aufgetragen und im Schmelzbad eines Lasers oder Elektronenstrahls geschmolzen. Das verflüssigte Metall erstarrt unmittelbar nach dem Prozess. Beide Verfahren eignen sich für die Herstellung von Komponenten aus unterschiedlichen Legierungen und insbesondere für die Reparatur von Bauteilen wie Turbinenschaufeln oder beschädigten Propellern.

Beim Lichtbogen-Draht-Auftragschweißen (wire arc additive manufacturing, WAAM) erfolgt das lokale Schmelzen einer metallischen Substratplatte mit Hilfe eines Lichtbogens (vgl. Michel 2020). Ein Metalldraht wird in das Schmelzbad geführt. Mit der Bewegung des Brenners und des Drahtes kann entlang einer beliebigen Kontur Material aufgetragen werden.

2.2 Konformität, Prüfung und Zertifizierung von Assets

Zertifizierung ist eine standardisierte und seit vielen Jahren praktizierte Methodik für die Schaffung von Vertrauen zwischen kollaborierenden Partnern. Grundsätzlich lassen sich Produkte, Systeme, Prozesse, Dienstleistungen, Personen oder Organisationen zertifizieren. Voraussetzung für solche „Assets" ist das Vorhandensein von Eigenschaften, die sich testen oder prüfen lassen, um eine Zertifizierung durchzuführen. Dabei ist Zertifizierung kein Selbstzweck, sondern Ausdruck dafür, welche Bedeutung dem Asset im Hinblick auf das erwartete Ergebnis gegeben wird. Zudem besteht auch die Möglichkeit der Selbsterklärung eines Unternehmens über die Sicherheit oder Qualität seines Produktes – deren Anerkennung natürlich voraussetzt, dass man diesem Unternehmen vertraut.

Ein Glossar mit den in diesem Zusammenhang wichtigen Begriffen findet sich im Anhang D.

2.2.1 Standardisierung und Normung

Grundlage der Prüfung und Zertifizierung eines Assets ist die Standardisierung oder Normung bestimmter Eigenschaften dieses Assets.

Dabei versteht man unter Standardisierung eine technische Regelsetzung beispielsweise durch Personen, Unternehmen, Organisationen, Institute oder Behörden – sogenannte interessierte Kreise –, die sich mit ihrer Beteiligung Vorteile für ihre Arbeit erhoffen. Eine Besonderheit der Standardisierung ist, dass der Kreis der Interessierten nicht vollständig sein muss, die Öffentlichkeit also nicht zwingend bei der Finalisierung der Regelsetzung eingebunden sein muss.

Das steht im Gegensatz zur Normung: Hier ist die Vereinheitlichung der Regelsetzung im Konsens mit allen interessierten Kreisen das eigentliche Anliegen, in der Erwartung, dass das Ergebnis dann auch zum Nutzen der Allgemeinheit sein wird.

2.2.2 Konformität und Prüfung

Konformität bedeutet die Übereinstimmung bestimmter Eigenschaften eines Assets mit entsprechenden Standards oder Normen. Der Nachweis der Konformität erfolgt durch Tests oder Prüfungen. Dabei versteht man unter einem Test die Untersuchung von Eigenschaften des Assets nach definierten Vorgaben. Eine Prüfung stellt eine Sequenz von Tests dar, die in ihrer Summe alle Vorgaben der entsprechenden Standards oder Normen abdecken.

2.2.3 Zertifizierung und Prüfzeichen

Als Zertifizierung wird ein Verfahren bezeichnet, mit dem die Einhaltung bestimmter Anforderungen nachgewiesen wird.

Der Zertifizierungsprozess ist ein Vorgang, den ein Asset durchlaufen muss, um zertifiziert zu werden und damit ein Zertifikat oder Prüfzeichen zu erhalten.

Zertifikate wie auch Prüfzeichen werden von unabhängigen Zertifizierungsstellen vergeben.

Ein Zertifizierungsprogramm umfasst ein Regelwerk, das Prüfungen und Zertifizierungen nach festgelegten Kriterien ermöglicht.

Als Prüfzeichen werden grafische oder schriftliche Markierungen bezeichnet, welche die Einhaltung bestimmter Kriterien wie Sicherheit oder Qualität anzeigen.

2.2.4 Konformitätsbewertung und Akkreditierung

Konformitätsbewertung ist ein in der Norm DIN EN ISO/IEC 17000 definierter Begriff, der sich auf die Erfüllung von Anforderungen bezieht, die beispielsweise von Produkten, Prozessen, Systemen oder Personen erfüllt werden müssen.

Prüfung, Inspektion und Zertifizierung sowie Validierung und Verifizierung werden als unterschiedliche Formen der Konformitätsbewertung angesehen. Entsprechend werden Laboratorien, Inspektions- und Zertifizierungsstellen allgemein als Konformitätsbewertungsstellen bezeichnet. Diese Stellen müssen akkreditiert sein, das heißt ein Verfahren durchlaufen haben, in dem sie gegenüber einer unabhängigen Akkreditierungsstelle nachweisen, dass sie fachlich kompetent arbeiten und dabei alle gesetzlichen und normativen Anforderungen erfüllen. Hierzulande sorgt die (nationale) Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS[3]) entsprechend der Verordnung (EG) Nr. 765/2008 und dem Akkreditierungsstellengesetz für das notwendige transparente Akkreditierungssystem.

Konformität eines Produktes mit festgelegten Anforderungen wird mit einer Kennzeichnung bescheinigt. Bei Übereinstimmung mit den Anforderungen des deutschen Produktsicherheitsgesetzes wird das sogenannte GS-Zeichen vergeben. Im Falle von entsprechenden Rechtsvorschriften im Rahmen des Europäischen Gemeinschaftsrechts wird eine sogenannte CE-Kennzeichnung erforderlich. Diese erfolgt auf der Grundlage einer Selbsterklärung des Herstellers, auch CE-Erklärung genannt, welche voraussetzt , dass eine „benannte Stelle“[4] stichprobenartig bestimmte Aspekte der Produktion oder des Produktes prüft. Dafür muss auch das Qualitätssicherungssystem des Herstellers von einer „benannten Stelle“ anerkannt und überwacht sein.

3 In Deutschland ist es die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS, www.dakks.de).
4 Eine benannte oder notifizierte Stelle (notified body) der Europäischen Union ist eine private Prüf-, Auditier oder Zertifizierungsstelle, die staatlich anerkannt und überwacht ist.

3 Konformität und Zertifizierung in der Additiven Fertigung

Die industrielle Additive Fertigung hat die Schwelle zur Serienproduktion erreicht: Immer mehr Materialien lassen sich immer schneller in immer besserer Qualität drucken. Die Qualität additiv gefertigter Bauteile exakt reproduzierbar sicherzustellen, ist allerdings eine Herausforderung, denn sie setzt die vollständige Reproduzierbarkeit der Herstellungsprozesse und der verwendeten Materialien voraus. Diese Anforderung betrifft gleichermaßen in Serie gefertigte Bauteile wie individuell gefertigte Spezialteile.

Aktuell ist die Produktion von Ersatzteilen eines der Hauptanwendungsfelder der additiven Fertigung. Wir betrachten daher Konformitätsbedarfe und erste Ansätze für die Zertifizierung des 3D-Drucks in diesen Prozessen. In der Praxis zeichnet sich dafür bereits hoher Handlungsbedarf ab, weil selbst Branchen mit hohen Sicherheitsanforderungen an ihre Produkte wie der Automobilbau, die Bahn- und die Luftfahrtindustrie vielfach schon auf die additive Fertigung setzen.

In Abschnitt 3.1 werden idealtypisch die relevanten Prozessschritte und -schnittstellen der Additiven Fertigung von Ersatzteilen erfasst und kommentiert. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.2 geeignete Konformitätsanforderungen formuliert und erste Lösungsansätze für die Zertifizierung vorgestellt. In Abschnitt 3.3 stellen wir abschließend das Konzept der virtuellen Freigabe und Zertifizierung vor, das verspricht, die Qualifizierung additiv gefertigter Bauteile und der zugehörigen Fertigungsanlagen durch Digitalisierung wesentlich zu beschleunigen.

3.1 Prozesse der additiven Fertigung im Ersatzteilbau

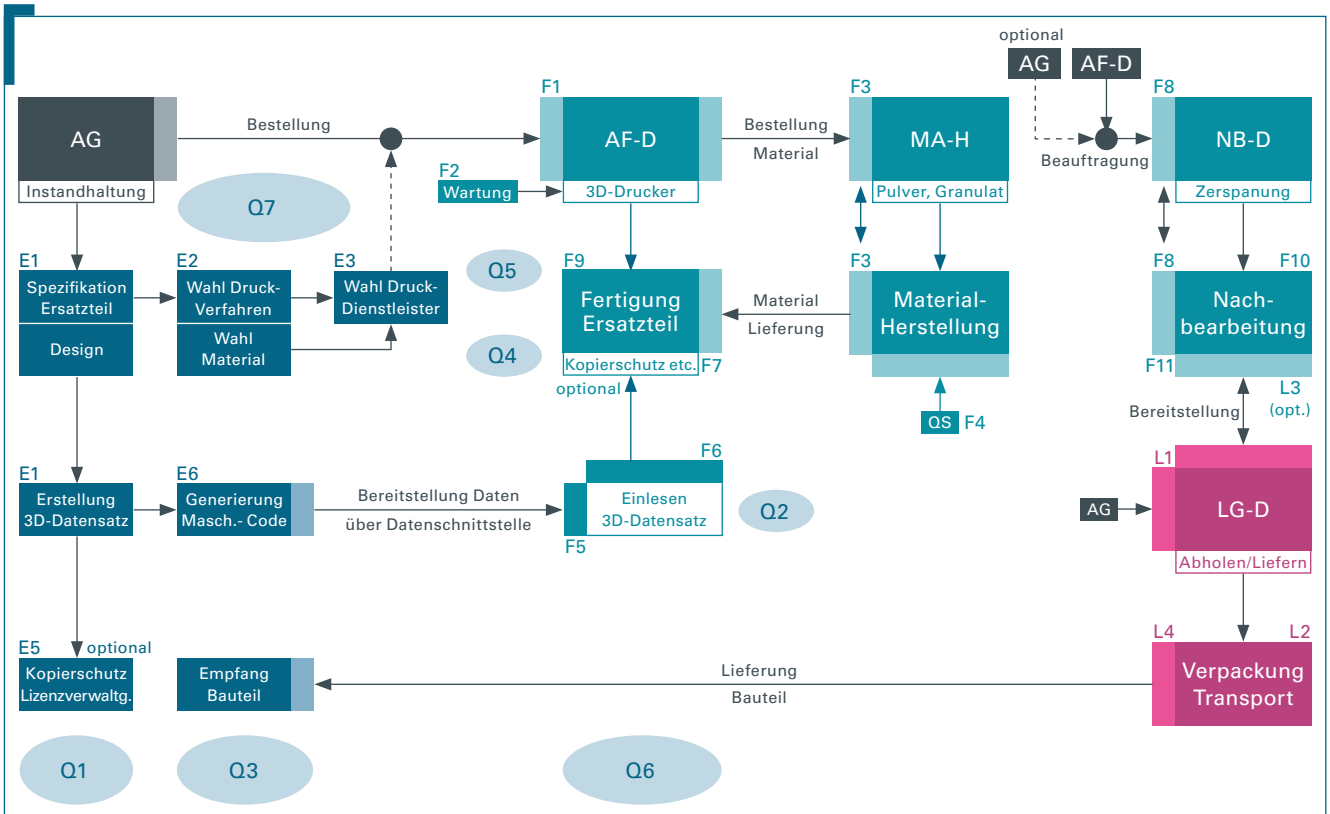
Die Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile werden im Wesentlichen durch das gewählte Druckverfahren und das verwendete Material bestimmt. Es kann daher notwendig sein, auf das Verfahren und auf den Werkstoff bezogen entsprechende Nachweise zu erbringen. Auch die Befähigung der additiven Fertigungsstätte, Bauteile exakt wie spezifiziert zu fertigen, könnte nachzuweisen sein. Dies wird insbesondere dann wichtig, wenn betriebsrelevante oder sicherheitskritische Bauteile betroffen sind.

Abbildung 5 gibt einen idealtypischen Überblick über die im Falle der additiven Fertigung von Ersatzteilen involvierten Parteien, deren Schnittstellen, Aufgaben und Beiträge zur Qualitätssicherung. Diese Darstellung visualisiert den Gesamtprozess, der sich in die Teilprozesse Entwicklung (E), Fertigung (F), Logistik (L) und Qualitätssicherung (Q) gliedert.

Am Prozess sind folgende Parteien beteiligt:

- Auftraggeber (AG): Inhaber der 3D-Design- und -Druckdaten und Besteller des benötigten Ersatzteils.
- Dienstleister für Additive Fertigung (AF-D): Lohnfertiger, der eine entsprechende 3D-Druckmaschine betreibt und befähigt ist, das angeforderte Ersatzteil mit den spezifizierten Eigenschaften zu fertigen.
- Materialhersteller (MA-H): (Chemie-)Unternehmen, das in der Lage ist den benötigten Werkstoff in der für das Druckverfahren erforderlichen Materialität (Flüssigkeit, Pulver, Filament, Draht) und Qualität bereitzustellen.
- Nachbearbeitungs-Dienstleister (NB-D): Ein auf die Nachbearbeitung (Zerspanung) oder Veredlung von Bauteilen spezialisiertes Unternehmen, das für die exakte Maßhaltigkeit des gefertigten Ersatzteils sorgt.

- Logistik-Dienstleister (LG-D): Ein im Rahmen der additiven Fertigung von Bauteilen für die (Zwischen-)Lagerung, Verpackung, Abholung, Transport oder Anlieferung der Ersatzteile beauftragte Unternehmen.



Anforderungen:
- Qualifizierung AF-D, MA-H, NB-D, LG-D
- Datenbereitstellung/Kopierschutz
- Leistungsfähigkeit Druckmaschine
- Qualifizierung Bauteil

AG Auftraggeber
AF-D Fertigungsdienstleister
NB-D Nachbearbeiter
LG-D Logistik-Dienstleister
MA-H Materialhersteller

E = Entwicklungs-Prozesskette
- E1: Spezifikation der Bauteil- und Material-Eigenschaften
- E2: Wahl des 3D-Druckverfahrens
- E3: Wahl des Fertigungsdienstleisters
- E4: Generierung des vollständigen Bauteil-Datensatzes
- E5: Optional: Ergänzung um Kopierschutz oder Lizenz-Verwaltungsfunktion
- E6: Umwandlung des Datensatzes in maschinenlesbaren Code für 3D-Drucker

Q = QS-Prozesskette Bauteil
- Q1: Spezifikation der Bauteil-Qualitätsanforderungen
- Q2: Eingangsprüfung: Konsistenz und Integrität des 3D-Druck-Datensatzes
- Q3: Eingangsprüfung: Vergleich gefertigtes Bauteil mit 3D-Daten
- Q4: Qualifizierung des Fertigungsprozesses im Rahmen der Bauteilqualifizierung
- Q5: Optional: Einfrieren des Fertigungsprozesses inklusive Materialwahl
- Q6: Qualifikation des Bauteils: Belastungstests nach Vorgaben wie spezifiziert
- Q7: Freigabe des qualifizierten Bauteils für den Einsatz

Zu Q5: In einer streng regulierten Branche wie der Luftfahrtindustrie wird die Qualifizierung sicherheitskritischer Bauteil um diesen Prozessschritt ergänzt.

F = Fertigungs-Prozesskette
- F1: Kundenschnittstelle und Auftragssystem des Fertigungs-Dienstleisters
- F2: Überprüfung der Eigenschaften des 3D-Druckers
- F3: Kundenschnittstelle und Auftragssystem des Material-Herstellers
- F4: Überprüfung der Material-Eigenschaften und Material-Qualität
- F5: Schnittstelle für den Empfang des 3D-Druck-Datensatzes
- F6: Schutz der 3D-Druckdaten vor Fälschung oder Manipulationen
- F7: Optional: Schutz des geistigen Eigentums des Auftraggebers an 3D-Druck-daten
- F8: Optional: Kundenschnittstelle und Auftragssystem des Bauteil-Nach-bearbeiters
- F9: Additive Fertigung des Bauteils
- F10: Nachbearbeitung des Bauteils
- F11: Überprüfung des Bauteils vor der Auslieferung

L = Logistik-Prozesskette
- L1: Kundenschnittstelle und Auftragssystem des Logistik-Unternehmens
- L2: Lagerung, Verpackung und Transport des Bauteils
- L3: Optional: Auslieferung des Bauteils an Nachbearbeiter
- L4: Auslieferung des Bauteils an Auftraggeber

Abbildung 5: Prozessdarstellung für die Additive Fertigung von Ersatzteilen

3.2 Konformitätsbedarfe und erste Lösungsansätze für die Zertifizierung

Die graphische Darstellung in Abbildung 5 veranschaulicht die Komplexität der verschiedenen Einflüsse auf die Konformität eines additiv gefertigten Bauteils mit der Spezifikation des Auftraggebers und dessen Erwartungen an Qualität und Sicherheit. Jedes der verschiedenen Prozess-Elemente der Additiven Fertigung korrespondiert mit einer bestimmten Konformitätserwartung. Beispielsweise kann ein schlecht funktionierendes Auftragssystem Missverständnisse verursachen, die einen Terminverzug zur Folge haben. Die Verwendung eines mangelhaften Werkstoffs kann die Qualität oder sogar die Sicherheit des Bauteils beeinträchtigen. Unprofessionelle Nacharbeit wird die Maßhaltigkeit des Bauteils verschlechtern. Und so weiter.

Die Prüfung oder allgemeiner die Qualifikation des Bauteils ist somit eine Aufgabe, die den gesamten Prozess von der Bauteilentwicklung bis hin zur Bauteilauslieferung umfasst. Im Falle betriebsrelevanter oder sicherheitskritischer Bauteile wird das zu einer großen Aufgabe.

Bei eingehender Betrachtung der Prozesselemente in den Teilprozessen Entwicklung, Fertigung, Logistik und Qualitätssicherung lassen sich vier Schwerpunkte ausmachen, auf die sich Konformitätsanforderungen beziehen lassen. Diese sind:

- Qualifizierung und Zertifizierung der Dienstleister
- Verlässlichkeit der Datenbereitstellung und Schutz des geistigen Eigentums
- Leistungsparameter der 3D-Druckprozesse
- Qualifizierung additiv gefertigter Bauteile

Diese Konformitätsschwerpunkte werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert und mit Blick auf die in Abschnitt 3.1 identifizierten Prozesselemente eingeordnet. Zugleich werden die in diesem Zusammenhang relevanten existierenden Regelsetzungen und Normen genannt.

3.2.1 Qualifizierung und Zertifizierung der Dienstleister

Der Besteller eines Bauteils ist daran interessiert, dass der beauftragte Fertigungsdienstleister wie auch dessen Zulieferer und Partner befähigt sind, das Bauteil exakt wie spezifiziert zu fertigen und dafür zu sorgen, dass es die erwarteten Eigenschaften aufweist. Im Idealfall legt der Dienstleister einen Befähigungsnachweis vor, den er im Rahmen einer Qualifizierung durch eine unabhängiges Prüfhaus erworben hat.

TÜV SÜD Product Service verfügt als bislang einziger Anbieter über ein entsprechendes Prüfprogramm, das auf bestehenden Normen basiert (TÜV SÜD 2020). In diesem Programm wird die Dienstleistungskompetenz einer industriell ausgerichteten additiven Fertigungsstätte gemessen. Dafür werden das Auftragssystem und die Schnittstelle zum Kunden (vgl. Prozesselemente vgl. F1-F5, L1-L4 in Abbildung 5) wie auch die relevanten Aspekte der Bauteil-Qualität (vgl. F6-F11, Q1-Q6) berücksichtigt. Die explizite Qualifizierung des Bauteils für den Einsatz im Zielsystem (vgl. Q7) zählt nicht dazu.

Die Prüfung erfolgt in Form von Audits durch Experten, die sich zunächst auf technologieübergreifende Anforderungen beziehen. Grundlage dafür ist neben einer Vielzahl technischer Regeln und Normen (siehe Anhang B.1) vor allem die DIN SPEC 17071, die einen

Leitfaden für qualitätsgesicherte additive Fertigungsprozesse darstellt. Sie wurde angesichts des derzeit bestehenden Mangels an Regelsetzungen und Normen zur Additiven Fertigung von führenden Unternehmen – der Deutschen Bahn, MT Aerospace und Siemens-Mobility – erarbeitet und im Dezember 2019 veröffentlicht. Sie ist der Vorläufer einer zukünftigen ISO/ASTM-Norm. Die Audits adressieren auch technologie-spezifische Anforderungen wie sie beispielsweise im Richtlinienpaket VDI 3405 „Laser-Sintern, Strahlschmelzen und Bauteilfertigung […]" beschrieben werden. Ebenso werden die Maßhaltigkeit z. B. mit DIN EN ISO 1302 und die Prüfmethodik z. B. mit DIN EN ISO 60 und DIN EN ISO 61 berücksichtigt.

Die Befähigung als Dienstleister wird auch durch das Qualitätsmanagementsystem (QMS) entlang der Wertschöpfungskette der additiven Fertigungsstätte bestimmt. Das Audit zum QMS bezieht die Unternehmensführung, das Kunden- und Auftragsmanagement, die Produktionsplanung, den 3D-Druck und die Nachbearbeitung mit ein (siehe Anhang B.2). Ein durch TÜV SÜD auditiertes Unternehmen erhält ein Zertifikat als „industrielles AM-Fertigungszentrum", das in der Lage ist, vergleichbare und reproduzierbare Ergebnisse sicherzustellen. Dieses Zertifikat dient als Basis für die Qualitätssicherung additiv gefertigter Bauteile, ohne damit die im Falle sicherheitskritischer Anwendungen vorgeschriebene Bauteilqualifizierung selbst zu ersetzen.

3.2.2 Verlässlichkeit der Datenbereitstellung und Schutz des geistigen Eigentums

Der Auftraggeber hat es als Besteller in hohem Maße selbst in der Hand, die Maßhaltigkeit und Qualität des additiv gefertigten Bauteils sicherzustellen, denn er selbst generiert den 3D-Datensatz einschließlich aller erforderlichen Informationen zur additiven Fertigung und stellt diesen dem Dienstleister zur Verfügung (siehe Prozesselemente E1, E4-E6). Dafür benötigt er ein funktionierendes IT-System, das u. a. ein CAD-Entwicklungssystem, gegebenenfalls einen Bauteil-3D-Scanner, eine Spezialsoftware zur Generierung des maschinenlesbaren Codes für den 3D-Drucker usw. umfasst. Zudem braucht er eine sichere Datenschnittstelle zum Fertigungsdienstleister, um die Qualität und Integrität seines 3D-Datensatzes zu gewährleisten. Der Dienstleister als Auftragnehmer wiederum muss in der Lage sein, mit den bereitgestellten Daten vertraulich umzugehen und sie vor Änderungen, Manipulationen oder Diebstahl zu schützen (siehe Prozesselemente F5-F7).

Auch das erforderliche Druckverfahren und die Wahl des Werkstoffs liegen in der Verantwortung des Auftraggebers (siehe E2, E3). Falls ihm dafür die Erfahrung fehlt, benötigt er Beratung oder eine Plattform, über die er Kontakt zu kompetenten Dienstleistern aufnehmen kann.

Die Entwicklung und Bereitstellung solcher Software-Plattformen war das Anliegen dreier Projekte im PAiCE-Technologieprogramm. Diese befassten sich mit verschiedenen Aspekten der additiven Fertigung: Bei DigiKAM (siehe Anhang A.2) geht es um die effiziente branchenübergreifende Vernetzung von verschiedensten Anwendern und Dienstleistern auf einer Plattform, deren Anliegen es insbesondere ist, für KMU mittels Know-how- und Servicevermittlung eine niederschwellige Nutzung additiver Fertigungsmethoden zu ermöglichen. Das Projekt Add2Log (siehe Anhang A.1) geht noch einen Schritt weiter: Hier erhalten Unternehmen konkret die Möglichkeit, über eine Kollaborationsplattform verbindliche Angebote für den 3D-Druck von Bauteilen einzuholen, entsprechende Aufträge zu platzieren und sich die additiv gefertigten Bauteile liefern zu lassen. Das Projekt SAMPL (siehe Anhang A.3) legt seinen Fokus auf die Absicherung von 3D-Druck- und Logistik-Prozessen mittels

RFID-Kennzeichnung und die Anwendung der Blockchain-Technologie zur sicheren Handhabung von Drucklizenzen.

Mit Hilfe einer Kollaborations-Plattform, wie sie etwa von DigiKAM oder Add2Log konzipiert wurde, kann sich der Auftraggeber von der Last der Suche nach einem geeigneten qualifizierten Fertigungsdienstleister (siehe Prozesselement E3) oder der Wahl des 3D-Druckverfahrens (siehe E2) und des erforderlichen Materials (siehe E1) befreien, denn der Plattform-Betreiber übernimmt einen großen Teil der Verantwortung (siehe F1, F5-F8, L1 im Fall von Add2Log) und ermöglicht dem Auftraggeber, sich für das vorteilhafteste Angebot zu entscheiden.

Die Plattform SAMPL ermöglicht dem Auftraggeber, seine Bauteildaten als geistiges Eigentum zu schützen (siehe F7) und Fälschungen oder Manipulationen (siehe F6) von vornherein auszuschließen (vgl. Projekt SAMPL - Kopierschutz und Lizenzverwaltung mittels Blockchain-Technologie 2019). Das ist eine sehr wichtige Anforderung insbesondere im Hinblick auf Medizinprodukte oder betriebsrelevante und sicherheitskritische Ersatzteile für die Bahn oder Luftfahrt.

Mit Blick auf die prototypischen Kollaborations-Plattformen in PAiCE wird deutlich, in welchem Umfang die Digitalisierung im Bereich der Additiven Fertigung zur Realität wird. Entsprechend lässt sich das Thema Konformität und Zertifizierung im Wesentlichen in den Bereichen Qualitätsmanagementsystem (QMS) und IT-Umgebung verorten. Das heißt, neben der von TÜV SÜD angebotenen Zertifizierung der Dienstleistungsbefähigung geht es in erster Linie um die Gewährleistung der Informationssicherheit und des Datenschutzes, mit dem entsprechenden Prüf- und Zertifizierungsvorgehen im Falle komplexer IT-Systeme und den zugehörigen Standards und Normen (siehe Anhang B.4).

3.2.3 Leistungsparameter der 3D-Druckprozesse

Die Eigenschaften eines additiv gefertigten Bauteils hängen in erster Linie von der in der Maschine integrierten 3D-Druck-Technologie ab und vom Werkstoff des Materialherstellers und das unabhängig von den übrigen als relevant erkannten Kriterien. Eine Herausforderung des Fertigungsdienstleisters ist, auf die Kompetenz und Verantwortung des 3D-Druckmaschinen-Herstellers, des zuständigen Wartungsunternehmens und des Materialherstellers zu vertrauen. Zudem hat er die Reproduzierbarkeit seines Herstellungsprozesses (siehe Q4-Q5, Abbildung 5) und der Bauteilqualität (siehe Q6-Q7, Abbildung 5) sicherzustellen, denn das ist es, was der Auftraggeber als Unternehmen einer Branche wie dem Automobilbereich, dem Maschinenbau, dem Bahnsektor, der Luft- und Raumfahrt, der Prozess- und Industrieanlagen oder der Medizintechnik fordern muss (siehe Anhang B.1 und B.3).

Die Reproduzierbarkeit von Herstellungsprozessen und die Qualität additiv gefertigter Bauteile wie auch daraus abzuleitende Konformitätsbedarfe als Grundlage zukünftiger Prüfungen und Zertifizierungen sind Gegenstand einer Reihe wichtiger technisch-wissenschaftlicher Aktivitäten verschiedener Organisationen:

- Der VDI führt seit einigen Jahren gemeinsam mit anderen Instituten und Fertigungsdienstleistern wiederholt Ringversuche zur Analyse von 3D-Druckprozessen durch, um die Bedingungen für reproduzierbare Bauteilqualität zu erfassen und diese in Richtlinien der VDI-3405-Reihe zu veröffentlichen (vgl. Käfer 2017; VDI 2020). Die gewonnenen Informationen und Daten werden auch in Simulationsmodellen verwendet, welche zum Ziel haben, die Voraussetzungen für die Virtualisierung von Zertifizierungsprozessen zu schaffen.

- Das Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT) ist dabei, Bedingungen für den 3D-Druck von Komponenten zu spezifizieren, die es erlauben, auf verschiedenen 3D-Druckern identische Qualitäten zu erzielen. Als Orientierung dienen die Güteklassen für Guss-Qualitäten, die sich z. B. auf die Oberflächenrauigkeit oder mechanischen Eigenschaften von Bauteilen beziehen. Auf der Grundlage dieser Klassifizierung könnte die Qualifizierung von 3D-Druck-Dienstleistern und die Zertifizierung ihrer Druckmaschinen und Bauteile erfolgen. Der Auftrag für ein 3D-Druck-Bauteil einer bestimmten Güteklasse ließe sich damit auf solche Dienstleister eingrenzen, die sich für die entsprechende Güteklasse qualifiziert haben und über entsprechende Zertifikate verfügen.
- Das International Center for Turbomachinery Manufacturing (ICTM), eine Kooperation von Fraunhofer-Gesellschaft und RWTH Aachen, sammelt Daten, die beim 3D-Druck von Turbinenteilen anfallen und übermittelt diese in ein Experten-Netzwerk. Anhand dieser Daten sollen Simulationsmodelle generiert werden, die es erlauben, auf Basis des gewählten Druckverfahrens und der Materialparameter den Prozess der Additiven Fertigung zu simulieren und die Eigenschaften 3D-gedruckter Bauteile vorherzusagen. Ziel ist es, dieses digitale Modell zu einem Digitalen Zwilling der additiven Fertigungsstätte auszubauen, der die Anlage über den gesamten Lebenszyklus begleitet.
- TÜV SÜD arbeitet am Konzept der digitalen Bauteil-Zertifizierung (digital part report). Hiernach sollen additiv gefertigte Bauteile künftig mittels eines digitalen Fingerabdrucks automatisiert und standortübergreifend zertifiziert und überwacht werden können. Dieser Report aggregiert und filtert die relevanten Daten entsprechend der Anforderungen im offiziellen Zulassungsprozess (Reischle, Rehberger und Schmidt 2019).

In all diesen Aktivitäten geht es um die Sammlung größerer Datenmengen, um die Zusammenhänge zwischen Herstellungsprozess und reproduzierbarer Bauteilqualität systematisch zu erfassen und diese in Simulationsmodelle einzuspeisen, die eine Virtualisierung von Bauteilfreigaben mit Hilfe verlässlicher Prognosen ermöglichen sollen. Diesen Gedanken greifen wir wieder auf, nachdem wir uns mit der letzten Konformitätsanforderung beschäftigt haben, der Qualifizierung im 3D-Druck hergestellter Bauteile.

3.2.4 Qualifizierung additiv gefertigter Bauteile

Die Qualifizierung von additiv gefertigten Bauteilen kann je nach Anwendung sehr aufwändig ausfallen, beispielsweise weil für Tests bestimmte Eigenschaften variiert werden müssen und daher zahlreiche Muster benötigt werden oder weil Bauteile für Tests in das Zielsystem einzubauen sind und dieses daher zeitweise nicht mehr für den Regelbetrieb zur Verfügung steht.

Ein typisches Beispiel ist der im Rahmen des PAiCE-Projektes VariKa (siehe Anhang A.4) entwickelte Batterieträger für Elektroautos, der sich aus konventionellen Aluminiumteilen für den Rahmen und hoch-individuellen additiv gefertigten Verbindungselementen (sogenannten Strukturknoten) aus der Aluminiumlegierung AW 6063 zusammensetzt.

Herausforderung ist hier die Vielfalt an Batterieträger-Varianten für verschiedene Fahrzeugtypen bei zugleich geringer individueller Stückzahl. Eine herkömmliche Bauteilqualifizierung wäre angesichts der vorgesehenen Variantenvielfalt kaum wirtschaftlich. Stattdessen bietet sich hier eine sorgfältig durchgeführte Qualifizierung des Herstellungsprozesses an (siehe Prozesselemente F1-F11, Abbildung 5), in der Erwartung, dass ein exzellent beherrschter Prozess bereits reproduzierbare Bauteilqualität garantiert (siehe Q7, Abbildung 5). Vorteil

dieses Vorgehens ist es, dass der Herstellungsprozess nur einmal zu qualifizieren ist und sich damit die Qualifizierung der Bauteilserie vereinfachen lässt. In vielen Branchen, zu denen auch der Automobilsektor zählt, ist allerdings heute sowohl die Qualifizierung des Herstellungsprozesses als auch des Bauteils vorgeschrieben. Die entsprechenden Standards und Normen zur Bauteilqualifizierung sind u. a. in Anhang B.3 aufgeführt.

Ein anderes Beispiel betrifft ein Ersatzteil für ICE-Züge der Deutschen Bahn. Es handelt sich um ein über 17 Kilogramm schweres, betriebsrelevantes Bauteil, eine sogenannte Kastenkulisse, die unter dem Wagenkasten montiert wird und für den sicheren Lauf des Wagens in engen Kurven sorgt. Dieses Ersatzteil hätte, konventionell hergestellt, eine sehr lange Lieferzeit und würde das betroffene Fahrzeug für lange Zeit ausfallen lassen. Die Deutsche Bahn entschied sich, dieses betriebsrelevante Bauteil additiv fertigen zu lassen, nach dem Verfahren des Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM) (siehe Abschnitt 2.1.4). Aber auch hier fiel eine offizielle Bauteilqualifizierung an, zu der beispielsweise eine besondere Belastungsprüfung zählt.

Auch im Falle eher unkritischer Produkte mit großer Varianten-Vielfalt wie beispielsweise hoch-individualisierte Sportschuhe, die jeweils nur ein einziges Mal in Losgröße 1 hergestellt werden, würde die Forderung regelmäßiger Produkt- oder Komponentenqualifikationen den Aufwand exponentiell ansteigen lassen und damit die Wirtschaftlichkeit massenhafter Additiver Fertigung in Frage stellen.

In allen genannten Fällen stellen sich konventionelle Qualitätssicherungsprozesse so zeit- und kostenintensiv dar, dass sie dem breiten Einsatz additiver Fertigung objektiv im Wege stehen. Der Druck, die Prüf- und Zertifizierungsverfahren wesentlich zu beschleunigen, ist entsprechend groß. Wie bei der Leistungsprüfung des Druckprozesses bietet sich auch hier die Virtualisierung als Lösungsoption an, wie im folgenden Abschnitt 3.3 näher erläutert wird.

3.3 Ausblick: Die Virtualisierung von Freigaben und Zertifizierungen

Das konservative Freigabeverhalten in Branchen mit hohen Sicherheitsanforderungen an Produkte und Bauteile beruht auf der Erfahrung, dass sich ein Herstellungsprozess nicht perfekt reproduzierbar einstellen lässt und somit die Additive Fertigung eines Bauteils mit reproduzierbarer Qualität nicht garantiert werden kann. Tatsächlich ist das Wissen über die Wirkung einiger Herstellungsparameter der additiven Fertigung, wie z. B. die Konsistenz und Qualität des Druckwerkstoffs, heute noch gering. Wir haben aber in Abschnitt 3.2.3 gesehen, dass es bereits Ansätze gibt, Materialien, Maschinen und Druckprozesse zu simulieren und so die Fertigungsverfahren vorab zu qualifizieren. Damit wird die Grundlage für die Reproduzierbarkeit der Verfahren gelegt. Mit dem Digitalen Zwilling gibt es mittlerweile auch ein methodisches Konzept für diese Virtualisierung.

Allgemein lässt sich der Digitale Zwilling definieren als virtuelles Abbild eines realen Objektes oder Prozesses (vgl. Künzel, Kraus und Straub 2019), dessen analogen Eigenschaften, Zustände und Verhalten digital in Form von (Simulations-)Modellen, Informationen und Daten repräsentiert werden. Der Digitale Zwilling kann verschiedene Aufgaben erfüllen: Als Echtzeitrepräsentation des realen Objektes, als Speicher oder Logbuch für die über den Lebenszyklus anfallenden Daten, als Modell für System- oder Anlagensimulationen.

Bei automatisierten Fertigungsanlagen ist die virtuelle Inbetriebnahme bereits ein konkretes Anliegen. Der zugehörige Fachausschuss der VDI/VDE-Fachgesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)[5] hat sich in diesem Zusammenhang eingehend mit dem Konzept des Digitalen Zwillings auseinandergesetzt und kürzlich Thesen zu dessen möglicher Bedeutung für automatisierte Produktionsanlagen veröffentlicht (vgl. VDI/VDE GMA 2020; Industrie Anzeiger 2017).

Simulationen spielen laut GMA beim Engineering und Betrieb automatisierter Anlagen eine bedeutende Rolle. So wird die Konfiguration der Automatisierungssoftware einer Anlage durch eine simulationsbasierte virtuelle Inbetriebnahme validiert. Während des Betriebes einer komplexen Anlage können sich weitere Aufgaben und Zielsetzungen für den Einsatz von Simulationen ergeben. Das Konzept des Digitalen Zwillings verspricht, anfallende Rekonfigurationen oder Optimierungen einer laufenden Fertigungsanlage durch Simulation effizient und flexibel zu unterstützen – idealerweise als ständiger Begleiter über den Lebenszyklus der Anlage hinweg. Dafür ist erforderlich, dass sich der Digitale Zwilling anhand der ständig erfassten Zustandsdaten kontinuierlich anpasst und damit stets aktuell bleibt. Der Digitale Zwilling wird als erweitertes Simulationsmodell zukünftig komplexe und umfassende Untersuchungen auf Systemebene ermöglichen – auch im Hinblick auf Prüfungen und Zertifizierungen.

Die GMA geht davon aus, dass der Digitale Zwilling im Rahmen technischer Zertifizierungen und Genehmigungen zukünftig eine wichtige Rolle spielen wird. Diese Aussage deckt sich mit der Erwartung im Bereich der Additiven Fertigung, dass Digitalisierung die Qualifizierung von Anlagen und Bauteilen wesentlich beschleunigen wird.

TÜV SÜD erwägt bereits, zukünftig mit dem virtuellen Abbild der Fertigungs- und Logistikprozesskette zu arbeiten, um stufenweise nicht-wertschöpfende Schritte der Qualitätssicherung in der Laufzeit durch automatisierte Freigaben (runtime approvals) abzulösen (vgl. Reischle, Rehberger und Schmidt 2019). Mit solchen sogenannten digitalen Teststänaden ließe sich so individuell für jedes Bauteil automatisiert prüfen und damit die Zulassung des Bauteils sicher und effizient gestalten.

In diese Richtung weist auch das Anliegen von AMCOCS[6], einem vom BMWi geförderten Projekt im Technologieprogramm Smarte Datenwirtschaft[7], das bis Anfang 2022 läuft. Im Rahmen dieses Projektes soll eine selbstlernende Plattform für digitale Prüf- und Zertifizierungsverfahren in der Additiven Fertigung entstehen, die es ermöglichen soll, dank künstlicher Intelligenz zuverlässige Prognosen über die Qualität der Bauteile treffen zu können, noch bevor sie gedruckt werden. Zugleich soll auch die Güte des gesamten Fertigungsprozesses verlässlich eingeschätzt werden. Mit Hilfe dieser Plattform sollen die, im Bereich der streng regulierten Luftfahrt heute noch sehr zeit- und kostenintensiven, Qualitätssicherungsprozesse signifikant beschleunigt werden. Nutznießer sollen neben der Luftfahrt künftig auch andere streng regulierte Bereiche wie die Medizintechnik, die Bahn oder der Automobilsektor sein.

5 Vgl. www.vdi.de/tg-fachgesellschaften/vdi-gesellschaft-mess-und-automatisierungstechnik.
6 AMCOCS = Additive Manufactured Component Certification Service (www.amcocs.com).
7 Vgl. www.digitale-technologien.de/DT/Navigation/DE/ProgrammeProjekte/AktuelleTechnologieprogramme/Smarte_Datenwirtschaft/smarte-datenwirtschaft.html.

4 Fazit und Handlungs-empfehlungen

Additive Fertigung wird in fast allen Branchen immer häufiger nachgefragt, denn inzwischen steht eine große Vielfalt von 3D-Druckverfahren für die Herstellung fast beliebig geformter Bauteile aus unterschiedlichsten Materialien zur Verfügung.

Die für regulierte Branchen wie der Bahn oder Luftfahrt typisch hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Bauteilen und Reproduzierbarkeit ihrer Qualität gelten auch dann, wenn sie additiv gefertigt wurden. Das zu gewährleisten, setzt die Beherrschung des gesamten additiven Herstellungsprozesses voraus – vom 3D-Design über den 3D-Druck inklusive Nachbearbeitung bis hin zur Auslieferung an den Besteller. Angesichts der Komplexität und Vielfalt der auf dem Markt verfügbaren Technologien sowie der Neuartigkeit der Prozessschritte und Schnittstellen für den Daten- und Informationsaustausch ist dieser Anspruch sehr hoch.

Dank der DIN SPEC 17071 und einer Reihe einschlägiger Regelsetzungen und Normen gibt es immerhin die Möglichkeit, dass sich Unternehmen ihre Befähigung als Dienstleister für Additive Fertigung zertifizieren lassen. Auch für die Verlässlichkeit der digitalen Datenbereitstellung und den Schutz des geistigen Eigentums gibt es aus der Informations- und Kommunikationstechnik eingeführte und bewährte Standards und Zertifizierungsverfahren.

Die Qualifizierung und Zertifizierung betriebsrelevanter oder sicherheitskritischer Bauteile ist jedoch auch heute noch ein sehr individuell gestalteter und damit zeit- und kostenintensiver Vorgang. Das hängt auch damit zusammen, dass die Auftraggeber der Reproduzierbarkeit von Fertigungsabläufen noch misstrauen, unabhängig davon, ob konventionell oder additiv gefertigt wird. Auf additive Fertigung bezogen ist die konservative Zurückhaltung angesichts des Mangels an Standards und Normen nicht überraschend.

Das genaue Verständnis der komplexen Zusammenhänge – zwischen Material, Druckverfahren und Fertigungsprozess auf der einen sowie der daraus resultierenden Qualität des additiv gefertigten Bauteils auf der anderen Seite, wie es aktuell in einer Reihe von Forschungsaktivitäten und Ringversuchen erarbeitet wird – wird dazu beitragen, die bestehenden Lücken in der Regelsetzung und Normung zu schließen. Diese so gewonnenen großen Datenmengen sollten auch dafür genutzt werden, die Qualifizierung von Bauteilen durch Simulationen zu unterstützen, mit denen sich deren Eigenschaften und Qualität bestimmen lassen, noch bevor sie hergestellt wurden. Damit wird langfristig eine virtuelle Freigabe oder Zertifizierung möglich, die deutlich effizienter ist als die Abnahme des physischen Bauteils, ohne die Qualität der Konformitätsprüfung zu beeinträchtigen.

Dieser Aufgabe sollten sich im eigenen Interesse möglichst alle im Bereich der additiven Fertigung tätigen Unternehmen gemeinsam widmen, denn die Ausweitung in Richtung eines wünschenswerten Massenmarktes für hoch-individuelle Produkte braucht Erfahrungsdaten sowie angepasste Standards und Normen und vor allem weitergehende Digitalisierung in Form von leistungsfähigen Simulationen.

Nicht jedes kleinere 3D-Druck-Unternehmen wird in der Lage sein, sich an diesen Aktivitäten zu beteiligen. Eine solche Aufgabe könnte stellvertretend auch von den Betreibern erfolgreicher Kollaborationsplattformen wahrgenommen werden, wie jenen, die im Rahmen von PAiCE prototypisch entwickelt wurden. Diese Plattformen treten mit dem Anspruch an, alle relevanten Prozessschnittstellen abzudecken, und sind naturgemäß sehr daran interessiert, dass der durch sie vermittelte 3D-Druck von Bauteilen mit den Qualitätserwartungen der Auftraggeber vereinbar ist.

5 Literaturverzeichnis

3DDrucker.de (2020): Pulververfahren, https://3ddrucker.de/anwendungen/pulververfahren/ [07.05.2020].

3Faktur (2020): HP Multi Jet Fusion, https://3faktur.com/3d-druck-materialien-und-verfahren/hp-multi-jet-fusion-das-verfahren/ [07.07.2020].

B., Johannes Lukas (2012): Ein Leitfaden zu Direct Energy Deposition (DED) im 3D-Druck, www.3dnatives.com/de/ein-leitfaden-zu-direct-energy-deposition-ded-im-3d-druck/ [07.07.2020].

Deutsche Bahn AG (2019): Innovation: 3D-Druck bei der Deutschen Bahn, https://inside.bahn.de/3D-druck/ [05.05.2020].

Industrie Anzeiger (2017): AWK 2017: Vernetzte, adaptive Produktion. Der Zwilling hilft, den Weg zu finden, https://industrieanzeiger.industrie.de/themen/awk/der-zwilling-hilft-den-weg-zu-finden/ [26.05.2020].

DIN EN ISO/IEC 17000:2005-03, Konformitätsbewertung - Begriffe und allgemeine Grundlagen (ISO/IEC 17000:2004).

Käfer, Simone (2017): VDI veröffentlicht neue Richtlinien für Additive Fertigung, https//maschinenmarkt.vogel.de/vdi-veroeffentlicht-neue-richtlinien-fuer-additive-fertigung-a-631008/ [16.07.2020].

Kraus, Tom und Stephan Richter (2019): PAiCE Monitor. 3D-Druck, Berlin: iit, www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/PAiCE_Monitor.html [13.08.2020].

Künzel, Matthias / Kraus, Tom / Straub Sebastian (2019): Kollaboratives Engineering - Grundzüge und Herausforderungen der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit beim Engineering von Produkten und begleitenden Services, Berlin: iit, www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2019-04-01-paice-studie-engineering.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [17.07.2020].

Michel, Stefanie (2020): Metall 3D-Druck, www.maschinenmarkt.vogel.de/wire-arc-additive-manufacturing-waam-a-906145/ [07.07.2020].

Reischle, Gregor / Rehberger, Max / Schmidt, Jakob (2019): Additive Fertigung - Fertigungsqualität in der Serie, www.pressreader.com/germany/digital-manufacturing/20191119/281500753086035 [15.05.2020].

Ritter, Steffen (2019): formnext AM Field Guide. Frankfurt am Main: Mesago Messe Frankfurt, formnext.com/amfield-guide [13.08.2020].

RWTH Aachen Werkzeugmaschinenlabor (2019): Innvoations Sprünge Turbinenbau, www.maschinewerkzeug.de/business-karriere/uebersicht/artikel/turbinenbau-8759775.html [16.07.2020].

TÜV SÜD (2020): Prüfzeichen für industrielle AM Fertigungsstätten, www.tuvsud.com/de-de/dienstleistungen/produktpruefung-und-produktzertifizierung/zertifikatsdatenbank/z2-393-am-fertigungsstaetten [15.05.2020].

VDI (2020): VDI-Richtlinien - VDI 3405, www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3405-additive-fertigungsverfahren-grundlagen-begriffe-verfahrensbeschreibungen [17.07.2020].

VDI/VDE GMA (2020): VDE-Statusreport: Simulation und digitaler Zwilling im Anlagenlebenszyklus, www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/simulation-und-digitaler-zwilling-im-anlagenlebenszyklus [19.05.2020].

Riemann, Joscha und Stefan Guggenberger (2020): Was ist Additive Fertigung? Definitionen, Anwendungen & Potenzial, Mission Additive, www.mission-additive.de/was-ist-additive-fertigung-definitionen-anwendungen-potenziale-a-898676/ [07.07.2020].

Anhang

A PAiCE-Projekte des 3D-Clusters

Vertiefte Informationen zu den Projekten des 3D-Clusters in PAiCE finden sich auch auf der Website des Programms (www.paice.de), den Websites der Projekte und im „PAiCE-Monitor 3D-Druck" der Begleitforschung (Kraus und Richter 2019).

A.1 Add2Log

Add2Log[8] ist eine software-basierte Plattform, die von Bestellkunden genutzt wird, um externe additive Fertigungsstätten mit der Produktion von Neu- oder Ersatzteilen zu beauftragen. (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020; FIR e. V. an der RWTH Aachen 2017-2020) In diesem Projekt sind als Unternehmenspartner das Ersatzteile-Handelsunternehmen DMG MORI Spare Parts GmbH[9], der 3D-Druck-Dienstleister Materialise GmbH[10], der Software-Hersteller Software AG, das Logistik-Unternehmen Top Mehrwert Logistik GmbH & Co. KG[11] vertreten. Forschungspartner sind das Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT und das Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) an der RWTH Aachen. Die Materialise GmbH in Bremen ist ein Tochterunternehmen des belgischen Marktführers im Bereich 3D-Druck, der Materialise NV. Sie betreibt seit 2016 in Bremen Metalldrucker für verschiedenste 3D-Druck Anwendungen, etwa in der Luft- und Raumfahrt, im Automobil- oder Maschinenbau. Hier kommen diverse Materialien zum Einsatz, u. a. Aluminium, Edelstahl oder Titan. Das Unternehmen positioniert sich als Komplettdienstleister – von den allerersten Berührungspunkten im 3D-Druck bis zur Lieferung von schlüsselfertigen Anlagen oder Bauteilen in Serie.

Die Plattform ist so ausgelegt, dass sie auf die Anfrage eines Bestellers innerhalb kurzer Zeit, idealerweise im Zeitrahmen einer Online-Sitzung, mit mehreren verbindlichen Angebotspaketen antwortet, aus denen sich der Anfragende das für ihn nach Preis oder Lieferzeit günstigste auswählen und bestellen kann. Die Zusammenstellung eines solchen Pakets erfolgt automatisch durch die Plattform, welche die mit den als Mitglieder registrierten Dienstleistern für 3D-Druck, Bauteil-Nachbearbeitung, Qualitätssicherung, Logistik etc. vereinbarten Angebote zu Leistungen, Kapazitäten und Preisen berücksichtigt. Add2Log ist damit eine echte Kollaborations-Plattform, deren Wirksamkeit und Durchgriff umso größer ist, je mehr Unternehmen aus dem Umfeld der additiven Fertigung für die Plattform gewonnen werden. Somit wächst der Einfluss des Plattform-Betreibers in diesem Technologiebereich, aber auch dessen Verantwortung für die Sicherstellung der Konformität additiv gefertigter Produkte z. B. im Hinblick auf Sicherheit und Qualität. Zugleich gewinnt er die Macht, Qualifikationsnachweise und Zertifikate verlangen zu können, beispielsweise, wenn sich ein Unternehmen auf der Plattform als neuer Dienstleister registrieren will.

Inwieweit Qualifizierungen, Konformitätsbewertungen und Zertifizierungen aus Sicht der Plattform erforderlich erscheinen, hängt auch davon ab, welches Unternehmen letztlich die Plattform betreibt: Ist es ein Handelsunternehmen wie DMG MORI, ein 3D-Druck-Dienstleister wie Materialise, ein Logistikunternehmen wie Top Mehrwert oder ein Software-Unternehmen wie die Software AG? Ein Luftfahrtunternehmen als Plattformbetreiber würde in jedem Fall größten Wert auch auf die Qualifizierung sicherheitskritischer Bauteile legen.

8 Add2Log = „Dezentrale Produktion auf Basis additiver Fertigung und agiler Logistik"; Projektlaufzeit 03/2017 - 04/2020, https://projekte.fir.de/add2log/.
9 www.dmgmori.de.
10 www.materialise.com/de.
11 https://top-mehrwert-logistik.de/.

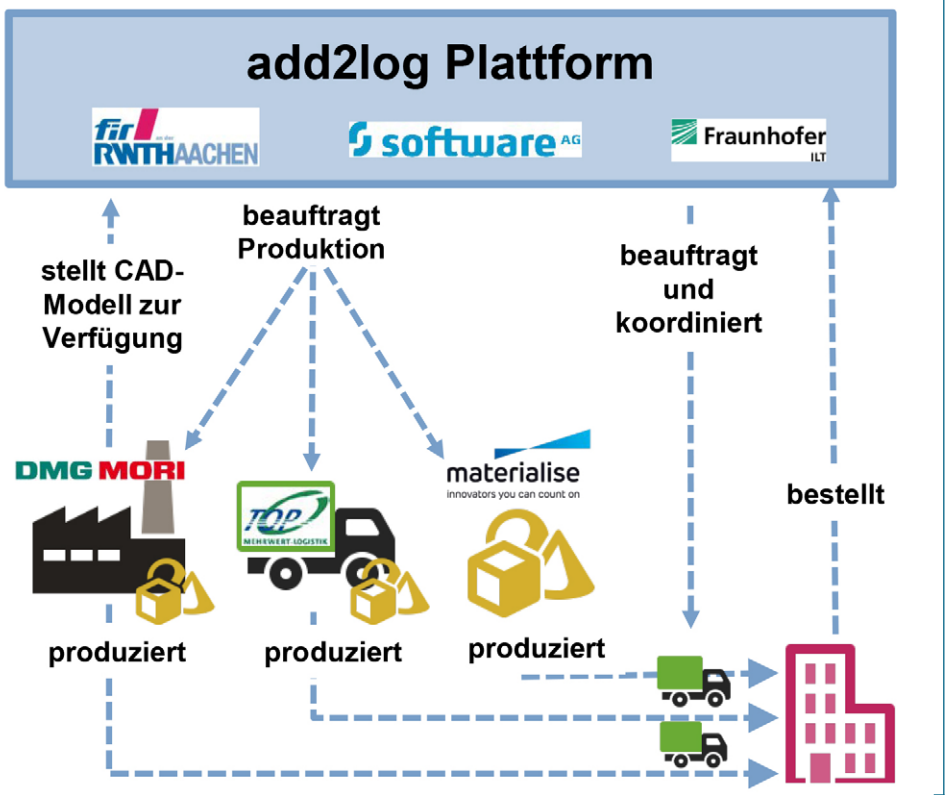


Abbildung 6: Konzept der Kollaborationsplattform Add2Log

Als Nutzer und potenzieller Betreiber der Add2Log-Plattform legt der Ersatzteile-Händler DMG MORI Spare Parts Wert darauf, dass die beteiligten Dienstleister Mindestanforderungen an das Qualitätsmanagement nach ISO 9001 oder im Bereich Luft-, Raumfahrt und Verteidigung auch nach EN 9100 erfüllen. Zudem wurde im Verlauf des Add2Log-Projektes die Spezifikation und Standardisierung bestimmter Bauteilanforderungen und Prozessparameter angeregt, welche die Grundlage für Prüfungen und Zertifizierungen im Bereich der additiven Fertigung bilden.

A.2 DigiKAM

DigiKAM[12] wird von den Projekt-Beteiligten als skalierbare IT-Plattform für unternehmensübergreifende digitale Kollaboration entlang des gesamten Entwicklungsprozesses additiv gefertigter Bauteile beschrieben. Der besondere Fokus liegt somit auf den frühen Phasen des Entstehungsprozesses (vgl. Fraunhofer IEM 2020). Im Verbundprojekt agieren als Forschungs- und Entwicklungspartner das Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM[13], die Krause DiMaTec GmbH[14] (3D-Druck-Dienstleister) sowie die Atos Information Technology GmbH[15] (IT-Dienstleister). Als Industrie- bzw. Anwendungspartner sind der Elektrogerätehersteller Miele & Cie. KG[16] und das auf Lager- und Logistik-Lösungen spezialisierte Unternehmen Friedrich Remmert GmbH[17] vertreten.

Anliegen der Plattform DigiKAM ist es, Technologie-Experten und -Nutzer aus allen Bereichen der Additiven Fertigung zu vernetzen und eine kollaborative Entwicklung von 3D-Druck-Bauteilen zu ermöglichen. Zudem können Mehrwertdienste-Anbieter bspw. Augmented-Reality- und Video-Dienste beisteuern, die auf der Plattform angebotene Entwicklungs- und Beratungsdienste begleiten.

12 DigiKAM – „Digitales Kollaborationsnetzwerk zur Erschließung von Additive Manufacturing"; Laufzeit 1/2017 - 6/2020, https://digi-kam.info.
13 www.iem.fraunhofer.de.
14 www.krause-dimatec.de.
15 https://atos.net/de/deutschland.
16 www.miele.de.
17 www.remmert.de.

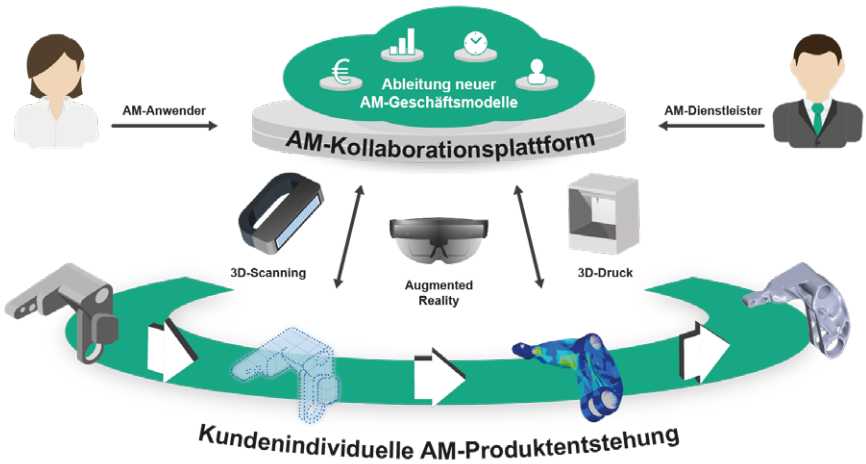


Abbildung 7: Konzept des Digitalen Kollaborationsnetzwerks DigiKAM

Es liegt nahe, auf DigiKAM Informationen und Schulungen auch zu Prozess-, Qualitäts- und Sicherheitsnormen, Konformitätsprüfungen und Zertifizierungen im Bereich der additiven Fertigung vorzusehen. Entsprechend bietet sich an, hierzu auch Anbieter entsprechender E-Learning-Inhalte, aber auch Qualitätssicherer und Zertifizierungsorganisationen als Dienstleister auf die Plattform einzuladen.

A.3 SAMPL

SAMPL[18] ist als durchgängige Sicherheitslösung (chain of trust) für die additive Fertigung von Komponenten durch 3D-Druck-Dienstleister konzipiert. Die Plattform erfasst den gesamten Prozess von der Entstehung digitaler 3D-Druckdaten über den Austausch mit einem 3D-Druck-Dienstleister, dem Druck auf speziell abgesicherten (trusted) 3D-Druckern bis hin zur Kennzeichnung gedruckter Bauteile mittels RFID-Chips oder anderer Methoden zur Sicherstellung der Traceability. Grundlage der SAMPL-Plattform ist eine Blockchain und die Datenaustauschlösung OpenDXM GlobalX der PROSTEP AG. In diesem Projekt waren als Industriepartner der 3D-Druckerhersteller und -dienstleister 3D MicroPrint GmbH[19], der RFID-Chip-Hersteller NXP Semiconductors Germany GmbH[20] und das Software-Unternehmen PROSTEP[21] vertreten.

Additiv gefertigte Ersatzteile für die weltweite Luftfahrt bilden einen Themenschwerpunkt von SAMPL. Konkret geht es hier um den 3D-Druck von Bauteilen mit abgesicherter Prozesskette und Identifizierung der Bauteile mit Hilfe der Blockchain-Technologie. Damit stellt diese Plattform einen neuartigen Ansatz dar, der andere Freigabe- oder Zertifizierungsabläufe nahelegt.

Für die additive Fertigung fehlen heute noch praktische Erfahrungen aus Serienproduktionen mit den entsprechenden Prozessen und Schnittstellen zu den Kollaborationspartnern. Hier ist die in anderen Bereichen diskutierte Digitalisierung objektiv bereits umgesetzt: Für die Produktion von Bauteilen werden die auf CAD-Systemen unter Berücksichtigung des

18 SAMPL = „Secure Additive Manufacturing Platform"; Projektlaufzeit 11/2016 – 12/2019 https://sampl.fks.tuhh.de/en/home.html.
19 www.3dmicroprint.com.
20 www.nxp.com.
21 www.prostep.com.

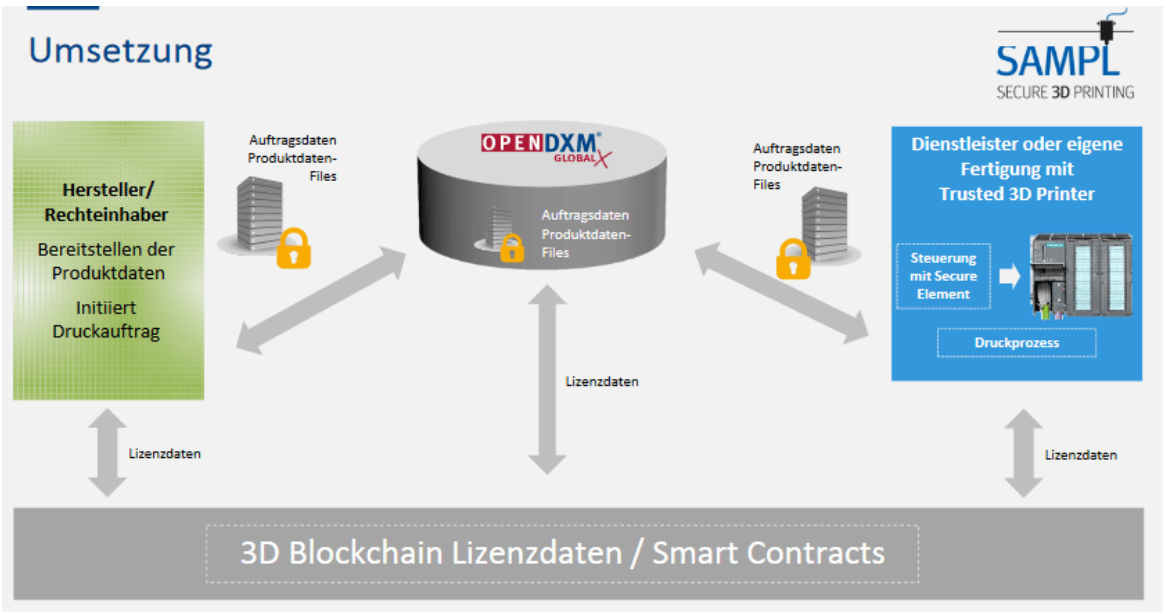


Abbildung 8: Konzept der Kollaborationsplattform SAMPL

Werkstoffs und der gewünschten Bauteileigenschaften entwickelten 3D-Modelle direkt verwendet – quasi als virtuelle Abbilder der Bauteile. Dieser Unterschied zu klassischen Fertigungen hat Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette – von der Bauteil-Entwicklung über die Fertigung bis hin zur Auslieferung, da nun zusätzlich auch Aspekte der Sicherheit der Datenübertragung, der Integrität der 3D-Datensätze und des Kopierschutzes kritisch werden. Prüfungen und Zertifizierungen erhalten andere Schwerpunkte und werden wegen zusätzlicher Schnittstellen und Prozessschritte potenziell aufwändiger. Die enge Kopplung der physischen mit der Datenwelt legt nahe, die anwachsende Komplexität mit Hilfe digitaler Maßnahmen einzudämmen.

SAMPL nutzt eine Blockchain, um die bei der Herstellung von 3D-Druck-Bauteilen relevanten Prozessparameter, Informationen zum Werkstoff etc. wie in einem Logbuch unveränderbar abzuspeichern und zugleich die Einhaltung der Lizenzvereinbarung für die Herstellung des Bauteils nachzuhalten. Die Inhalte der Blockchain dienen in der Logistikkette als nicht-manipulierbare Nachweise. Das Vertrauen zwischen den Partnern wird so ohne Intermediäre[22] algorithmisch sichergestellt, ganz ohne Zertifikate. Der Blockchain-basierte Prozess tritt damit an die Stelle eines herkömmlichen Prüf- und Freigabeprozesses. Eine Herausforderung ist allerdings, dass die Blockchain-Technologie zuvor korrekt implementiert wurde. Die mit der entsprechenden Chain-of-Trust-Funktionalität ausgestatteten 3D-Druckmaschinen und ihre Schnittstellen müssen auf SAMPL-Konformität geprüft und zertifiziert werden, damit der mögliche Missbrauch von Druckdaten von vornherein ausgeschlossen werden kann. Eine solche Maschine könnte vom Hersteller selbst oder von einem Zertifizierungsdienstleister geprüft und als ein SAMPL Ready IOT-Device in der Blockchain dokumentiert werden. Nach der Inbetriebnahme kann dann diese Maschine z. B. einem Druckdienstleister zugeordnet werden und steht dann für den sicheren 3D-Druck zur Verfügung.

22 Neutrale Vertrauensinstanz wie beispielsweise Qualitätssicherer, Prüfer, Zertifizierer, o. ä.

A.4 VariKa

Im Projekt VariKa[23] wurde ein Baukastensystem für die Realisierung variantenreicher Batterieträger für Elektroautos entwickelt (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2020; FFT 2020). Die Träger bestehen aus konventionell stranggepressten Aluminiumteilen und additiv gefertigten, individualisierbaren Verbindungselementen in Form von Strukturknoten. Als Werkstoff für den 3D-Druck kommt die aus dem Druckguss-Bereich bekannte Aluminium-Legierung AlSi10Mg zum Einsatz. Es wurde eine Prozesskette realisiert, welche die wirtschaftliche Fertigung der Batterieträger bei maximaler Variantenvielfalt und geringen Stückzahlen, z. B. für Prototypen- und Sonderfahrzeuge, ermöglicht. Die Topologie des Batterieträgers wurde vom Automobilhersteller Opel Automobile GmbH[24] leichtbauoptimiert. Der 3D-Druck-Spezialist FKM Sintertechnik GmbH[25] stellte die AM-Knoten her und der Anlagenbauer FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG[26] erarbeitete die Schweißtechnik und Automatisierung der Fertigung des Trägers. Konsortialführer war das Engineering-Unternehmen EDAG Engineering GmbH[27], wo mit dem Generativen Design auch eine neue Methode der Geometrie- und Variantenerzeugung erforscht wurde. Das Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF[28] unterstützte das Projekt mit der Erforschung von Bemessungskonzepten für die betriebsfeste Auslegung von AM-Bauteilen.

Herausforderung ist die Vielfalt an Batterieträger-Varianten; diese entstehen aus der Kombination unterschiedlicher Fahrzeugtypen mit zeitveränderlichen Batteriebauweisen mit der Folge geringer Stückzahl pro Kombination. Eine Herstellung mit konventionellen Fertigungsmethoden, z. B. in Blechschalenbauweise, wäre angesichts der absehbaren Variantenvielfalt kaum wirtschaftlich.

B Standards und Normen

Im Folgenden sind alle in der Additiven Fertigung als relevant angesehenen Technischen Regeln und Normen zusammengestellt. Diese beziehen sich technologie-übergreifend oder technologie-spezifisch direkt auf Additive Fertigung(siehe B.1), oder allgemein auf Qualitätsmanagementsysteme (siehe B.2), Mess- und Prüftechnik (siehe B.3) sowie Simulation und Inbetriebnahme (siehe B.4).

B.1 Technische Regeln und Normen im Bereich der additiven Fertigung

DIN SPEC 17071:2019-12 Additive Fertigung – Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren

DIN EN ISO/ASTM 52901:2018-12 Additive Fertigung – Grundlagen – Anforderungen an erworbene additiv gefertigte Bauteile

ISO 17296-3:2016-12 Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 3: Haupteigenschaften und entsprechende Prüfverfahren

E DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06 (D/E) Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie.

23 VariKa = „Vernetztes Produkt- und Produktionsengineering am Beispiel variantenreicher, ultraleichter, metallischer Fahrzeugkarosserien“; Projektlaufzeit 4/2017 - 6/2020, www.varika.de.
24 www.opel.de.
25 www.fkm.net.
26 www.fft.de.
27 www.edag.com.
28 www.lbf.fraunhofer.de.

DIN EN ISO/ASTM 52921:2019-10 Additive Fertigung – Grundlagen - Standardpraxis der Positionierung, Koordinaten und Ausrichtung des Bauteils

DIN EN ISO/ASTM 52910:2019-05 Additive Fertigung – Konstruktion – Anforderungen, Richtlinien und Empfehlungen

ASTM F2971:2013 Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing

DIN 35224: 2018-10 Schweißen im Luft- und Raumfahrzeugbau - Abnahmeprüfung von pulverbettbasierten Laserstrahlmaschinen zur additiven Fertigung

DIN 35225: 2017-06 Schweißen im Luft- und Raumfahrzeugbau - Prüfung von Bedienern von pulverbettbasierten Laserstrahlmaschinen zur additiven Fertigung

DIN 65123: 2017-08 Luft- und Raumfahrt – Verfahren zur Prüfung von additiv mit Pulverbettverfahren hergestellten metallischen Bauteilen

DIN 65124: 2018-10 Luft- und Raumfahrt – Technische Lieferbedingungen für additive Fertigung metallischer Werkstoffe mit Pulverbettverfahren

VDI 3405 Blatt 1: 2019-11 Additive Fertigungsverfahren – Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen – Güteüberwachung

VDI 3405 Blatt 2: 2013-08 Additive Fertigungsverfahren – Strahlschmelzen metallischer Bauteile – Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung

VDI 3405 Blatt 3: 2015-12 Additive Fertigungsverfahren – Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen

ASTM F3091 / F3091M:2014 Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials

ASTM F3122:2014 Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes

B.2 Normen zu Qualitätsmanagementsystemen

DIN EN ISO 9001: 2015-11 Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen

IATF 16949: 2016-10 Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie

ISO/IEC 27001: 2017-06 Informationstechnik – Sicherheitsverfahren – Informationssicherheitsmanagementsysteme – Anforderungen

DIN EN ISO 13485: 2016-08 Medizinprodukte – Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen für regulatorische Zwecke

EN ISO 9100: 2018 Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung

B.3 Technische Regeln zu Maßhaltigkeit und Prüfmethoden

DIN EN ISO 286-1: 2019-09 Geometrische Produktspezifikation – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße – Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen

DIN EN ISO 1101: 2017-09 Geometrische Produktspezifikation – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf

DIN EN ISO 1302: 2002-06 Geometrische Produktspezifikation – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation

DIN EN ISO 60: 2000-01 Kunststoffe – Bestimmung der scheinbaren Dichte von Formmassen, die durch einen genormten Trichter abfließen können (Schüttdichte)

DIN EN ISO 61: 2000-01 Kunststoffe – Bestimmung der scheinbaren Dichte von Formmassen, die nicht durch einen gegebenen Trichter abfließen können (Stopfdichte)

DIN EN ISO 3369: 2010-08 Undurchlässige Sintermetallwerkstoffe und Hartmetalle – Ermittlung der Dichte

DIN ISO 3923-2: 1987-08 Metallpulver; Ermittlung der Fülldichte; Scott-Volumeter-Verfahren

B.4 Technische Regeln zu Simulation und Virtuelle Inbetriebnahme

VDI 3633 Blatt 1:2014-12 Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen; Grundlagen (Simulation of systems in materials handling, logistics and production; Fundamentals)

VDI/VDE 3693 Blatt 1:2016-08 Virtuelle Inbetriebnahme; Modellarten und Glossar (Virtual commissioning; Model types and glossary)

VDI/VDE 3693 Blatt 2:2018-12 Virtuelle Inbetriebnahme; Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen (Virtual commissioning; Introduction of virtual commissioning in companies)

C Interview-Partner

Name	Organisation	Projekt
Stefanie Brickwede	Deutsche Bahn	
Tim Domagala	Materialise GmbH	Add2Log
Prof. Dr. Roman Dumitrescu	Fraunhofer IEM	DigiKAM
Dr. Dietmar Gärtner	Software AG	Add2Log
Dr. Martin Holland	PROSTEP AG	SAMPL
Dr. Ulrich Jahnke	Krause DiMaTec GmbH	DigiKAM
Richard Kordaß	EDAG Engineering GmbH	VariKa
Max Rehberger	TÜV SÜD Product Service	

D Glossar

Asset	Der Begriff Asset steht hier im Sinne eines materiellen oder immateriellen Gutes, das Eigenschaften aufweist, für die es Standards oder Normen gibt. Gemeint sind beispielsweise Komponenten, Produkte, Systeme, (Fertigungs-)Anlagen, IT-Strukturen, Dienstleistungen, Personen, Organisationen, Hersteller etc.
Cybersicherheit	Cybersicherheit, auch digitale Sicherheit oder Informationssicherheit genannt, gewährleistet die Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit von Daten und Informationen bei ihrer Erfassung, Speicherung, Verarbeitung, Übertragung und Ausgabe.
Datensicherheit	Datensicherheit ist das Ergebnis der vorgeschriebenen technischen Umsetzung von Maßnahmen zum Datenschutz, um die Persönlichkeitsrechte des Einzelnen zu schützen.
Konformitätsbewertung	Konformitätsbewertung ist in der internationalen Norm ISO/IEC 17000: 2004 „Konformitätsbewertung - Begriffe und allgemeine Grundlagen“ definiert als die „Darlegung, dass festgelegte Anforderungen bezogen auf ein Produkt, einen Prozess, ein System, eine Person oder eine Stelle erfüllt sind“. Eine besondere Bedeutung hat die Konformitätsbewertung im geregelten Bereich bei der Bewertung von Produkten auf Übereinstimmung mit den Anforderungen einer EU-Richtlinie. EU-Richtlinien gemäß Art. 95 EG-Vertrag für den Europäischen Binnenmarkt legen für zahlreiche Produkte Mindestanforderungen an die Sicherheit fest, die vom Hersteller erfüllt werden müssen.
Normung	Normung ist die planmäßige, durch die interessierten Kreise gemeinschaftlich im Konsens durchgeführte Vereinheitlichung von materiellen und immateriellen Gegenständen zum Nutzen der Allgemeinheit (vgl. DIN 820-3:2010-07). Aus dem Englischen kommt der Begriff de-jure-Standard, der sich mit dem deutschen Begriff „Norm“ deckt. Im Gegensatz dazu steht der de-facto-Standard („Industriestandard“), der nicht durch wenigstens ein nationales Normungsverfahren erarbeitet wurde.

Produktprüfung/Prüfbericht	Die Prüfung eines Produktes ist die messtechnische Erfassung seiner relevanten elektrischen und mechanischen Eigenschaften, für die in einer Produkt-Spezifikation oder Norm bestimmte Grenzwerte festgelegt sind. Für die Prüfung werden die vom Hersteller bereitgestellten Produkt-Muster verwendet. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Muster die vorgeschriebenen Grenzwerte einhalten. Die Ergebnisse werden in einem offiziellen Prüfbericht zusammengefasst, der bestimmten formalen Kriterien genügt.
Prüfzeichen/Prüfsiegel	Als Prüfzeichen oder Prüfsiegel werden grafische oder schriftliche Markierungen an Produkten, Maschinen und Fahrzeugen bezeichnet, die die Einhaltung bestimmter Sicherheits- oder Qualitätskriterien anzeigen. Je nach Gegenstand werden sie nach einmaliger oder regelmäßig wiederkehrender Prüfung angebracht bzw. erneuert. Prüfzeichen sind Bestandteil der Warenkennzeichnung. Sie werden aufgrund gesetzlicher Vorgaben oder von den Produzenten freiwillig angebracht.
Standardisierung	Standardisierung ist eine technische Regelsetzung ohne zwingende Einbeziehung aller interessierten Kreise und ohne die Verpflichtung zur Beteiligung der Öffentlichkeit. In der Deutschen Normungsstrategie wird der Erarbeitungsprozess von Spezifikationen zur Unterscheidung von der voll konsensbasierten Normung im Deutschen als Standardisierung bezeichnet (vgl. DIN 820-3:2010-07).
Spezifikation	Eine Spezifikation enthält das Ergebnis einer Standardisierungsarbeit und spiegelt den Stand der Technik wider. Sofern ein öffentliches Einspruchsverfahren durchgeführt wurde, kann sie den Status „allgemein anerkannter Stand der Technik“ erlangen. Spezifikationen sind z. B. VDE-Anwendungsregeln oder DIN SPEC.[29]
Test und Prüfung	Ein Test ist die Untersuchung der Eigenschaften eines Gerätes oder Systems nach definierten Vorgaben. Eine Prüfung ist eine Sequenz von definierten Tests entsprechend einem als vollständig eingestuften Satzes von standardisierten Vorgaben.
Zertifizierung	Als Zertifizierung bezeichnet man ein Verfahren, mit dessen Hilfe die Einhaltung bestimmter Anforderungen nachgewiesen wird. Zertifizierung ist ein Teilprozess der Konformitätsbewertung. Zertifizierungen werden oft zeitlich befristet von unabhängigen Zertifizierungsstellen wie z. B. DQS, TÜV, VDE oder DEKRA vergeben und hinsichtlich der Standards unabhängig oder proprietär kontrolliert.
Zertifizierungsprogramm	Ein Zertifizierungsprogramm enthält ein Regelwerk, um Prüfungen und Zertifizierungen nach festgelegten Kriterien zu ermöglichen.
Zertifizierungsprozess	Prozess (als Teil eines Zertifizierungsprogramms), den eine Komponente, ein Gerät oder ein System durchlaufen muss, um zertifiziert zu werden und damit ein Prüfsiegel zu erhalten.
Zertifizierungsstelle	Eine Zertifizierungsstelle ist eine vom Prüflabor unabhängige Konformitätsbewertungsstelle (als juristische Person), die auf der Grundlage des Prüfberichtes zu einem Produkt und einer Konformitätsbewertung ein Zertifikat oder Prüfsiegel vergibt.

29 Eine ergänzende Definition ist unter IEC 60880:2006 zu finden.

E Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional, räumlich
Add2Log	Dezentrale Produktion auf Basis additiver Fertigung und agiler Logistik
AM	Additive Manufacturing (Additive Fertigung)
ASTM	(ursprünglich) American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design (computergestütztes Design)
DigiKAM	Digitales Kollaborationsnetzwerk zur Erschließung von Additive Manufacturing
DIN	Deutsches Institut für Normung
DTBE	Digital-Twin based systems engineering
EBM	Electron Beam Melting (Selektives Elektronenstrahlschmelzen)
EN	Europäische Norm
FDM	Fused Deposition Melting (Extrusionsverfahren)
GMA	VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik
ISO	International Standards Organization
MBSE	Model-based systems engineering
PAiCE	Platforms | Additive Manufacturing | imaging | Communication | Engineering
QMS	Qualitätsmanagement-System
RFID	Radio-frequency identification (Identifizierung mit Hilfe elektro-magnetischer Wellen)
SAMPL	Secure Additive Manufacturing Platform
SBSE	Simulation-based systems engineering
SHS	Selective Heat Sintering
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
VariKa	Vernetztes Produkt- und Produktionsengineering am Beispiel variantenreicher, ultraleichter, metallischer Fahrzeugkarosserien

www.paice.de