

ICS 25.030

**Additive Fertigung –
Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive
Fertigungszentren;
Text in Deutsch und Englisch**

Additive manufacturing –
Requirements for quality-assured processes at additive manufacturing centres;
Text in German and English

Fabrication additive –
Exigences aux processus d'assurance qualité dans les centres de fabrication additive;
Texte en allemand et anglais

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer PAS erstellt.

Gesamtumfang 59 Seiten

Dieses Dokument wurde durch die im Vorwort genannten Verfasser erarbeitet und verabschiedet.

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Qualifizierung des Additiven Fertigungsprozesses	6
4.1 Qualitätsrelevante Prozessschritte innerhalb des Fertigungsprozesses	6
4.2 Anforderungen an die Datenvorbereitung	7
4.3 Anforderungen an das Ausgangsmaterialmanagement	9
4.4 Anforderungen an die anlagenbezogene Prozessvorbereitung	10
4.5 Anforderungen an die Prozessdurchführung	11
4.6 Anforderungen an die anlagenbedingte Prozessnachbereitung	12
4.7 Anforderungen an die bauteilbezogene Nachbearbeitung	13
4.8 Prozessqualifizierung	14
5 Qualitätssicherung	15
5.1 Allgemeines	15
5.2 Personelle Anforderungen	15
5.3 Dokumentation und Nachverfolgung der Arbeitsschritte	16
5.4 Infrastruktur des additiven Fertigungszentrums	17
5.5 Qualitätskontrollen	18
6 Verifizierung der Bauteilanforderungen	20
6.1 Allgemeines	20
6.2 Herstellbarkeitsbewertung	20
6.3 Validierungsplan	21
Anhang A (informativ) Zusatzinformationen	22
A.1 Bauteilbezogene Nachbearbeitung	22
A.1.1 Bauteilbezogene Endbearbeitung	22
A.1.2 Bauteilprüfung (Gesonderte Einzel- bzw. Stichprobenprüfung)	22
A.2 Beispiel für die Serien-Qualifizierung	23
A.3 Übersicht: Normengerüst für AM Fertigungszentren	24
A.4 Hinweise zu Prozessabweichungen	26
A.4.1 Allgemeines	26
A.4.2 Erscheinungsbild am Bauteil	26
A.4.3 Erscheinungsbild an den Stützen	26
A.4.4 Effekte in der Bauhülle	26
Literaturhinweise	27

Vorwort

Diese DIN SPEC wurde nach dem Verfahren PAS erarbeitet. Die Erarbeitung von DIN SPEC nach dem PAS-Verfahren erfolgt in Workshops und nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Die Erarbeitung und Verabschiedung des Dokuments erfolgte durch die nachfolgend genannten Initiatoren und Verfasser:

- Deutsche Bahn AG, Sven Gaede, Florens Lichte;
- MT Aerospace AG, Nicolas Bour;
- Siemens Mobility GmbH, Maximilian Kunkel;
- TÜV SÜD Product Service GmbH, Christophe Blanc, Max Rehberger, Gregor Reischle.

Für diese DIN SPEC wurde kein Entwurf veröffentlicht.

DIN SPEC sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Für dieses Thema bestehen derzeit keine Normen.

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann der Workshop weder eine explizite noch eine implizite Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Benutzung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass der Workshop für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden DIN SPEC entbindet den Nutzer nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Die kostenfreie Bereitstellung dieses Dokuments als PDF-Version über den Beuth WebShop wurde im Vorfeld finanziert.

Einleitung

Additive Fertigung stellt für immer mehr Unternehmen eine interessante Alternative zu etablierten Fertigungsverfahren dar. Der Trend zu komplexen Bauteilen, dezentraler Fertigung und kundenindividuellen Produkten lässt für immer weitere Bereiche einen wirtschaftlich darstellbaren Einsatz zu. Dies trifft auch immer mehr für Serienanwendungen zu, die ganz andere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Prozesse stellen. Insbesondere an industriell (Automobilbranche, Maschinenbau, Bahnsektor, Luft- und Raumfahrt, Prozess- und Industrieanlagen, Medizintechnik usw.) eingesetzte Komponenten werden dabei hohe Anforderungen in Bezug auf Qualität und Sicherheit gestellt. Der derzeit noch bestehende Mangel an Normen und Standards sorgt dabei dafür, dass Prozesse für die Fertigung von Bauteilen für jeden Einzelfall von Grund auf definiert werden müssen, was einen hohen Aufwand verursacht und wenig Transparenz und damit wenig Vertrauen anderer Stakeholder in die Prozesse zulässt.

Werden industriell eingesetzte Bauteile mittels additiver Fertigungsverfahren hergestellt, muss nachgewiesen werden, dass diese den an sie gestellten Anforderungen gerecht werden. Dazu muss die Prozesskette und -umgebung derart gestaltet werden, dass die Prozessqualität und die daraus resultierende Produktqualität stets gleichbleibend und reproduzierbar sind.

In den nachfolgenden Abschnitten werden jeweilige Anforderungen benannt, um qualitätsgesicherte Prozesse in der additiven Fertigung zu etablieren.

Dieses Dokument hat dabei das Ziel, ganzheitlich (nicht produktspezifisch) die Anforderungen darzustellen, die als Basis für eine Prozessgestaltung für hochwertige additiv gefertigte Bauteile notwendig sind. Insbesondere in regulierten Industrien, wie der Automobilbranche, dem Maschinenbau, dem Bahnsektor, der Luft- und Raumfahrt, Prozess- und Industrieanlagen oder der Medizintechnik, schafft eine Berücksichtigung der im Rahmen dieses Dokuments definierten Kriterien eine Basis für die Erfüllung der Anforderung für spezifische Produkte.

Dafür werden wichtige AM-prozesskettenbezogene Maßnahmen festgelegt, die es zu steuern und überwachen gilt, um eine wiederholbare Qualität von AM-Bauteilen sicherzustellen. Da dieses Dokument technologieübergreifend aufgebaut ist, sind die Unterprozesse je nach eingesetzter Technologie zutreffend oder können vernachlässigt werden.

Dieses Dokument bietet einen gemeinsamen Ansatz für die fachgerechte Produktion von additiv gefertigten Serien- und Ersatzteilen. So kann, im Falle der Erfüllung der Anforderungen dieses Dokuments, der Umfang eines Lieferantenaudits stark verschlankt werden.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Anforderungen an Fertigungszentren, in denen additive Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen (im Folgenden als additive Fertigungszentren bezeichnet), fest, die unabhängig vom eingesetzten Werkstoff und Fertigungsverfahren sind.

Dieses Dokument legt Kriterien für additive Fertigungsprozesse sowie qualitätsrelevante Merkmale und Faktoren entlang der Prozesskette fest und definiert Tätigkeiten und Abläufe innerhalb eines additiven Fertigungszentrums.

Dieses Dokument ist anwendbar auf die nach E DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06 festgelegten additiven Fertigungstechnologien und folgt einem fertigungsprozessorientierten Ansatz.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN EN ISO 17296-4, *Additive Fertigung — Grundlagen — Teil 4: Überblick über die Datenverarbeitung*

E DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06, *Additive Fertigung — Grundlagen — Terminologie*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach E DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

3.1

additives Fertigungszentrum

(en: additive manufacturing centre)

Fertigungsstätte, die die Prozesskette der additiven Fertigung abbildet und Bauteile für Endanwendungen fertigt

BEISPIEL Industrieller Fertigungsdienstleister oder interner Bereich eines größeren Unternehmens.

3.2

Beschichter

(en: recoater)

Vorrichtung versehen mit einer Rolle, Bürste, weichen oder harten Lippe um eine gleichmäßige Schicht auf die Baufläche aufzutragen

3.3

Schichtauftrag

(en: layer deposition)

Aufbringen einer ebenen Schicht

3.4

Druckkopf

(en: print head)

Baugruppe, die den Zuführmechanismus für Ausgangsmaterial und/oder Bindemittel und Extrusionsdüse(n) umfasst

3.5

physischer Produktionsdurchlauf

(en: physical production run)

physische Gesamtheit von Bauplattform, darauf befindlichen Bauteilen, Pulver und Stützstrukturen im Bauraum der Anlage

3.6

virtueller Produktionsdurchlauf

(en: virtual production run)

dem physischen Produktionsdurchlauf (Baujob) zugrundeliegender Datensatz

3.7

AM-Maschine

AM-Anlage

(en: AM machine)

Teil des additiven Fertigungssystems, einschließlich Hardware und Maschinensteuerungs-Software, erforderlicher Inbetriebnahme-Software und peripheren Zubehörs, die notwendig sind, um einen Bauprozess zum Produzieren von Bauteilen abzuschließen

[QUELLE: E DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06, Begriff 3.1.4 – modifiziert: „AM-Anlage“ als Synonym ergänzt]

3.8

Fertigungsprozess

(en: manufacturing process)

Prozess der alle digitalen und physischen Fertigungsschritte bis hin zur Herstellung des finalen Bauteils, einschließlich der Qualitätskontrolle umfasst

Anmerkung 1 zum Begriff: Der additive Fertigungsprozess ist ein Teil des Fertigungsprozesses.

4 Qualifizierung des Additiven Fertigungsprozesses

4.1 Qualitätsrelevante Prozessschritte innerhalb des Fertigungsprozesses

Um eine hohe Qualität innerhalb eines additiven Fertigungszentrums sicherzustellen, müssen die gesamte Prozesskette (4.2 bis 4.7) der additiven Fertigung und die personellen Anforderungen (5.1) betrachtet werden.

Die relevanten Bereiche der Prozesskette sind in Bild 1 dargestellt. Diese umfasst:

- Qualitätssicherung: Aktivitäten, die über die gesamte Prozesskette hinweg die geforderte Bauteilqualität sicherstellen;
- Datenvorbereitung: Digitale Abläufe, die vor der additiven Fertigung stattfinden;
- Ausgangsmaterialmanagement: Materialflüsse, die vor der additiven Fertigung stattfinden;
- Anlagenbezogene Prozessvorbereitung: Manuelle Aktivitäten, die im unmittelbaren Umfeld der Fertigungsanlage erfolgen und der Initiierung der Prozessführung dienen;

- Prozessführung: Maschineller Ablauf, bei dem Bauteile additiv erzeugt werden;
- Anlagenbedingte Prozessnachbereitung: Aktivitäten, die im Umfeld der Fertigungsanlage erfolgen und nachgelagert zur Prozessführung durchgeführt werden;
- Bauteilbezogene Nachbereitung: Aktivitäten, die bauteilbezogen nach der Prozessführung außerhalb des unmittelbaren Umfelds der additiven Fertigungsanlage erfolgen (siehe Anhang A).

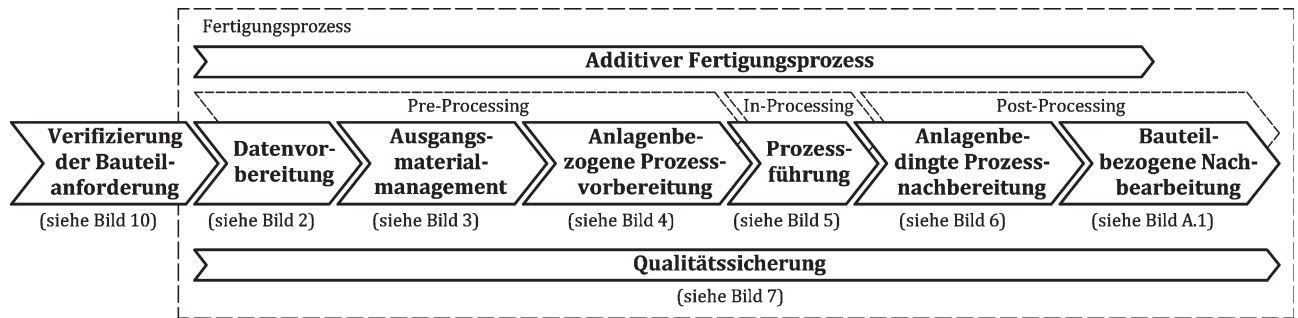


Bild 1 — Qualitätsgesicherter Prozess in einem additiven Fertigungszentrum

Die Sicherstellung der Bauteilqualität erfordert eine umfassende Spezifikation des Fertigungsprozesses (Bild 1):

- auf den Einzelprozess bezogene detaillierte qualitätsrelevante Merkmale, sowie Prüfmethoden und Intervalle zu deren Überwachung;
- hierfür erforderliche Arbeitsmittel und Umgebungsbedingungen;
- anlagenbezogenen Wartungs- und Instandhaltungsaktivitäten;
- Qualifizierungsmaßnahmen zur Feststellung relevanter Eingangsgrößen (z.B. Eigenschaften des Ausgangsmaterials) und hieraus resultierender Ausgangsgrößen (z.B. resultierende Lage- und Streuparameter mechanischer Eigenschaften) die sich aus der Kombination der zuvor definierten Merkmale über den Gesamtprozess ergeben.

4.2 Anforderungen an die Datenvorbereitung

In Bild 2 sind die einzelnen Schritte der Datenvorbereitung dargestellt.

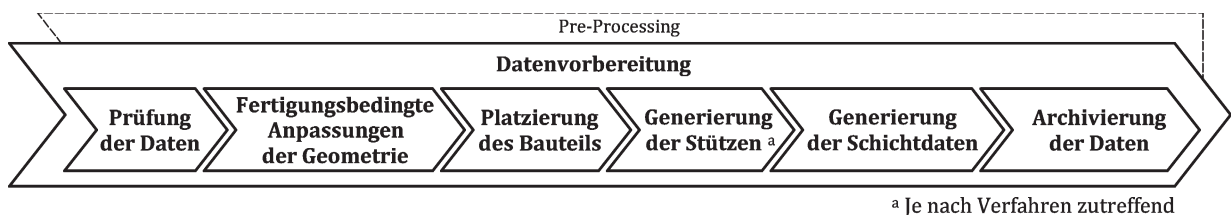


Bild 2 — Elemente der Datenvorbereitung

Für die additive Fertigung ist eine einheitliche Daten- und Informationsstruktur nach DIN EN ISO 17296-4 zu verwenden.

Sofern technisch zutreffend, sind die folgenden Prozessschritte zu spezifizieren sowie deren Prüfung und Dokumentation zu definieren:

- Prüfung der Daten: Eine Überprüfung auf fehlerfreie, prozessuale Abbildbarkeit der 3D-Daten ist erforderlich. Falls erforderlich wird eine Datenreparatur durchgeführt;

BEISPIEL 1 Auflösung, Größe und Mittentoleranzen des 3D-Datensatzes.

- Falls zutreffend ist die Dokumentation der Parameter im Zuge der STL-Konvertierung (Tesselierung) erforderlich.
- Fertigungsbedingte Anpassungen der Geometrie: Aufmaße, Schneiden, Aushöhlen, Schließen von Löchern, usw.; Konstruktive Veränderungen der 3D-Daten sind nur zulässig, falls
 - eine fertigungsgerechte Gestaltung der Bauteils angestrebt wird – nach Rücksprache und Freigabe,
 - eine Rückverfolgbarkeit mittels Bauteilbeschriftung gewährleistet wird – nach Rücksprache und Freigabe,
 - dies der adäquaten bauteilbezogenen Nachbearbeitung dient und
 - sämtliche Anpassungen nachvollziehbar und nachprüfbar dokumentiert wurden (dies umfasst insbesondere die Versionierung des modifizierten Datensatzes).
- Platzierung des Bauteils: Orientierung und Positionierung, Bauplattenanordnung unter Berücksichtigung materialspezifischer Mindestabstände;
- Generierung der Stützen: Je nach Verfahren sind Stützkonstruktionen erforderlich. Werden diese nicht vollautomatisiert berechnet, so ist eine definierte und benutzerunabhängige Verwendung von Stützgeometrien sicherzustellen;

BEISPIEL 2 Materialspezifische Kennwerte umfassen Wandstärke oder Anbindungsfläche an das Bauteil.

- Generierung der Schichtdaten: Umwandlung in maschinenspezifische Schichtdaten mit vollständigen Prozessparametern (ein qualifizierter Parametersatz pro Maschinenmodell und pro Material ist festzulegen). Auswahl der Anlage (erfolgt ggf. bereits bei „Platzierung des Bauteils“), Zuweisung von Material;
 - Bei Software-Aktualisierungen sollte anhand festgelegter Ein- und Ausgabedaten geprüft werden, dass die generierten Daten mit den referenzierten Ausgabedaten übereinstimmen.
 - Die Parameter für die Datenkonvertierung sind in der entsprechenden Prozessbeschreibung zu definieren und einzuhalten. Diese beinhalten beispielsweise: Z-Kompensation und Skalierung bedingt durch den geometrie- und verfahrensabhängigen Schwund, Belichtungsstrategie bzw. Verfahrswege, Auftragsrate bzw. Laserleistung, Beschichtergeschwindigkeit und Totzeit, Baukammertemperatur.
- Archivierung der Daten: Auf den Produktionsdurchlauf eindeutige, versionierte Ablage. Archivierungsdauer nach Vorgabe für die jeweilige Applikation/Branche.

4.3 Anforderungen an das Ausgangsmaterialmanagement

In Bild 3 sind die einzelnen Schritte des Ausgangsmaterialmanagements dargestellt.

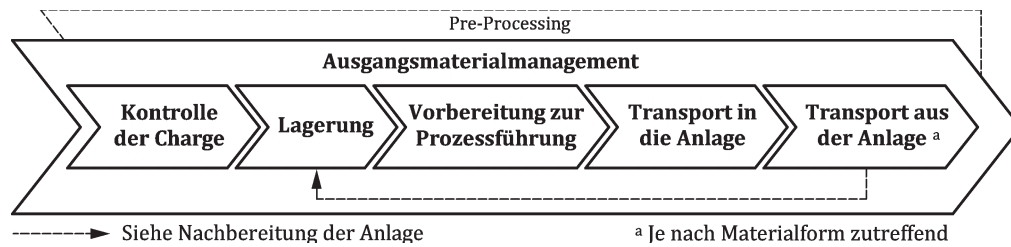


Bild 3 — Elemente des Ausgangsmaterialmanagements

Für das Ausgangsmaterial (Ausgangswerkstoff) ist die Festlegung wesentlicher Parameter und ggf. zugehöriger Prüfverfahren, die die Eignung eines Ausgangsmaterials für den jeweiligen Fertigungsprozess sicherstellen, zu definieren.

BEISPIEL 1 Korngrößenverteilung, Strangdurchmesser, Feuchtigkeit, Auffrischrate, Legierungselemente, Partikelform.

Zu den Anforderungen des direkten Fertigungsumfelds gehört der Umgang mit dem Material. Für die in Abschnitt 1 definierten Technologien kommen drei Typen von Ausgangsmaterialien zum Einsatz: Filament/Granulat, Pulver und Flüssigkeit.

Je nach Ausgangsmaterial besteht die Möglichkeit, einen geschlossenen Kreislauf herzustellen indem überschüssiges Material kontrolliert wieder eingespeist wird. Für die Sicherstellung der geforderten Eigenschaften des Ausgangsmaterials sind folgende Arbeitsschritte zu spezifizieren sowie deren Prüfung und Dokumentation zu definieren:

- Kontrolle der Charge: Eine nachvollziehbare Materialhistorie ist für die Materialzustände aus Tabelle 1 einzuhalten. Entsprechend der Verwendung kann ein eindeutiger Zusammenhang zwischen gefertigtem Bauteil und verwendetem Ausgangswerkstoff gefordert sein;

Tabelle 1 — Rückverfolgbarkeit, Zyklierungsgrad, Chargenreinheit

Herstellercharge Materialnutzung	Einzelcharge (Filament/Granulat, Pulver, Flüssigkeit)	Mischcharge (Pulver, Flüssigkeit)
Neu (Filament/Granulat, Pulver, Flüssigkeit)	Klare Zuordnung; Eindeutige Charakteristik des Ausgangswerkstoffes	Eingeschränkte Zuordnung; Eingeschränkte Charakteristik ^a des Ausgangswerkstoffes
Gebraucht (Pulver, Flüssigkeit)	Klare Zuordnung; Eingeschränkte Charakteristik ^a des Ausgangswerkstoffes	Erschwerte Zuordnung; Eingeschränkte Charakteristik ^a des Ausgangswerkstoffes
^a Rückverfolgbarkeit, Zyklierungsgrad, Chargenreinheit		

BEISPIEL 2 Werkstoff, Legierungselemente, Korngrößenverteilung, Partikelform, Chargennummer, Strangdurchmesser, Partikelrückstände.

- Lagerung: Geeignete Lagerkonditionen (mindestens Überwachung von Feuchte und Temperatur);
- Vorbereitung zur Prozessführung: Falls zutreffend, Anpassung des Ausgangsmaterials für die Prozessführung:
 - Sieben – nur für Pulver und Flüssigkeiten anwendbar: zugeführte und ausgesiebte Masse, Maschenweite, Siebzustand, verwendetes Schutzgas;
 - Vermischen – nur für Pulver anwendbar: Wiederverwendung von gebrauchtem Pulver, welches zuvor gesiebt und dem primären Ausgangsmaterial in einem definierten Mischverhältnis zugefügt wird.

BEISPIEL 3 Vermeidung von Kreuzkontamination, Überdruck vorhanden, Reinigungsplan, Fördersystem/Mischverhältnis.

- Transport in die Maschine: Vermeidung von Querkontamination, Kartuschen und Pulverbehälter versiegelt anbringen. Kontakt mit der Umgebung minimieren oder ausschließen. Die Werkstoffhistorie ist zu dokumentieren: zugeführte und entnommene Menge, Produktionsdurchlauf- und Chargenzuordnung;
- Transport aus der Maschine – nur für Pulver anwendbar: Eindeutige Kennzeichnung, Vermeidung von Querkontamination.

4.4 Anforderungen an die anlagenbezogene Prozessvorbereitung

In Bild 4 sind die einzelnen Schritte der anlagenbezogenen Prozessvorbereitung dargestellt.

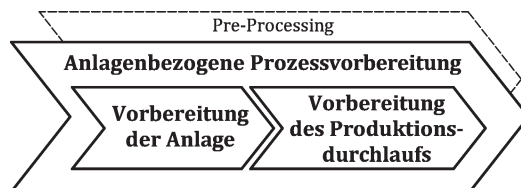


Bild 4 — Elemente der anlagenbezogenen Prozessvorbereitung

Zu den Anforderungen des direkten Fertigungsumfelds gehört der Umgang mit den AM-Maschinen, insbesondere das Be- und Entladen.

Sofern technisch zutreffend, sind die folgenden Arbeitsschritte zu spezifizieren sowie deren Prüfung und Dokumentation zu definieren:

- Vorbereitung der Anlage: Wiederherstellung des Ausgangszustandes der Maschine für den folgenden Produktionsdurchlauf:
 - Fachgerechte Vorbereitung der Maschine (z. B. Reinigung der Maschine) durch entsprechendes Personal (siehe 5.2). Die vom Hersteller angegebenen Vorbereitungsschritte (Prüfung der Extrusionsdüse, Beschichterorientierung, Beschichtierzustand bzw. -wechsel je Fertigungslos) für den Maschinenstart sind zu beachten;
 - Filterzustand: Je Werkstoff und Schutzgas ist die Filterlebensdauer bzw. der Filtertyp eindeutig zuzuordnen um eine reproduzierbare Schutzgasführung sicherzustellen;
 - Reinigung: Reinigungsvorgänge sind nach den Herstellerangaben durchzuführen (Optik, Aufnahme Bauplattform, Werkstoffbehälter, Entsorgung von Restbeständen in der Bauhülle, vollständige Entleerung des Überlaufschachts, usw.).

— Vorbereitung des Produktionsdurchlaufs:

- Bauplattform: Je nach Material sind die Mindestanforderungen (Werkstoff, Stärke, Ebenheit, Oberflächengüte, Sauberkeit, Temperatur, usw.) an der Bauplattform festzulegen;
- Ausgangsmaterialzustand in der Maschine;

BEISPIEL 1 Im PBF-LB/M Verfahren nach DIN 65124 oder nach Herstellerabnahme.

- je Pulver oder Flüssigkeit ist ein Beschichtertyp eindeutig zuzuordnen um einen reproduzierbaren Schichtauftrag sicherzustellen;
- ausreichend Ausgangsmaterial und falls zutreffend Stützmaterial, Bindemittel und Farbe für den Druckvorgang sind sicherzustellen;
- vorhandenes Ausgangsmaterial ist unbeschädigt;

BEISPIEL 2 Harz beinhaltet feste Partikel, Pulver beinhaltet Fremdkörper.

- Materialbehältnis bzw. Materialcharge ist eindeutig und wird erfasst.

4.5 Anforderungen an die Prozessdurchführung

In Bild 5 sind die einzelnen Schritte zur Prozessführung dargestellt.

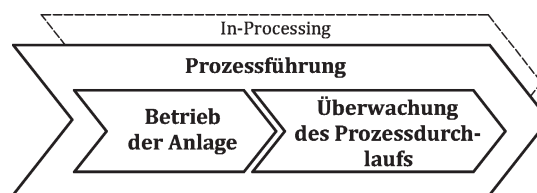


Bild 5 — Elemente der Prozessführung

Zu den Anforderungen des direkten Fertigungsumfelds gehört die Systemüberwachung während des Betriebs.

Sofern technisch zutreffend, sind die folgenden Arbeitsschritte zu spezifizieren sowie deren Prüfung und Dokumentation zu definieren:

- Betrieb der Anlage: Starten und Durchführung des Produktionsdurchlaufes:
 - die vom Hersteller angegebenen Betriebsschritte sind zu beachten;
 - Maschinenstart: Arbeitsanweisungen sind zu befolgen;
 - Protokollierung des Produktionsdurchlaufs:
 - Datensatz des Fertigungsloses (Geometrie, Anzahl, Schichtstärke, Belichtungsstrategie, usw.);
 - Prozessparameter (z. B. Vorschubgeschwindigkeit, Spülvorgänge, Materialzufuhr bzw. Schichtauftrag, Kalibrierung, Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Sauerstoffgehalt, Temperaturkurve, Druckverlauf);
 - Status der Komponenten (Laserstrom, Förderrate, Druckkopfstatus, Achspositionierung, Filterstatus, Schutzgasgeschwindigkeit, Kühlwassertemperatur, usw.);
 - Werkstoff und Maschinendaten (Seriennummer, Bauhülle, Extrusionskopf, Heizelemente, Lasertyp, Scanner-Einheit, Schutzgas, Partikel- und Ölfilter, Betriebstemperatur).

- Überwachung des Prozessdurchlaufs: Eine automatisierte AM-Prozessüberwachung anhand eingebauter Sensorik, sofern diese vorhanden und ausgereift sind, kann zum Zweck der Qualitätssicherung verwendet werden:
 - Aufzeichnung und Bewertung des Produktionsdurchlaufs mittels bildgebender Verfahren: Die erhobenen Daten ermöglichen die Auswertung von Fehlern bzw. die Rückführung von Bauteildefekten auf Prozessabweichungen;
 - Schichtweise Kontrolle der Materialzugabe: Eine gleichmäßige Verteilung auf der Baufläche des aufgetragenen Schichtmaterials lässt sich durch eine (zum Teil echtzeitgeregelte) Schichtfehleranalyse in die Qualitätssicherung einbauen;
 - Schmelzbadüberwachung – nur für PBF/M und DED Verfahren anwendbar: Die vollständige Materialverbindung wird am Schmelzbad kontrolliert, in dem Prozessabweichungen erkannt werden. Dies lässt einen Rückschluss auf potenzielle Bauteilfehler zu;
 - Laserleistung am Baufeld – nur für PBF, DED und VPP Verfahren anwendbar: Mit einem vom Laser entkoppelten Messgerät lässt sich die Laserleistung am Baufeld aufnehmen. Dies schließt Annahmen von Störelementen (effektive Absorptionsrate, Laserschutzscheibe, Schmauchentwicklung, usw.) aus.

4.6 Anforderungen an die anlagenbedingte Prozessnachbereitung

In Bild 6 sind die einzelnen Schritte der anlagenbedingte Prozessnachbereitung dargestellt.

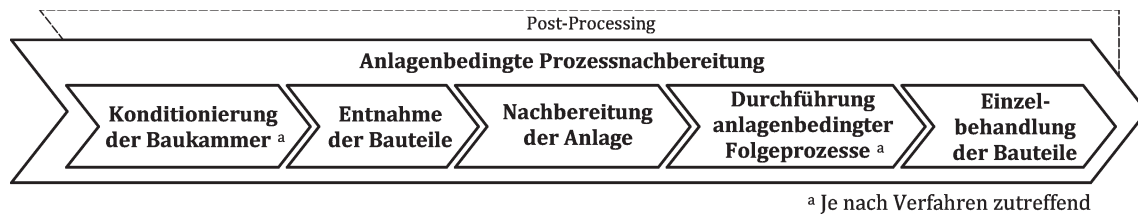


Bild 6 — Elemente der anlagenbedingte Prozessnachbereitung

Die Verfahren zur Nachbearbeitung sind nach Möglichkeit einheitlich zu gestalten und sind in der Qualifizierung zu integrieren (siehe 5.4). Hierfür sind angewandte Verfahren im Sinne der Nachweisdokumentation dem Bauteil eindeutig zuordnungsbar zu archivieren. Sofern technisch zutreffend, sind die folgenden Arbeitsschritte zu spezifizieren und kontrolliert durchzuführen sowie deren Prüfung und Dokumentation zu definieren:

ANMERKUNG 1 Der Umfang der Nachbearbeitung ergibt sich durch die ausgewählte additive Fertigungstechnologie.

- Konditionierung der Baukammer: Falls zutreffend, kontrollierte Akklimatisierung der Baukammer;

BEISPIEL 1 Abkühlvorgang mit definierter Temperaturkurve.

- Datensicherung- und Archivierung: Sicherung der Protokolle/Recordingdaten nach Abschluss des Produktionsdurchlaufes;
- Entnahme des Bauteils: Entnahme der Bauplattform samt Bauteilen aus der Maschine;

ANMERKUNG 2 Unter Umständen lässt sich das Bauteil direkt aus der Maschine entnehmen.

- Nachbereitung der Anlage: Wiederherstellung des Ausgangszustandes der Maschine für den folgenden Produktionsdurchlauf (siehe 4.4);

- Durchführung anlagenbedingter Folgeprozesse zur Erreichung der gewünschten Materialeigenschaften:
 - Ausbrennen des Binders – für BJT/M, ggf. für MEX/M Verfahren: Ein geeigneter Sintervorgang ist für die weitgehende/vollständige Entfernung des Bindematerials zu wählen;
 - Imprägnierung – für BJT/M, ggf. für MEX/M Verfahren: Eine geeignete Schmelzimprägnierung ist für die weitgehende/vollständige Entfernung der Restporosität zu wählen;
 - heißisostatisches Pressen (HIP) – primär für PBF-LB/M, PBF-EB und BJT/M Verfahren: Ein geeignetes heißisostatisches Pressen ist für die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften zu wählen;
 - Temperaturbehandlung (Temperatur- und Druckverlauf, Atmosphäre Schutzgas/Vakuum);
 - UV-Härtung – nur für photosensitive Flüssigkeiten anwendbar: Eine geeignete Behandlung ist für die weitgehende/vollständige Aushärtung der Bauteile zu wählen.
- Einzelbehandlung der Bauteile zur Ermöglichung einer bauteilbezogenen Nachbereitung:
 - Trennen der Bauteile von der Substratplatte bzw. Entpacken aus dem Pulverkuchen und sortieren;
 - Reinigen bzw. Entpulvern bzw. Entfernen von Materialeinschlüssen;
 - Entfernen der technologiespezifischen Hilfs- & Opferstrukturen (z. B. Stützstrukturen, Anguss)
 - werden 3D-Datensätze aufgrund einer automatisierten mechanischen Nachbearbeitung benötigt, so ist die Vorgehensweise, um das richtige Datenformat zu erzielen, festzuhalten.

BEISPIEL 2 Die Prozessbeschreibung sieht vor, dass beim Dateneingang stets ein STEP Format vorliegt, welches zur maschinellen Nachbearbeitung verwendet wird.

- Definierte Oberflächenbehandlungen: Glätten, Schmirgeln, Strahlen, Entgraten, Gleitschleifen, usw.

Es folgt die Zuordnung und sachgemäße Zwischenverpackung der Bauteile.

4.7 Anforderungen an die bauteilbezogene Nachbearbeitung

Dieses Dokument hat nicht den Anspruch, jegliche Spezifikationen oder Empfehlungen zur bauteilbezogenen Nachbearbeitung vorzugeben, sondern dient einer rein informativen Einordnung (siehe A.1) der Fertigungsabläufe. Die in der Endbearbeitung üblicherweise angewendeten Verfahren inklusive Versand sind zum größten Teil spezifisch genormt. Die entsprechenden normativen Dokumente sind dafür anwendbar.

Somit lässt sich dieses Dokument als Grundlage für den AM-spezifischen Prozess heranziehen, und mit einem beliebigen Qualifizierungsstandard für anschließende Fertigungsschritte erweitern. Die Qualitätssicherung muss über den gesamten Fertigungsablauf erfolgen.

4.8 Prozessqualifizierung

Das Hauptziel der Prozessqualifizierung des additiven Fertigungsprozesses ist die Feststellung reproduzierbarer, produktbezogener Kenngrößen. Sie beinhaltet die Prüfung von Referenzprobekörpern in statistisch signifikantem Umfang, die die zu qualifizierende Prozesskette durchlaufen haben. Die Prozessqualifizierung des additiven Fertigungsprozesses bildet somit die Grundlage sowohl für die Ausweisung reproduzierbarer Kenngrößen als auch für die Bewertung der aktuellen Prozessqualität im Sinne der fortlaufenden Qualitätssicherung. Die Fertigungsbegleitproben dienen somit nicht nur der quantitativen Bestimmung von Materialkennwerten. Vielmehr werden diese für einen qualitativen Vergleich mit einem zuvor, auf Basis der Lage- und Streuparameter der Materialkennwerte, ermittelten Toleranzband herangezogen um eine Reproduzierbarkeit der Prozessergebnisse nachzuweisen.

Die Qualifizierung gilt nur für eine Fertigungsanlage mit einem Prozessparametersatz und einem Ausgangsmaterial einschließlich der festgelegten anlagenbezogenen Vor- und Nachbearbeitung. Sie ist spezifisch und kann nicht für Anlagentypen, Ausgangsmaterial, und Fertigungsparametersätze generalisiert werden. Änderungen innerhalb der gesamten AM-Prozesskette erfordern eine Requalifizierung.

Die in 4.1 bis 4.7 festgelegten Prozessschritte sind aufeinanderfolgend zu spezifizieren sowie deren Prüfung und Dokumentation festzulegen. Dies beinhaltet beispielsweise:

- Parametersatz: Die zur Qualifizierung gewählten Prozessparameter sind festzulegen, eindeutig zu bezeichnen und zu dokumentieren. Änderungen der Prozessparameter erfordern eine Requalifizierung.
- Kennwerte/Probekörper: Sind Kennwerte für den Werkstoff in konventionellen Herstellverfahren in Normen festgelegt, sind diese Kennwerte anhand von Probekörpern nach den normativen Anforderungen zu ermitteln.
- Probenanzahl/Produktionsdurchläufe: Die Anzahl der Proben und Produktionsdurchläufe sind in statistisch repräsentativer Weise zu wählen.
- Positionierung/Ausrichtung: Die Anordnung und Ausrichtung der Proben ist entsprechend der Gegebenheiten der AM-Anlage und des Anwendungsvorhabens in geeigneter Weise zu wählen.
- Datenweitergabe: Bei Datentransfer über mehrere Softwareprogramme ist eine Qualifizierung der Datenverarbeitung durchzuführen.

BEISPIEL Bei der Generierung der Schichtdaten über mehrere Schnittstellen erfolgt die Qualifizierung anhand einer relevanten Geometrie.

Neben den oben genannten Aspekten ist zusätzlich festzulegen, wie mit außerplanmäßigen Störungen während und nach der Qualifizierung des additiven Fertigungsprozesses umzugehen ist.

5 Qualitätssicherung

5.1 Allgemeines

Die einzelnen Bestandteile der Qualitätssicherung umfassen Personal, Dokumentation und Infrastruktur, wie in Bild 7 dargestellt.

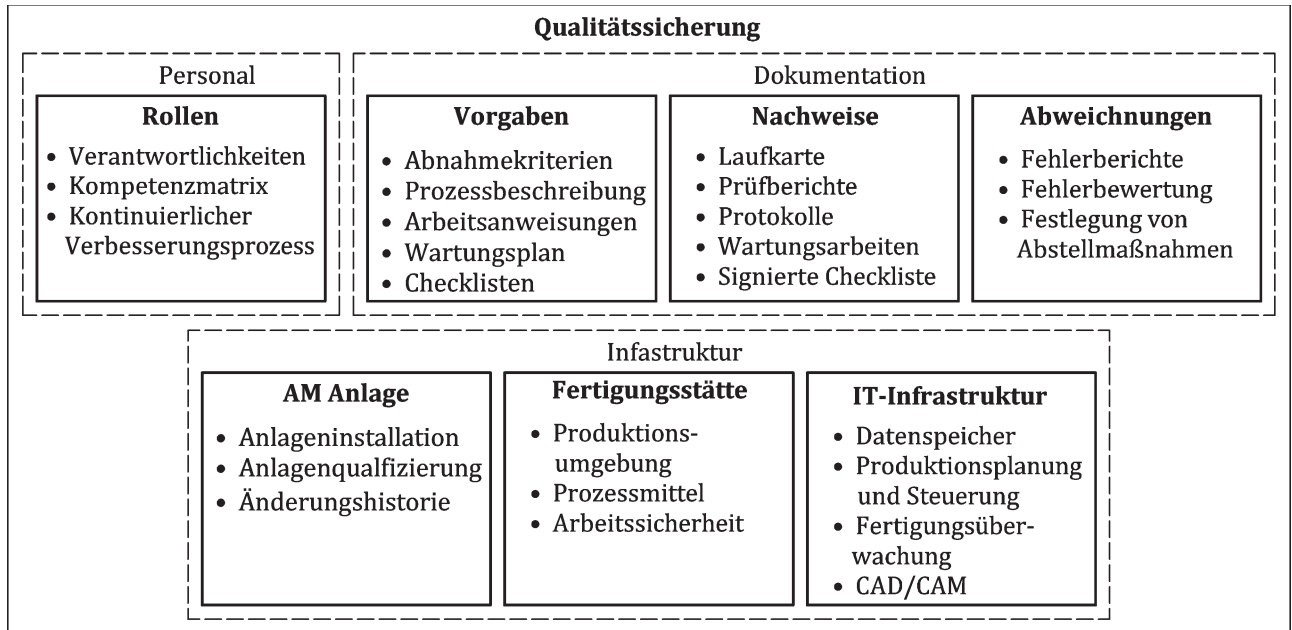


Bild 7 — Elemente der Qualitätssicherung

5.2 Personelle Anforderungen

Der Personaleinsatz im qualitätsrelevanten Bereich entlang der Prozesskette muss systematisch organisiert und dokumentiert werden. Das Personal muss entsprechend der Aufgabe qualifiziert sein. Die Dokumentation muss im Sinne einer größtmöglichen Akzeptanz erfolgen. Dies kann bspw. mit Hilfe von Elementen wie Sprache, Stil, Piktogrammen oder Zugänglichkeit erreicht werden.

Fähigkeitsnachweise des Personals, Dokumentation über Schulungsmaßnahmen und die Kenntnis der Qualitätsziele müssen vorhanden sein.¹

Rollen entlang der additiven Prozesskette sind:

- CAM-Ingenieur;
- Maschinenbediener (für PBF-LB/M Systeme siehe DIN 35225);
- Prüfpersonal (für zerstörungsfreie Prüfungen siehe DIN EN ISO 9712);
- QM-Manager/Produktionsleiter/AM-Aufsichtsbeauftragter: Die Verantwortlichkeiten dieser Rolle(n) beinhalten die Wartung der Systeme, die Umsetzung und Einhaltung der Arbeitsschutzvorkehrungen, die Prozessqualifizierung und die interne (oder externe) Prüfung der erforderlichen Qualitätsaufzeichnungen an einem oder mehreren zufällig gewählten Jobaudits. Die Dokumentationsprüfung sollte von geeignetem Fachpersonal mit nachweislich vorhandenem technologischem Verständnis durchgeführt werden. Dazu gehören: Wissen über aktuell verfügbare AM-

¹ Internationale Normung der entsprechenden Ausbildungsinhalte ist aktuell in Erarbeitung (ISO/TC 261/ASTM F42, JG 74).

Normen, fundierte Expertise der jeweilig zutreffende Prozesskategorie (nach E DIN EN ISO/ASTM 52900:2018-06) und dessen Qualitätssicherungsaspekte.

ANMERKUNG Zur Dokumentationsprüfung gehört die Prüfung der digitalen und physischen Produktionsschritte.

Im Rahmen der in Abschnitt 4 aufgeführten Qualitätssicherungsaspekte sind Abnahmekriterien – in Bezug auf technologiespezifische Erfüllungskriterien – durch geeignetes Fachpersonal festzulegen.

5.3 Dokumentation und Nachverfolgung der Arbeitsschritte

Zum Nachweis qualitätsgesicherter Prozesse ist eine Dokumentation des Fertigungsprozesses und der Arbeitsschritte erforderlich. Zu den Anforderungen an das direkte Fertigungsumfeld gehören folgende produktionsnotwendige Vorgaben:

- Prozessbeschreibung: Beschreibung aller relevanten Prozesse entlang der Prozesskette (siehe Bild 1);
- Arbeitsanweisung: Vorgehensweise bei der Durchführung der jeweiligen manuellen Tätigkeit zu den jeweiligen Stationen. Fehleranfällige und qualitätsentscheidende Schritte sind hervorzuheben, wenn anwendbar inklusive der entsprechenden Kennzahlen;

BEISPIEL 1 Reinigung der Anlage (Additiver Fertigungsprozess).

BEISPIEL 2 Dokumentation der versionierten, qualifizierten Maschinenparametern je durchgeführter Produktionsdurchlauf.

- Wartungsprotokolle: Wartungsabläufe, -abstände und Maschinenkalibrierung;
 - Regelmäßige Vermessung der Komponenten mit einem direkten Einfluss auf den Druckprozess (z. B. Laserfokus- und Laserleistungsmessung, Kalibrierung der Vorschubrate des Druckkopfes) in für die Applikation geeigneter Weise und Intervallen.

Reinigungsarbeiten müssen nach Wartungsplan durchgeführt werden. Wartungs- und Instandhaltungsaktivitäten müssen für den eingesetzten Maschinentyp nach den Vorgaben der Inspektions- und Wartungspläne der Hersteller erfolgen. Dies gilt sowohl für die Häufigkeit der durchzuführenden Wartungsarbeiten als auch für die Zuständigkeiten für die notwendigen Tätigkeiten. Typischerweise müssen baujobbegleitende, tägliche, wöchentliche und monatliche Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten vom Betreiber/Bediener der Fertigungsanlage erledigt werden, deren Durchführung in geeigneter Weise nachzuweisen ist.

- Abnahmekriterien: Definierte und referenzierte Methodik um den erfolgten Teilprozess zu bewerten. Die einzelnen Kontrollpunkte entlang der gesamten Prozesskette bedürfen einer Entscheidungsgrundlage. Diese muss dem Personal bekannt und leicht zugänglich sein;

BEISPIEL 3 Checkliste, Fehlerkatalog (Datenaufbereitung), zulässiger Zustand der Linse oder des Beschichters, haptisches oder optisches Grenzmuster (Strahlvorgang).

- Prüfmittelfähigkeit ist nachzuweisen;
- Dokumentation der Herstellung der Fertigungsbegleitproben; Prüfbericht; Fehlerbericht;
- Nachweispflicht der Qualität des Ausgangswerkstoffs;
- Aufzeichnung der Kennwerte je Maschine je Produktionsdurchlauf; anlagenbezogene Vor- und Nachbereitung; Prozessdatenaufnahme; Protokoll der Installationsqualifizierung, Abnahme der Fertigungsanlage durch Hersteller;

- Prüfungen des Prozessergebnisses auf Reproduzierbarkeit durch Auswertungen: Turnusmäßige Kontrolle der Fehlerquoten bzw. Prozessabweichungen, die auf eine Korrekturmaßnahme rückschließen lässt (mögliche Effekte siehe A.4).

Ein generischer Prozess, der die Einhaltung geforderter Bauteilspezifika sicherstellt, muss vorhanden sein. Dieser kann folgendes umfassen:

- Fertigungsüberwachung: Dokumentationspflicht der durchgeführten Einzelprozesse (z. B. Laufkartensystem) um eine Rückverfolgbarkeit der Produktionsschritte für einzelne Bauteile sicherzustellen; Datenaufbereitung; anlagen- und bauteilbezogene Nachbearbeitungsschritte;

BEISPIEL 4 Bauteilakte, signierte Laufkarte, Checkliste, Personalqualifizierung.

- Prüfung der Fertigbarkeit: siehe 6.2;
- Auftragsabwicklung: Eine vollständige Auftragsabwicklung umfasst insbesondere die Spezifikation von bauteilbezogenen Qualitätskriterien und deren Prüfung;
- Reparatur: Ein Prozess für die Beseitigung von Bauteilfehlern muss definiert werden.

BEISPIEL 5 Sonderfreigabe durch den Kunden bei zusätzlicher thermischer Behandlung um den Verzug auszugleichen.

5.4 Infrastruktur des additiven Fertigungszentrums

Bei der Infrastruktur des additiven Fertigungszentrums müssen die folgenden Anforderungen erfüllt werden:

- Arbeitssicherheit: Ein sicheres Arbeitsumfeld unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorschriften ist zu gewährleisten. Dazu gehört die Personalunterweisung der Arbeitsschutzmaßnahmen und -ausrüstung. (z. B. nach DIN ISO 45001, VDI 3405 Blatt 6.1 [PBF-LB/M]).

BEISPIEL 1 Einrichtung einer angemessenen Lüftung für die verarbeiteten Werkstoffe in der Fertigungsstätte; Angemessene Lagerung von reaktiven Pulvermaterialien; Sauerstoffüberwachung bei Einsatz von Gasen.

- Anlageninstallation: Aufstellbedingungen der Fertigungsanlagen inkl. Referenzproduktionsdurchlauf für Laserfokus, Dichte, usw. (für PBF-LB/M Systeme siehe DIN 35224). Der Nachweis zur Einhaltung der vorgegebenen Aufstellbedingungen ist durch entsprechende Dokumente zu erbringen (z. B. Servicebericht, Endabnahmebericht, Berichte zu Modifikationen der Anlage, Bezeichnung des Maschinentyps inkl. Versionsstand der Softwarekomponenten und ggf. Versionsstand der Hardwarekomponenten, Maschinenidentifikationsnummer, usw.). Alle qualitätsrelevanten Anlagenparameter müssen in der Dokumentation enthalten sein.
- Wartung: Durchführung der Instandhaltung durch Fachpersonal (siehe 4.2) inkl. Nachweis der Kompetenz je nach Umfang (täglich/wöchentlich/monatlich/quartalsweise/halbjährlich/usw.). Im Maschinenlebenszyklusdokument sind alle Aktivitäten und Änderungen festzuhalten.

ANMERKUNG Die Maschineninstallation und -wartung bezieht neben Systemen der Prozessführung auch Geräte der anlagen- und bauteilbezogenen Nachbereitung ein, z. B.:

- Siebstation (Siebzustand/Prüfung/Dichtigkeit/Materialreinheit);
- Entpulverungsanlage, Strahlkabinen (Materialreinheit), Gleitschleifmaschine;
- Bandsäge/Drahterodieranlage;
- UV-Ofen, Imprägnierungsanlage, Wärmeofen.

- Produktionsumgebung: Die Vorgaben des Anlagenherstellers zu Umgebungs- und Installationsbedingungen sollten eingehalten werden.

Ausgehend von den Anforderungen an das jeweilige Fertigungsverfahren und den jeweiligen Einsatzzweck können die Aufstellbedingungen folgende Aspekte umfassen:

- IT-Infrastruktur: Sicherheit der Serverlandschaft. Bereitstellung der IT-Hardware. Sicherungs- und Archivierungssysteme, usw. (z. B. nach DIN EN ISO/IEC 27001);
- Bodenbelastbarkeit und Ebenheit des Untergrunds, Vibrationsfreiheit;
- umfassende Zugänglichkeit, Mindestabstand zu benachbarten Anlagen und Einrichtungen;
- Abwesenheit von Störquellen mit hochfrequenter und elektromagnetischer Strahlung;
- keine wärmeerzeugenden oder wärmeentziehenden Quellen im Nahbereich;
- keine einseitige und/oder örtliche Erwärmung oder Abkühlung der Anlage;
- klimatisierte Räume mit kontrollierter bzw. zulässiger Temperatur, Feuchte, Lichtverhältnisse, Luftpartikelanteile;
- Sauberkeit der Fertigungsumgebung;
- protokollierte Installationsqualifizierung und Aufstellbedingungen der Fertigungsanlage;
- Protokolle über alle qualitätsrelevanten weiteren Einflußgrößen auf die Funktion einer Anlage;
- Sauberkeit der Prozessmittel: Alle Werkzeuge und Betriebsmittel sollten frei von Verschmutzung sein;
- Bereitstellung der Prozessmittel: Eindeutig gekennzeichnete Werkzeuge (Zangen, Schrauben), Betriebsmittel (Druckluft, Filterkaskaden, Inertgasversorgung: Temperatur und Reinheit, Kühlmittel, Verschleißteile, usw.);

BEISPIEL 2 Zuweisung eines Werkzeugkastens je Material; Lagerbestände von Einwegbeschichtern

Das Fertigungsmanagementsystem stellt sicher, dass die richtigen Schritte in der qualifizierten Abfolge mit den entsprechenden Parametern erfolgen. Dazu gehören die Planung der Maschinenauslastung und der Materialvorrat entsprechend einem festgelegten Mindestbestand. Ein System für die Planung der Engpässe (AM-Anlagen) ist vorzuweisen.

5.5 Qualitätskontrollen

In Bild 8 sind die einzelnen Schritte der Qualitätskontrolle dargestellt.

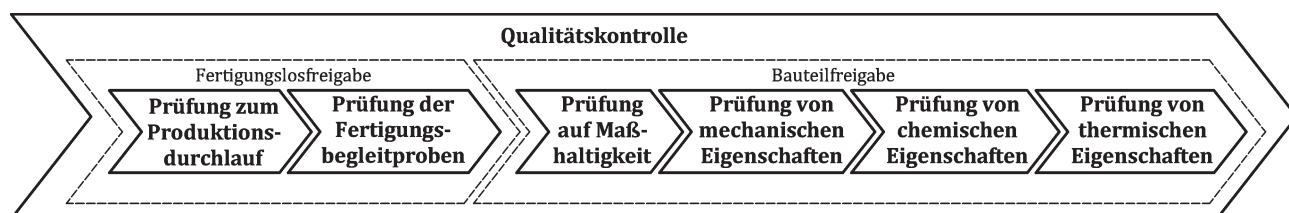


Bild 8 — Elemente der Qualitätssicherung

Prozessbezogene Prüfungen sind im Rahmen einer Überwachung des Fertigungsprozesses durchzuführen.