



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Tim Witt

## **Zulassung von additiv gefertigten Flugzeugstrukturbauteilen**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Tim Witt**

**Zulassung von additiv gefertigten  
Flugzeugstrukturbauteilen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Heinkel Engineering GmbH & CO. KG.  
Hein-Saß-Weg 30  
21129 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. Jutta Abulawi  
Zweitprüfer/in: Markus Steinberg

Abgabedatum: 01.09.2020

# **Zusammenfassung**

**Tim Witt**

## **Thema der Bachelorthesis**

Zulassung von additiv gefertigten Flugzeugstrukturbauteilen

## **Stichworte**

Additive Fertigung, 3D-Druck, Zulassung, Zulassungsprozess, Qualifizierung, Zertifizierung, Qualitätssicherung, Fertigungstechnologie, Strukturbauteile, Luftfahrtvorschriften, Nachweisführung, Bauvorschriften, Standardisierung

## **Kurzzusammenfassung**

Die fast grenzenlose Designfreiheit der additiven Fertigung macht es möglich, Leichtbaupotentiale von Flugzeugstrukturbauteilen maximal auszuschöpfen. Durch die fortschreitende Innovation wird diese generative Fertigungstechnologie zunehmend für Anwendung in zivilen Luftfahrtprodukten verwendet. Aufgrund der hohen Prozessvariabilität ist die additive Fertigung nicht deterministisch. Dadurch stellte sich die Nachweisführung im Rahmen des obligatorischen Zulassungsprozesses als aufwendig und kostspielig heraus. Diese Tatsache führt zu einer scheinbar unüberwindbaren Zulassungshürde und entschleunigt die Innovation. Der Mangel an öffentlich verfügbaren, optimierten Prozessen, Standardisierungen und Spezifikationen verstärkt dies. Hier setzt diese Arbeit an. Aufbauend auf einer Recherche zu praktizierten Zulassungsprozessen und Standardisierungen wird ein Vorschlag für einen generischen Zulassungsprozess additiv zu fertigender Flugzeugstrukturbauteile ausgearbeitet und anschließend auf eine Bauteilzulassung beispielhaft angewendet. Darüber hinaus wird geklärt, inwiefern die Methoden bewährter Zulassungsprozesse herkömmlicher Fertigungstechnologien auf die additive Fertigung adaptierbar sind.

**Tim Witt**

## **Title of the paper**

Certification of additively manufactured aircraft structural parts

## **Keywords**

Additive Manufacturing, 3D-Printing, approval, certification, qualification, quality control, manufacturing technology, structural parts, aviation regulations, verification of compliance, certification specifications, standards

## **Abstract**

Due to the design freedom of additively manufactured parts, lightweight construction potential of aircraft structural components can be maximized. Progressive innovation of this relatively new manufacturing technology recently led to an increasing utilization for applications in civil aviation products. However, due to the high process variability, additive manufacturing is not deterministic. Thus, the verification in the context of the obligatory certification process turned out to be complex and costly. This leads to a certification barrier. The lack of publicly available, optimized processes, standardization and specifications reinforces this. Therefore, this thesis contains a development of a generic certification process for aircraft structural parts based on a research on practiced and approved processes by aviation industry. Furthermore, it will be clarified to what extent the methods of proven certification processes of conventional manufacturing technologies can be adapted to additive manufacturing

---

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	VII
Abkürzungen .....	VIII
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Ziel dieser Arbeit .....	2
1.3 Aufbau und Methodik .....	2
1.4 Wichtige Begriffsdefinitionen .....	3
Teil I: Stand der Technik	
<b>2 Werkstoffe und Fertigungstechnologien .....</b>	<b>6</b>
2.1 Fertigungstechnologien – Einteilung und Beispiele .....	6
2.2 Additive Fertigung .....	7
2.2.1 Prozessketten .....	8
2.2.2.1 Rapid Prototyping .....	10
2.2.2.2 Rapid Manufacturing .....	11
2.2.2.3 Rapid Tooling .....	11
2.2.3 Verfahren .....	11
2.2.3.1 Fused Deposition Modeling .....	12
2.2.3.2 Pulverbettverfahren .....	12
2.3 Materialeigenschaften,-Kennwerte und -Tests .....	13
2.4 Werkstoffhandbücher .....	14
<b>3 Vorschriften in der Zivilluftfahrt .....</b>	<b>15</b>
3.1 Regelwerke .....	15
3.2 Produkt- und Betriebszulassungen .....	17

---

3.3	Allgemeiner Zulassungsprozesses.....	19
3.3.1	Ablauf.....	19
3.3.2	Nachweisführung.....	21
3.4	Relevante Bauvorschriften .....	23
3.5	Stellungnahmen der Behörden zu AM .....	25
3.5.1	EASA Certification Memorandum.....	25
3.5.2	FAA und Workshops .....	27
<b>4</b>	<b>Standardisierung der additiven Fertigung .....</b>	<b>31</b>
4.1	Standardisierungsaktivitäten.....	32
4.2	Zulassungsrelevante Normen .....	33
4.2.1	DIN SPEC 17071.....	34
4.2.1.1	Prozessschritte und Anforderungen.....	35
4.2.1.2	Prozessqualifizierung.....	37
4.2.1.3	Qualitätssicherung .....	38
4.2.2	ISO/ASTM 52902.....	41
4.2.2.1	Testkörperherstellung .....	41
4.2.2.2	Testkörpergeometrien .....	42
4.2.3	ISO/ASTM 52904.....	42
<b>5</b>	<b>Praktizierte Zulassungsprozesse aus der Luftfahrtindustrie.....</b>	<b>45</b>
5.1	General Electric .....	45
5.1.1	AM Bauteile .....	45
5.1.2	Identifikation von Problemen und kritischen Prozessparametern .....	47
5.1.3	Q&C Ansatz .....	48
5.2	Aerospace Industries Association.....	52
5.2.1	Material,- Maschinen- und Prozessqualifizierung .....	53
5.2.2	Ermittlung der Materialeigenschaften .....	54
5.2.3	Bauteilqualifizierung .....	57
5.2.4	Qualitätskontrollen .....	58
5.3	NCAMP / Stratasys .....	59
5.3.1	NCAMP-Prozess .....	59
5.3.2	Zugelassene Materialien, Prozesse und Bauteile mittels NCAMP .....	61
5.3.3	Prozessqualifizierung.....	61
5.3.4	Ablauf des Zulassungsprozesses.....	64

## Teil II: Ausarbeitung eines Zulassungsprozesses

---

<b>6</b>	<b>Analyse</b> .....	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>AM Zulassungsprozess</b> .....	<b>70</b>
7.1	Anwendungsbereich .....	72
7.2	Ablauf.....	72
7.3	Entwicklungsphase .....	74
7.4	Verifizierungsphase.....	76
7.4.1	Materialqualifizierung .....	77
7.4.2	Prozessqualifizierung.....	78
7.4.2.1	Fertigung der Testkörper .....	79
7.4.2.2	Tests & Inspektion.....	82
7.4.3	Bauteilqualifizierung .....	85
7.5	Validierungsphase .....	87
<b>8</b>	<b>Anwendung als Bauteilzulassung</b> .....	<b>89</b>
8.1	Angepasster Bauteilzulassungsprozess.....	89
8.2	Beispielzulassung eines Flugzeugstrukturbauteils .....	91
8.2.1	Bauteilinformationen .....	91
8.2.2	Vorqualifizierungsphase .....	92
8.2.3	Bauteilqualifizierung .....	95
8.3	Konstruktion von AM-Bauteilen.....	99
<b>9</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>101</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>106</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Additiv gefertigter Halter für den Airbus A350 XWB [1] .....	1
Abbildung 1.2	Aufbau und Methodik dieser Arbeit.....	3
Abbildung 1.3	Schema über das Zusammenspiel der Begrifflichkeiten Verifizierung, Qualifizierung, Zertifizierung und Validierung .....	4
Abbildung 2.1	Einteilung der Fertigungstechnologien in sechs Hauptgruppen nach DIN 8580 [9] .....	6
Abbildung 2.2	Das Schichtaufbauprinzip der additiven Fertigung [14].....	8
Abbildung 2.3	Allgemeine Prozesskette eines additiven Fertigungsprozesses .....	9
Abbildung 2.4	Stütze für ein Bauteil mit überhängenden Partien.....	10
Abbildung 2.5	Beispiel für eine Anwendung von Stützstruktur am Airbus A350 XWB Bracket [14].....	10
Abbildung 2.6	Prinzip des FDM-Verfahrens mit (a) Aufbau einer FDM-Anlage [14] und (b) Extrusion aus der Düse [15].....	11
Abbildung 2.7	Prinzip von Pulverbettverfahren [15] .....	12
Abbildung 2.8	Testpyramide für die Zulassung von Materialien für Flugzeugbauteile [18] .....	13
Abbildung 3.1	Schematische Darstellung der Regelwerke in der zivilen Luftfahrt am Beispiel der EASA und <i>Initial Airworthiness</i> .....	16
Abbildung 3.2	Übersicht der Musterzulassungen und deren Anforderungen an den Antragssteller nach Part-21 .....	18
Abbildung 3.3	Ablauf eines Zulassungsprozesses (Musterprogramm). Aus [26].....	20
Abbildung 3.4	Detaillierter Ablauf eines Zulassungsprozesses aus Sicht der EASA. In Anlehnung an [35].....	22
Abbildung 3.5	Druckergebnisse (LPBF) von Überhängen verschiedener Größen (oben) und Winkel (unten). Aus [37].....	29
Abbildung 3.6	Fünfstufiger Ablaufplan zur Ermittlung von Auslegungswerten (design values) für Q&C von AM Bauteilen nach FAA. Aus [40].....	29
Abbildung 3.7	Zusammenspiel von Standardisierungsorganisationen, Luftfahrtindustrie und Zulassungsbehörden bei der Entwicklung und Qualifizierung von Normen und Spezifikationen. Aus [39].....	30
Abbildung 4.1	"Qualitätsgesicherter Prozess in einem additiven Fertigungszentrum" [Quelle].....	34

<b>Abbildung 4.2</b>	Abschnitte der qualitätssichernden Maßnahmen eines additiven Fertigungsprozesses in Anlehnung an die DIN SPEC 17071.....	34
<b>Abbildung 4.3</b>	Elemente der Qualitätssicherung nach DIN SPEC 17071.....	39
<b>Abbildung 4.4</b>	Ansätze zur Qualitätskontrolle [45].....	40
<b>Abbildung 4.5</b>	Beispielhafte Testkonfiguration der Testkörper mit Ausrichtung und Positionierung im Bauraum nach ISO/ASTM 52902 [Quelle] .....	42
<b>Abbildung 4.6</b>	Beispiele für Rohlinge für den Zugversuch sowie zusätzliche Probekörper, die an fünf Stellen auf der Bauplatzform platziert sind [52904] .....	43
<b>Abbildung 5.1</b>	Additiv gefertigtes T25 Sensorgehäuse für das GE90 Triebwerk [Quelle].....	46
<b>Abbildung 5.2</b>	Additiv gefertigte Bauteile von GE in zivilen Triebwerken [Quelle] .....	47
<b>Abbildung 5.3</b>	Kraftstoffdüsen spitze des GE LEAP Triebwerks [Quelle].....	47
<b>Abbildung 5.4</b>	Fertigungsbedingte Unsicherheiten bei den zulässigen Spannungen eines AM-Materials [56] .....	48
<b>Abbildung 5.5</b>	Ablaufplan von der Idee zur Zertifizierung eines additiv gefertigten Bauteils bei GE [53].....	49
<b>Abbildung 5.6</b>	Entwicklung des additiven Fertigungsprozesses bei GE mit über 100 Laser- und Maschinenparametern .....	50
<b>Abbildung 5.7</b>	Berührungspunkte von Qualifizierung und Inspektion bei GE [53].....	51
<b>Abbildung 5.8</b>	Informationen über die Fertigung bei GE [57].....	51
<b>Abbildung 5.9</b>	Entwicklungs- und Qualifizierungsschritte der additiven Fertigung nach AIA [59] .....	53
<b>Abbildung 5.10</b>	Unterschied zwischen den maximal zulässigen Spannungen und den Auslegungswerten [59].....	57
<b>Abbildung 5.11</b>	Zusammensetzung des Stratasys Prozesses mit (a) Granulat des Certified ULTEM 9085 Resin [72], (b) Stratasys Fortus 900mc [73], (c) zugelassene Bauteile im Airbus A350 [71] .....	61
<b>Abbildung 5.12</b>	Schematischer Aufbau der Fertigung der Prüflinge für die Prozessqualifizierung [69].....	62
<b>Abbildung 5.13</b>	Ausrichtung der Prüflinge im Bauraum [69].....	63
<b>Abbildung 5.14</b>	Ablauf des NCAMP/Stratasys Zulassungsprozesses.....	65
<b>Abbildung 7.1</b>	Legende der verwendeten Symbole für die Darstellung des Zulassungsprozesses.....	70
<b>Abbildung 7.2</b>	Ablauf des AM Zulassungsprozesses vom Entwicklungsvorhaben bis zur Musterzulassung.....	71
<b>Abbildung 7.3</b>	Ablauf der Entwicklungsphase im AM-Zulassungsprozess .....	75
<b>Abbildung 7.4</b>	Ablauf der Verifizierungsphase des AM Zulassungsprozesses.....	76

---

<b>Abbildung 7.5</b>	Qualifizierungsablauf eines pulverförmigen Ausgangsmaterials mit Berücksichtigung der Wiederverwendung .....	77
<b>Abbildung 7.6</b>	Ablauf der Testkörperfertigung mit verschiedenen Pulverchargen, Maschinen und Baujobs .....	79
<b>Abbildung 7.7</b>	Vorschlag für einen Baujob zur Fertigung von geometrischen und mechanischen Prüfkörpern für die Prozessqualifizierung mit Berücksichtigung der Pulverbeschichtungsrichtung .....	81
<b>Abbildung 7.8</b>	Testattribute der Prüfkörper und die dabei zu verwendenden Test- und Inspektionsmethoden.....	84
<b>Abbildung 8.1</b>	Ablauf eines AM Bauteilzulassungsprozesses bei vorhandenen Spezifikationen .....	90
<b>Abbildung 8.2</b>	Galley-Monument-Bracket.....	91
<b>Abbildung 8.3</b>	Konzeptdesign eines topologieoptimierten bionischen Brackets von Airbus [76] .....	93
<b>Abbildung 8.4</b>	Beispiel für eine Baujobanordnung in der Bauteilqualifizierung.....	96
<b>Abbildung 8.5</b>	Vorgehen bei der Bestimmung der Anzahl der Opferbauteile im Fertigungsprozess der Beispielzulassung .....	98
<b>Abbildung 8.6</b>	Zusammenhänge zwischen Konstruktion und Fertigung bei AM.....	99
<b>Abbildung 9.1</b>	Zulassungsrelevante Einflüsse anderer Fertigungstechnologien auf die additive Fertigung.....	102

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Methoden der Nachweisführung (MoC) aus 21.A.15 (b) [32] .....	21
Tabelle 3.2	Auszug einiger für AM besonders relevanter Bauvorschriften aus den Certification Specifications [17] .....	24
Tabelle 3.3	AM Prozessschritte und zu berücksichtigenden Aspekte aus dem internen FAA AM Engineering Memorandum. Aus [37] .....	28
Tabelle 4.1	Übersicht einiger AM Standardisierungsaktivitäten in der Luftfahrt- und Raumfahrt.....	32
Tabelle 4.2	Auswahl einiger zulassungsrelevanter Normen .....	33
Tabelle 4.3	Anforderungen der Prozessschritte eines qualitätsgesicherten additiven Fertigungsprozesses nach DIN SPEC 17071 [45].....	35
Tabelle 4.4	Rückverfolgbarkeit, Zyklierungsgrad, Chargenreinheit. Aus [45].....	36
Tabelle 5.1	Inspektionen zur Qualitätssicherungen nach AIA.....	58
Tabelle 5.2	Übersicht der Dokumente des NCAMP-Prozesses und den Material- und Prozessspezifikationen für <i>Certified ULTEM 9085 Resin</i> und <i>Fortus 900mc</i> [65].....	60
Tabelle 5.3	Beispieltabelle mit Materialkennwerten aus den Tests der Prüflinge .....	64
Tabelle 6.1	Zusammenfassung und Einordnung der Anforderungen an die verschiedenen Phasen eines AM Zulassungsprozesses aus Vorschriften der zivilen Luftfahrtbehörden, Normen und praktizierten Zulassungsprozessen .....	67
Tabelle 7.1	Beispieltabelle zur Auswertung der mechanischen Testergebnisse mit Berücksichtigung der Fertigungsvergangenheit .....	83
Tabelle 8.1	Vorgeschriebene Lastvielfache bei Emergency Landing Conditions nach CS 25.561 [17].....	93
Tabelle 8.2	Definition der Nachweisführung des Beispielbauteils .....	94
Tabelle 8.3	Auflistung der vom Konstrukteur bereits in der AM Bauteilentwicklung festzulegenden Fertigungsparameter .....	100

## Abkürzungen

AGATE	Advanced General Aviation Transport Experiment
AIA	Aerospace Industries Association
AM	Additive Manufacturing
AMC	Acceptable Means of Compliance
AMSC	Additive Manufacturing Standardization Collaborative
ANSI	American National Standardization Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWS	American Welding Society
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CB	Certification Basis
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CM	Certification Memorandum
CMH	Composite Materials Handbook
CMM	Coordinate Measuring Machine
CP	Certification Programme
CS	Certification Specification
CT	Computertomographie
DED	Directed Energy Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOA	Design Organisation Approval
DT	Destructive-Testing
EASA	European Aviation Safety Agency
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
ELC	Emergency Landing Conditions
ETSO	European Technical Standard Order
EU	Europäische Union
FAA	Federal Aviation Administration
FAR	Federal Aviation Regulations
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Elemente Methode
FVT	Faserverbundtechnologie
GE	General Electric
GM	Guidance Material
HIP	Heiß-isostatisches Pressen
HSB	Handbuch Strukturberechnung

---

ICAO	International Civil Aviation Organisation
ISO	International Organisation for Standardization
JAMS	Joint Advanced Materials & Structures Center of Excellence
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
LEAP	Leading Edge Aviation Propulsion
LOI	Level of Involvement
LPBF	Laser Powder Bed Fusion
MMPDS	Metallic Materials Properties Development and Standardization
MoC	Means of Compliance
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAMP	National Center of Advanced Materials Properties
NDT	Non-Destructive-Testing
NEO	New Engine Option
NIAR	National Institute of Aviation Research
NIST	National Institutes of Standards and Technology
OCCAR	Organisation Conjointe de Coopération en matière d'Armement
OEM	Original Equipment Manufacturer
PBF	Power Bed Fusion
POA	Production Organisation Approval
Q&C	Qualification and Certification
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
SAE	Society of Automotive Engineers
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STC	Supplemental Type Certificate
STL	Standard Transformation Language
TC	Type Certificate
TC	Technical Committee
USA	Vereinigte Staaten von Amerika

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die additive Fertigung, umgangssprachlich als 3D-Druck bezeichnet, hat sich in den vergangenen Jahren zu einer innovativen Fertigungstechnologie für Flugzeugbauteile entwickelt. Das anfänglich in der Luftfahrt nur für Prototypen genutzte Verfahren hat jüngst die Machbarkeit einer Serienproduktion unter Beweis gestellt [2] und damit scheinbar unüberwindbare Hürden gemeistert. In **Abbildung 1.1** ist ein additiv gefertigter Halter aus Titan zu sehen, der für den *Airbus A350 XWB* entwickelt wurde [1]. Die Bauteilgeometrie lässt das große Potential der additiven Fertigung erahnen. Durch die fast grenzenlose Designfreiheit können Leichtbaupotentiale maximal ausgeschöpft werden, was zu erheblichen Gewichtsreduzierungen führt. Doch auch für Einzelteile, in Form von Ersatzteilen oder individuellen Lösungen, ist die additive Fertigung durch die werkzeuglose, schnelle *On-Time* Fertigung prädestiniert. Allerdings gibt es Faktoren, die zu einer Entschleunigung der Innovationswelle führen.

Die zivile Luftfahrt ist eine stark regulierte Branche. Unter der Prämisse, den internationalen zivilen Luftverkehr „*in a safe and ordely manner*“ [3] zu entwickeln, unterliegen Produkte, Betriebe und Personal strengen Zulassungsvorschriften der Luftfahrtbehörden. Für Luftfahrzeuge und deren Bauteile existieren detaillierte Bauvorschriften, die für es für eine Zulassung zu erfüllen und nachzuweisen gilt. Die Nachweisführung hat sich für additiv gefertigte Bauteile in der Vergangenheit als große Herausforderung erwiesen. Durch die generative Fertigungsweise und die daraus entstehende Prozessvariabilität sind die Materialkennwerte der Bauteile nicht deterministisch.



Abbildung 1.1 Additiv gefertigter Halter für den Airbus A350 XWB [1]

Diese Tatsache gestaltet den Zulassungsprozess additiv gefertigter Bauteile sehr aufwendig und kostspielig. Das Unternehmen *Premium Aerotech* verzeichnete Kosten von ca. einer Million Euro und die Anfertigung von fast 1300 Prüfkörpern für die Serienqualifizierung additiv gefertigter Bauteile [4]. Der große Aufwand und die damit verbundenen hohen Kosten des Zulassungsprozesses führten vor allem bei kleineren Unternehmen dazu, dass die Unwirtschaftlichkeit die Innovation ausbremste.

Um dem entgegen zu wirken und die Innovation voranzutreiben, bedarf es vereinheitlichender Standardisierungen, die Wege zur Zulassung aufzeigen. Hier liegt das Problem. Obwohl es bereits Ansätze für Normen und Standardisierung gibt, fehlt es derzeit noch an einschlägigen Zulassungsprozessen für additiv zu fertigende Flugzeugbauteile. Hinzu kommt, dass die Unternehmen der Luftfahrtindustrie, die bereits Wissen und Erfahrung dahingehend aufgebaut haben, ihre Informationen gar nicht oder kaum veröffentlichen, da diese sich durch das exklusive Wissen einen Wettbewerbsvorteil erhoffen. Ein Ausweg könnte die Adaption von bewährten Methoden bei Zulassungsprozessen herkömmlicher Fertigungstechnologien darstellen.

## 1.2 Ziel dieser Arbeit

Angesichts der momentanen Situation in der Luftfahrt, setzt sich diese Arbeit zum Ziel, einen generischen Zulassungsprozess für additiv gefertigte Flugzeugstrukturbauteile auszuarbeiten. Dieser wird aufbauend auf den Zulassungsvorschriften und recherchierbaren Informationen erarbeitet. Außerdem gilt es zu klären, inwiefern Methoden bewährter Zulassungsprozesse herkömmlicher Fertigungstechnologien auf die additive Fertigung anwendbar sind. Dabei wird ein besonders großer Zusammenhang bei der Faserverbundtechnologie vermutete, was es genauer zu untersuchen gilt.

## 1.3 Aufbau und Methodik

Diese Arbeit baut sehr stark auf einer Recherche veröffentlichter Informationen auf. Wie schon erwähnt, ist die Mehrheit der Unternehmen aus der Luftfahrtindustrie nicht gewillt, Informationen in großem Umfang zu veröffentlichen. Um die wenigen recherchierbaren Erkenntnisse sinnvoll zu interpretieren und zu ergänzen, bedarf es einer bestimmten Methodik. Diese wird anhand **Abbildung 1.2** erläutert.

Im Teil I wird der Stand der Technik ermittelt. Hier werden die für die Ausarbeitung des Zulassungsprozesses benötigten recherchierten Informationen dargelegt. Beginnend mit den Grundlagen der Werkstoffe und Fertigungstechnologien wird das technologische Fundament definiert. Daraufhin bilden die Zulassungsvorschriften den gesetzlichen Rahmen, innerhalb dessen der Zulassungsprozess stattfinden muss. Dadurch wird eine erste wichtige Eingrenzung vorgenommen. Der Raum innerhalb des gesetzlichen Rahmens muss mit Informationen gefüllt werden. Hierfür werden einerseits Standardisierungen inkl. Normen herangezogen. Zusätzlich wird versucht, nützliche Informationen von praktizierten Zulassungsprozessen zu recherchieren. Diese beiden Quellen befüllen den gesetzlichen Rahmen mit Informationen und zeigen mögliche Richtungen auf.

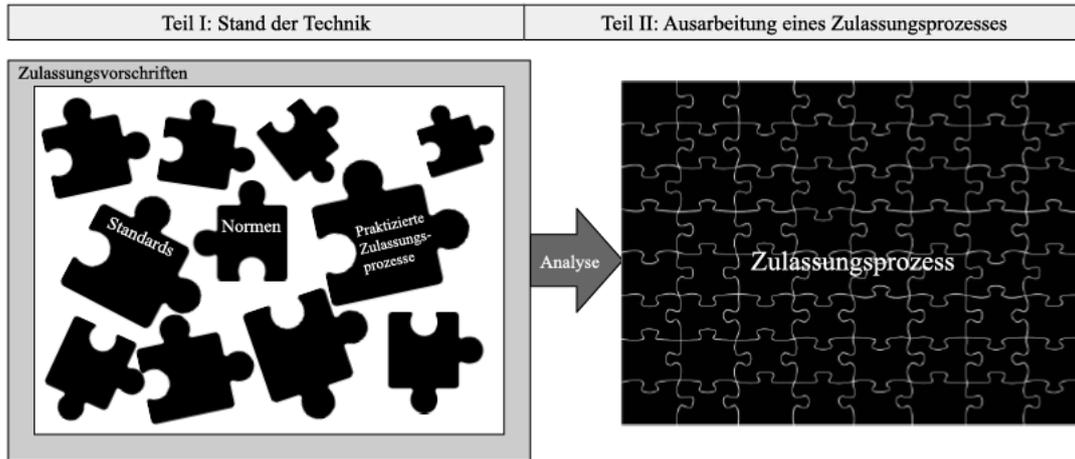


Abbildung 1.2 Aufbau und Methodik dieser Arbeit

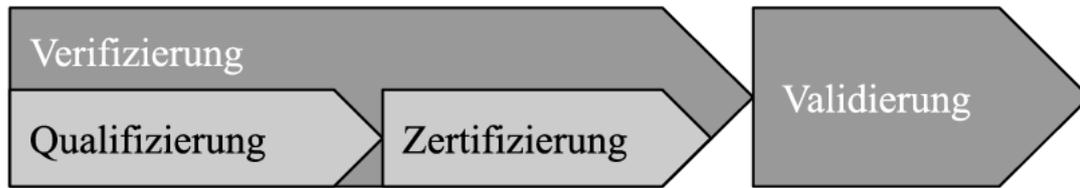
Im Teil II gilt es dann zunächst, die recherchierten Informationen in geeigneter Weise zu sortieren. Die dabei zurückbleibenden Lücken werden in der Ausarbeitung des Zulassungsprozesses sinnvoll gefüllt. Der sich daraus ergebene Zulassungsprozess wird daraufhin in einer beispielhaften Bauteilzulassung erprobt.

#### 1.4 Wichtige Begriffsdefinitionen

Im Laufe dieser Arbeit werden wiederholt die Begriffe Qualifizierung, Zertifizierung, Validierung und Verifizierung fallen. Aufgrund der ähnlichen Bedeutungen werden diese Begriffe oftmals inkonsistent verwendet und durcheinandergebracht, teilweise leider auch in Abbildungen, Tabellen und Zitaten aus den verwendeten Quellen. Um Klarheit zu schaffen, werden diese Begriffe im Folgenden in einem luftfahrttechnischen Kontext definiert. Dafür werden zunächst einige offizielle Definitionen von Organisationen gesammelt, welche im nächsten Schritt zu einer eigenen Auffassung der Begriffe zusammengefasst werden.

Die *European Cooperation for Space Standardization (ECSS)* entwickelt Standards für die Raumfahrt und hat ein Glossar mit Definitionen häufig in deren Standards verwendeter Begrifflichkeiten veröffentlicht. Die ECSS definiert die Qualifizierung als „der Teil der Verifizierung, der nachweist, dass das Produkt die festgelegten Anforderungen erfüllt“. Eine Anmerkung dazu stellt klar, dass sich dies „auf Personal, Produkte, Herstellungs- und Montageprozesse beziehen“ kann. [5]

Die Qualifizierung ist laut ECSS also ein Teil der Verifizierung, welche selbst wiederum definiert wird als „Das Verfahren, das durch die Bereitstellung objektiver Beweise nachweist, dass das Produkt gemäß seinen Spezifikationen [...] entworfen und hergestellt wurde sowie frei von Mängeln ist“. „Die Verifizierung kann durch eine oder mehrere der folgenden Methoden erfolgen: Analyse, [...] Test, Inspektion, Überprüfung des Entwurfs.“ [5]



**Abbildung 1.3** Schema über das Zusammenspiel der Begrifflichkeiten Verifizierung, Qualifizierung, Zertifizierung und Validierung

Für die Durchführung einer Validierung ist für die Verifizierung eine Voraussetzung. Die Validierung sei das „Verfahren, mit dem nachgewiesen wird, dass das Produkt in der Lage ist, seine vorgesehene Anwendung in der vorgesehenen Betriebsumgebung zu erfüllen.“ [5]

Die Zertifizierung sei das „Verfahren, bei dem durch eine Partei die formelle Zusicherung erteilt wird, dass eine Person, eine Organisationshandlung oder ein Produkt den festgelegten Anforderungen entspricht“. [5]

Da bei den Definitionen der ECSS der Luftfahrtbezug fehlt, werden zusätzlich die Definitionen von der OCCAR (*Organisation Conjointe de Coopération en matière d'Armement*) [6] genannt. Die internationale Vereinigung verwaltet Programme für Verteidigungsgüter [6] und hat unter anderem bei dem Militärflugzeug Airbus A400M mitgewirkt [7]. OCCAR definiert die Zertifizierung als den „Prozess der Anerkennung darüber, dass Produkte, Bauteile, Organisationen oder Personen die geltenden Lufttüchtigkeitsanforderungen erfüllen, gefolgt von einer Erklärung der Konformität“ [8]. Die Qualifizierung sei „Der Prozess der Verifizierung und Erklärung der Konformität mit jeder der spezifizierten Anforderungen auf allen Ebenen. Es ist der gesamte Prozess der Nachweisführung, der sicherstellt, dass das Luftfahrzeug die spezifizierten Leistungen und Lufttüchtigkeitsanforderungen erfüllt. Dies endet in einer Erklärung über die Lufttüchtigkeit und Leistung[...]“ [8].

Nach eigener Auffassung ist die Verifizierung ein Vorschrift für die Validierung, ebenso wie die Qualifizierung ein Vorschrift der Zertifizierung ist. Die Verifizierung beinhaltet die Prozesse Qualifizierung und Zertifizierung. Mit dem Abschluss der Zertifizierung, und damit auch mit dem Abschluss der Verifizierung, folgt die Ausstellung eines Zertifikats. Ein Zertifikat ist ein Dokument, das die erfolgreiche Zertifizierung bescheinigt. Das hier erläuterte Zusammenspiel zwischen den vier Begriffen wird in **Abbildung 1.3** schematisch dargestellt.

In dem Titel dieser Arbeit kommt der Begriff „Zulassungsprozess“ vor. Dieses Wort enthält das Substantiv „Zulassung“ und ist dem Adjektiv „zugelassen“ zugeordnet, welches den Zustand nach erfolgreicher Zertifizierung beschreibt. Die beiden Begriffe Zulassung und Zertifizierung werden in dieser Arbeit gleichbedeutend verwendet.

Im Folgenden werden die Begriffe Verifizierung, Qualifizierung, Zertifizierung und Validierung mit eigenen Worten und Erkenntnissen definiert:

**Verifizierung** Prozess, der die Methoden, Bereitstellung und offizielle Anerkennung von objektiven Nachweisen, die die Konformität zu spezifizierten Anforderungen sicherstellen, umfasst.

- Qualifizierung** Prozess, der selbstgesteuert mithilfe von Methoden die Konformität von Personen, Bauteilen, Produkten oder Prozessen zu spezifizierten Anforderungen subjektiv nachweist.
- Zertifizierung** Prozess der Anerkennung durch offizielle Organisationen über die Konformität zu spezifizierten Anforderungen sowie die in der Qualifizierung verwendeten Beweismethoden. Die erfolgreiche Zertifizierung schließt mit der Ausstellung eines Zertifikats ab.
- Validierung** Prozess, der durch Maßnahmen der Qualitätssicherung gewährleistet, dass Personen, Bauteile, Produkte oder Prozesse den in der Verifizierung qualifizierten Beschaffenheit entsprechen und den funktionalen Zweck erfüllen.

## 2 Werkstoffe und Fertigungstechnologien

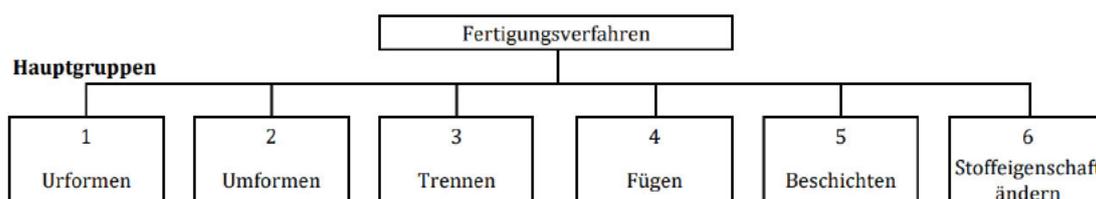
### 2.1 Fertigungstechnologien – Einteilung und Beispiele

Die Norm DIN 8580 teilt Fertigungsverfahren ein und wird an dieser Stelle zur Einordnung der in dieser Arbeit vorkommenden Fertigungstechnologien herangezogen. Die Begriffe Fertigungstechnologie und Fertigungsverfahren werden fortlaufend gleichbedeutend verwendet. Als Fertigungstechnologie bezeichnet die DIN 8580 „alle Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körper [...]“. Diese Verfahren können in sechs Hauptgruppen unterteilt werden (siehe **Abbildung 2.1**) [9].

Die additive Fertigung gehört zu der Hauptgruppe 1 (Urformen). Das Urformen bezeichnet das „Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes; hierbei treten die Stoffeigenschaften des Werkstückes bestimmbar in Erscheinung“. Diese Norm wurde erst kürzlich dem aktuellen Stand der Technik angepasst. Dabei wurde der additiven Fertigung eine eigene Gruppe im Urformen zugewiesen (1.10). [9]

Die Notwendigkeit der Schaffung einer eigenen Gruppe für diese neue Fertigungstechnologie verdeutlicht die Einzigartigkeit und gibt damit einen ersten Hinweis auf mögliche Innovationen in der Fertigung von Flugzeugbauteilen. Die additive Fertigung wird in Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben.

Das Pendant zur additiven Fertigung stellt die subtraktive Fertigung dar, welche als Überbegriff für einige Verfahren aus der Hauptgruppe 3 (Trennen) zutrifft [9]. Das Grundkonzept dabei ist, wie die Bezeichnung vermuten lässt, das sukzessive Entfernen von Material zum Formen eines geometrischen Körpers. Gängig ist das sogenannte Fräsen, welches als „Spanen mit kreisförmiger [...] Schnittbewegung [...] zur Erzeugung beliebiger Werkstückoberflächen“ [10] definiert ist. In Kombination mit einem Computer gesteuerten Werkzeug, welches das Bauteil basierend auf 3D-Daten automatisch aus einem massiven Materialblock herausfräst, entsteht das sogenannte CNC-Fräsen (*Computerized Numerical Control-Fräsen*).



**Abbildung 2.1** Einteilung der Fertigungstechnologien in sechs Hauptgruppen nach DIN 8580 [9]

Der Klassiker unter den Verfahren des Urformens ist das sogenannte Gießen. Das Gießen beschreibt den Fertigungsvorgang der Materialverfestigung in seiner finalen Geometrie. Dies wird mithilfe von Formen realisiert, in die das meist flüssige Material hineingegossen wird, woraufhin es abkühlt und sich verfestigt.

Ebenfalls zur Hauptgruppe 1 gehört das „Urformen von faserverstärkten Kunststoffen“ [9] (Faserverbundtechnologie, FVT). Da die Faserverbundtechnologie auch Gegenstand dieser Ausarbeitung ist, sollen die Grundlagen im Folgenden kurz erläutert werden. Faserverbundwerkstoffe gehören zu der Gruppe der Verbundwerkstoffe, die sich dadurch auszeichnen, dass sie aus mindestens zwei verschiedenen Werkstoffen bestehen, die in geschickter Weise kombiniert werden, um die Werkstoffeigenschaften im Kollektiv zu verbessern [11]. Die dazu gehörenden Faserverbundwerkstoffe bestehen dementsprechend aus Fasern, die in einer sogenannten Matrix zusammengehalten werden [11]. Der in der Luftfahrt am häufigsten verwendete Faserverbundwerkstoff sind Kohlefasern, die in einer Kunststoffmatrix eingebettet sind (Kohlefaserverstärkter Kunststoff, CFK). Die geschickte Kombination dieser beiden Komponenten erfolgt durch den Aufbau mehrerer Schichten mit meistens unterschiedlichen Ausrichtungen der Faser. Durch die Wahl der Faserrichtungen können die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes an die Anforderungen des Bauteils angepasst werden [11]. Die Besonderheit zu anderen Fertigungstechnologien besteht darin, dass der Werkstoff selbst erst bei der Bauteilfertigung entsteht und damit prozessabhängig ist. Wie später gezeigt wird, haben die FVT und die additive Fertigung dies gemein.

Als Beispiel zur Hauptgruppe 4 (Fügen) wird das Schweißen aufgeführt [9]. Das Schweißen ist definiert als ein „Fügeprozess, bei dem zwei oder mehr Teile verbunden werden, wobei eine Kontinuität der Werkstoffe der zu verbindenden Teile hergestellt wird, unter Anwendung von Wärme oder Kraft oder beiden und mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff“ [12]. Aufgrund einiger materialeitiger Ähnlichkeiten zur additiven Fertigung wird das Schweißen im Laufe dieser Arbeit nochmal aufgegriffen.

Ebenfalls als Fertigungsprozess definiert sind Nachbehandlungen. Diese fallen nach DIN 8580 unter die Hauptgruppe 6 (Stoffeigenschaften ändern) [9].

Alle die bis hierher aufgeführten Fertigungstechnologien, außer die additive Fertigung, werden im Rahmen dieser Arbeit als herkömmliche Fertigungstechnologien betitelt.

## 2.2 Additive Fertigung

Als Additive Fertigungsverfahren (engl. *Additive Manufacturing*, AM) bezeichnet man im Allgemeinen automatisierte Prozesse zum Erstellen eines Bauteils durch gezieltes, sukzessives Hinzufragen von Material.

Die Herstellung eines Bauteils mittels AM erfolgt nach dem Schichtbauprinzip [13]. Demnach werden auf einer vertikal verschieblichen Bauplattform Schichten erzeugt, die aufeinander abgelegt und miteinander verbunden werden (siehe **Abbildung 2.2**). Die Bauplattform wird nach Fertigstellung einer Schicht herabgesenkt, sodass eine neue Schicht auf die vorangegangene aufgetragen werden kann. Ein Bauteil entsteht aus der Summe aller aufeinander erzeugten Schichten.

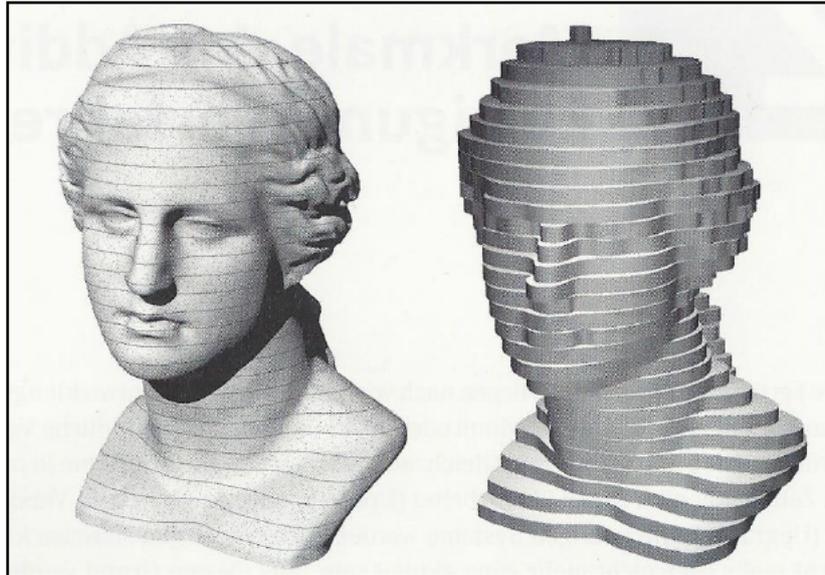


Abbildung 2.2 Das Schichtaufbauprinzip der additiven Fertigung [14]

Dabei entsteht eine diskontinuierliche Oberfläche, dessen Auflösung durch die Wahl der Schichtdicke beeinflusst werden kann. Wird eine geringe Schichtdicke gewählt, kann eine kontinuierlicher verlaufende Oberfläche generiert werden. Jedoch erhöht sich mit der Anzahl der insgesamt zu erstellenden Schichten die Fertigungsdauer.

Ein großer Vorteil von AM liegt in der Materialeinsparung durch die leichtbaugerechte Bauweise. AM bietet die Möglichkeit, Bauteile so zu erzeugen, dass das Material nur an definierten Positionen eingebracht wird. Je nach Belastung und Funktion wird Material nur dort hinzugefügt, wo es für die Stabilität oder Festigkeit der Struktur bedeutsam ist. Somit lässt sich beim additiven Fertigen theoretisch ein erhöhtes Maß an Wirtschaftlichkeit erreichen.

### 2.2.1 Prozessketten

Ebenfalls eine große Stärke der additiven Fertigung ist der kurze Weg von der Idee zum fertigen Endprodukt. Die dabei durchlaufende allgemeine Prozesskette ist in **Abbildung 2.3** dargestellt.

Ein **3D-Modell** des Bauteils wird im CAD (*Computer-Aided Design*) erstellt und in das Format STL (*Standard Transformation Language*) konvertiert. Das **STL-Format** ist im AM als Standarddateiformat festgelegt, denn dessen Daten können von den meisten AM-Maschinen verarbeitet werden. In diesem Format werden die Oberflächen eines Bauteils näherungsweise mit unterschiedlich großen Dreiecken beschrieben [13].

Anschließend wird das 3D-Modell im STL-Format virtuell auf der Bauplattform des Druckers ausgerichtet und seine Orientierung bestimmt. Dieser Schritt erfolgt parallel zu weiteren Parametereinstellungen wie beispielsweise die Skalierung, Wahl der Schichtdicke sowie die Berechnung und Erstellung einer Stützstruktur. Zusammenfassend wird dies fortan **Baujobdefinition** genannt, wobei mit Baujob der vom Drucker auszuführende Druckauftrag gemeint ist.

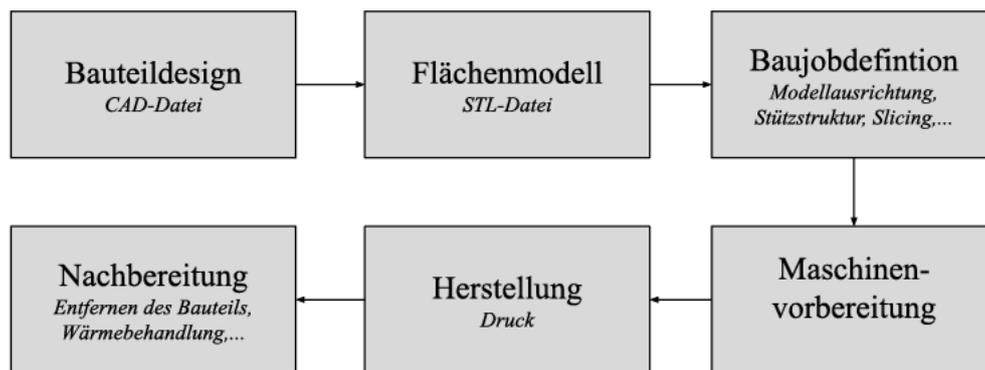


Abbildung 2.3 Allgemeine Prozesskette eines additiven Fertigungsprozesses

Wie zuvor erwähnt, ist ein Teil der Baujobdefinition die Erstellung einer Stützstruktur. Das Schichtbauprinzip kann nur dann erfolgreich umgesetzt werden, wenn der zu erzeugenden Schicht eine Ablagemöglichkeit, beispielsweise in Form einer weiteren, unter ihr befindlichen Schicht gewährt ist. Ist dies nicht der Fall, sind Stützstrukturen notwendig, die als lokale Erhebung der Bauplattform fungieren. Dies gilt für in vertikaler Richtung stark geneigte oder gekrümmte Bauteiloberflächen sowie für Überhänge. Die Stützstrukturen verhindern die Kippgefahr des Bauteils beim Fertigungsprozess und ermöglichen das Erzeugen einzelner Bauteilpartien, die in der Luft hängen (siehe **Abbildung 2.4**) bzw. einen kritischen Neigungswinkel überschreiten. Insofern kann die Orientierung und Ausrichtung des Bauteils auf der Bauplattform über den Bedarf an Stützen entscheidend sein. Die Stützstruktur wird in der Regel von einer Software berechnet und im Fertigungsprozess simultan zum Bauteil erstellt. Ein praktisches Beispiel für die Anwendung von Stützstrukturen wird anhand des in der Einleitung vorgestellten *Brackets* des *Airbus A350 XWB* in **Abbildung 2.5** gegeben.

Ebenfalls zur Baujobdefinition gehört das sogenannte *Slicen*. In diesem Prozessschritt wird zuvor definierte Baujob mit einer geeigneten Software in gleichmäßig dicke Schichten geschnitten und in ein für den Drucker lesbares Dateiformat konvertiert.

Anschließend muss die Maschine für den Druck vorbereitet werden. Dies beinhaltet unter anderem das Vorbereiten des Materials und Herstellen der Betriebsbedingungen. Daraufhin folgt die Durchführung des Fertigungsprozesses, welcher vom gewählten Verfahren abhängig ist (siehe **Kapitel 2.2.3**) sowie die anschließende Nachbehandlung des Bauteils. Das Bauteil wird von der Stützstruktur entfernt, gereinigt, dessen Oberflächenqualität optimiert und bei Bedarf einem Wärmebehandlungsprozess unterzogen.

Die additive Fertigung kann für verschiedenste Anwendungen genutzt werden. Im Allgemeinen kann man die Anwendungsfälle in drei Prozessarten unterteilen, die sich in der Nutzung des Endproduktes unterscheiden.

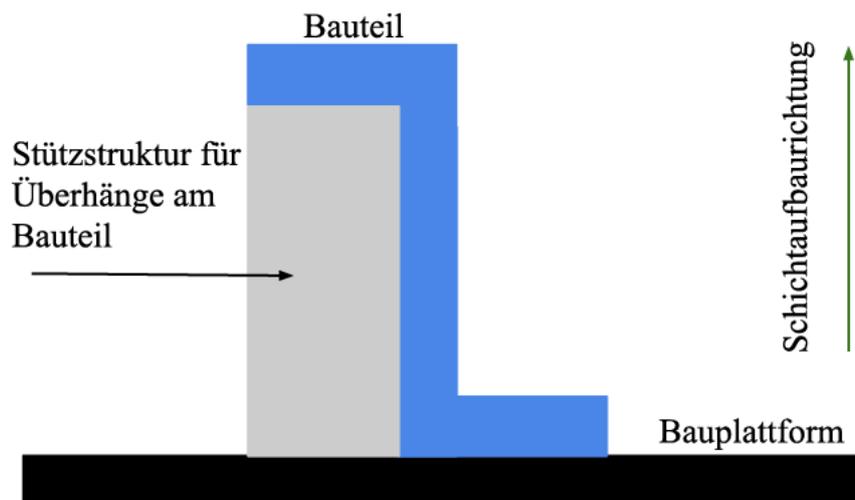


Abbildung 2.4 Stütze für ein Bauteil mit überhängenden Partien



Abbildung 2.5 Beispiel für eine Anwendung von Stützstruktur am Airbus A350 XWB Bracket [14]

### 2.2.2.1 Rapid Prototyping

Unter dem *Rapid Prototyping* (RP) versteht sich die Anwendung von AM-Technologien zur schnellen Erstellung eines Prototyps. Dieser fungiert als reales Modell für ein im CAD erzeugtes Bauteil und dient dessen Anschauung als greifbares Objekt. Die Zeitersparnis spielt hierbei eine zentrale Rolle, denn Modelle müssen nicht mehr durch langwierige Handarbeiten mit Werkzeugen hergestellt werden. Der Einsatz moderner AM-Technologien bedeutet für die Produktentwicklung, dass bereits in frühen Stadien korrekte Aussagen über ein Bauteil getroffen und bestimmte Eigenschaften wie Optik, Haptik und Funktionalität sowie besondere Merkmale beurteilt werden können. [13]

### 2.2.2.2 Rapid Manufacturing

Im *Rapid Manufacturing* (RM) gebraucht man das AM, um Bauteile mit Fertigteilqualität herzustellen. Dies bedeutet, dass ein Bauteil alle Eigenschaften und Funktionen, die im Produktentwicklungsprozess für seinen Einsatz unter realen Bedingungen als erforderlich festgelegt sind, aufweisen kann. Serienproduktionen von Bauteilen findet auf der Ebene des RM statt. Das RM ist die für diese Arbeit relevante Prozessart, da es hier darum geht, die direkt aus dem AM-Prozess stammenden Bauteile ins Flugzeug einzubauen und zuzulassen. [13]

### 2.2.2.3 Rapid Tooling

Das *Rapid Tooling* (RT) umfasst die Verwendung von AM zur Herstellung von Werkzeugenpartien, Formen und Matrizen. Das RT bezieht sich nicht auf das Erzeugen ganzer Werkzeuge, sondern lediglich einzelner Komponenten, die in einem weiteren Prozess gefügt werden und als Zusammenbau das Werkzeug darstellen. Das AM bietet die besondere Möglichkeit, Kühlkanäle in die Werkzeugeinzelteile zu integrieren, sodass diese in der zukünftigen Fertigung zeiteffizienter sind. Dies ist besonders für Spritzgussformen von großer Relevanz. [13]

## 2.2.3 Verfahren

Die additive Fertigung als Überbegriff einer Fertigungstechnologie umfasst ein breites Spektrum an Verfahren. Dabei kann eine grobe Unterteilung nach der Lieferform des Ausgangsmaterials vorgenommen werden. Dies umfasst strangförmige, pulverförmige und laminatförmige Ausgangsmaterialien. Die in dieser Arbeit behandelten Zulassungsprozesse verwenden ausschließlich Verfahren, die strang- und pulverförmigen Ausgangsmaterialien verarbeiten. Aus diesem Grund wird sich im Folgenden auf Verfahren mit diesen Ausgangsmaterialien beschränkt.

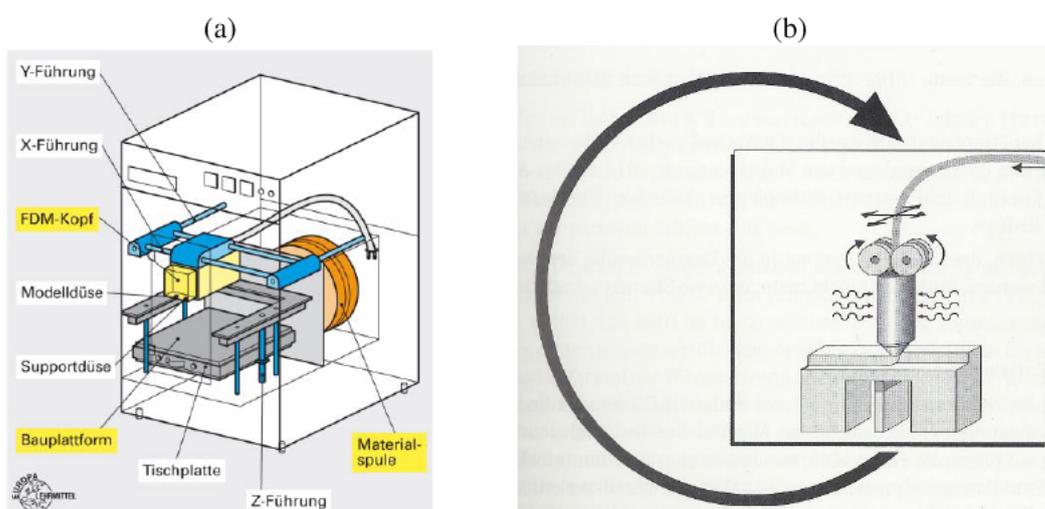


Abbildung 2.6 Prinzip des FDM-Verfahrens mit (a) Aufbau einer FDM-Anlage [14] und (b) Extrusion aus der Düse [15]

### 2.2.3.1 Fused Deposition Modeling

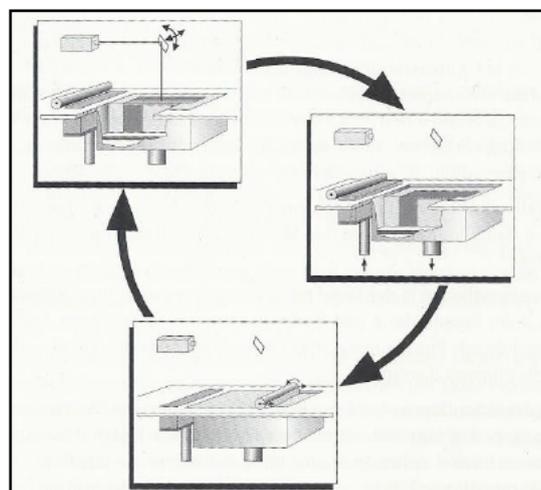
Das *Fused Deposition Modeling* (FDM) wird mit strangförmigem Halbzeug durchgeführt. Dieses Verfahren findet insbesondere beim RP Gebrauch, um Konzeptmodelle oder Prototypen in kurzer Zeit zu erzeugen. Hierfür werden Kunststoffe wie ABS, PC, PLA oder PVA verwendet, die drahtförmig auf einer Spule gewickelt sind. [15]

Zur Vorbereitung des Herstellprozesses wird der Strang (Filament) in einen Extrusionskopf eingeführt. Dort wird der Kunststoff aufgeschmolzen und durch eine Düse auf die Bauplattform bzw. auf die vorher erzeugte Schicht aufgetragen. Dabei bestimmt überwiegend die Form und der Durchmesser der Düsenöffnung die Breite des aufgetragenen Strangs. Nach Auftragen des Werkstoffs kühlt dieser ab und es bildet sich eine feste Verbindung zur unteren Schicht. Mit dem Absenken der Bauplattform wird auf diese Weise ein Bauteil Schicht für Schicht von unten nach oben aufgebaut. In **Abbildung 2.6** ist das Prinzip des FDM verdeutlicht. [15]

### 2.2.3.2 Pulverbettverfahren

Das *selektive Lasersintern* (englisch: *Selective Laser Sintering, SLS*) und *selektive Laserschmelzen* (engl. *Selective Laser Melting, SLM*), sind beides Verfahren, welche zur Gruppe der Pulverbettverfahren (engl. *Power Bed Fusion, PBF*) zählen. Diese können für Kunststoffe, Keramiken und Metallen in Form von Pulver verwendet. [15]

Das Pulver wird an definierten Positionen, gemäß der Kontur der jeweiligen Bauteilschicht, mit einem Laserstrahl erhitzt und aufgeschmolzen. Nach dem Laservorgang kühlt die Schicht ab und verbindet sich auf diese Weise mit der darunter liegenden Schicht. Die Bauplattform senkt sich daraufhin, sodass die Walze eine neue Pulverschicht auslegen kann. Dabei wird das Pulver in eine bestimmte Richtung aufgetragen. Diese Richtung heißt Pulverbeschichtungsrichtung. Dieser Vorgang wird für jede Schicht wiederholt. Das grundlegende Prinzip von Pulverbettverfahren ist in **Abbildung 2.7** illustriert. In der Baukammer wird das Bauteil von dem ihn umgebenden Pulver, welches nicht zur Bauteilerzeugung verwendet wird, gestützt. Somit sind separat erstellte Stützstrukturen oftmals nicht zwingend erforderlich. [15]



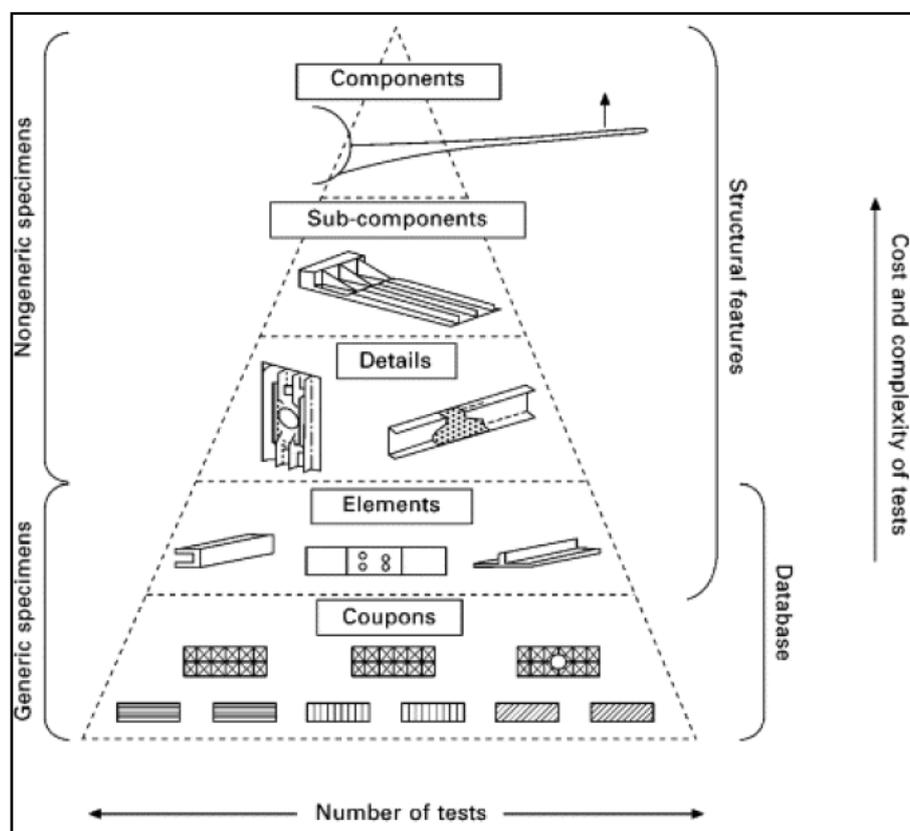
**Abbildung 2.7** Prinzip von Pulverbettverfahren [15]

### 2.3 Materialeigenschaften,-Kennwerte und -Tests

Wie später ersichtlich wird, ist ein großer Teil der Bauteilzulassung die Ermittlung der Materialeigenschaften und -Kennwerte. Um diese ermitteln zu können, benötigt es Tests. Diese können grundsätzlich in zerstörende (engl. *Destructive-Testing*, DT) und zerstörungsfreie Tests (engl. *None-Destructive-Testing*, NDT) unterschieden werden.

Das DT dient in erster Linie zur direkten Ermittlung der mechanischen Materialkennwerte. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der Zugversuch, der mit genormten Zugproben [16] durchgeführt wird und Festigkeitswerte liefert. Diese Kennwerte sollen, soweit möglich, die reinen Materialleistungen abbilden. Im späteren Verlauf wird für diese Art der Kennwerte häufig der Begriff *Material Allowables* verwendet. Zusätzlich zu den *Material Allowables* gibt es die sogenannten Auslegungswerte (engl. *Design Values*). Die *Design Values* beruhen auf einer statistischen Auswertung der *Material Allowables* und berücksichtigen eine unvorhergesehene Variabilität, die beispielsweise durch einen variablen Fertigungsprozess hervorgerufen wird [17].

Das DT ist ein wesentlicher Bestandteil eines jeden Zulassungsprozesses und wird in verschiedenen Phasen unterschiedlich angewendet. Während am Anfang in großer Menge Zugversuche an Zugproben durchgeführt werden, werden die daraus ermittelten Materialkennwerte mit einigen wenigen Tests im Kontext des gesamten Flugzeugs verifiziert. Um diese grundlegend geltende Vorgehensweise bildlich darzustellen, behilft man sich oftmals der sogenannten Testpyramide (siehe **Abbildung 2.8**).



**Abbildung 2.8** Testpyramide für die Zulassung von Materialien für Flugzeugbauteile [18]

## 2.4 Werkstoffhandbücher

Mit der Einführung einer neuen Fertigungstechnologie in der Luftfahrtindustrie steht man heute am Anfang eines großen Vorhabens, wofür es viel Standardisierung bedarf. Auch die heute sehr gut bekannten und kontrollierbaren Technologien und Materialien befanden sich einst in dieser anfänglichen Phase voller unbekannter Parameter. Um die Unbekannten einheitlich zu definieren, wurden im Laufe der Zeit einige Werkstoffhandbücher verfasst, welche bis heute stetig aktualisiert und damit auf dem Stand der Technik gehalten werden. Werkstoffhandbücher haben allesamt den Zweck, allgemein gültige Angaben für Luftfahrtwerkstoffe zu liefern. Diese Angaben werden von den Zulassungsbehörden anerkannt, weshalb es bei diesen keinen weiteren Nachweis bedarf [19]. Für die Zulassung reicht es meistens aus, auf diese Werkstoffhandbücher zu verweisen und die Konformität mit diesen zu demonstrieren. Damit fallen die vielen aufwendigen Tests an Prüfkörpern weg, die sonst das Fundament der zuvor erwähnten Testpyramide darstellen (siehe **Abbildung 2.8**)

Die metallischen Werkstoffe, in Verbindung mit herkömmlichen Fertigungstechnologien, nehmen in modernen Verkehrsflugzeugen trotz neu aufkommender Technologien immer noch fast die Hälfte der verwendeten Materialien bzw. Fertigungstechnologien ein [20, 21]. Ein beliebtes, international anerkanntes Handbuch für metallische Werkstoffe ist das „Metallic Materials Properties Development and Standardization“ (MMPDS) Handbuch. Es liefert statistisch basierte, zugelassene Werte für die Konstruktion von metallischen Bauteilen in Flugzeugstrukturen [22]. Die Verwendung dieser Konstruktionszulassungen werden offiziell von der US-amerikanischen Luftfahrtbehörde für den Zulassungsprozess anerkannt [23].

In Deutschland wird sich für metallische Werkstoffe häufig auf das „Werkstoffhandbuch der deutschen Luftfahrt“ oder dem „Handbuch Struktur Berechnung“ (HSB) berufen. Letzteres enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Werkstoffe und Halbzeuge aus vielen anderen nationalen und internationalen Werkstoffhandbüchern der Luftfahrt. [19]

---

## 3 Vorschriften in der Zivilluftfahrt

Spätestens seitdem die technische Reife der Luftfahrzeuge internationale und kommerzielle Flüge Mitte des 20. Jahrhunderts ermöglichte, bedurfte es einer einheitlichen, länderübergreifenden Regelung der zivilen Luftfahrt. Auf internationaler Ebene regelte das 1944 unterzeichnete Chicagoer Abkommen deshalb fortan den zivilen Luftverkehr. Die im Zuge dessen gegründete *International Civil Aviation Organisation* (ICAO) macht es sich bis heute zur Aufgabe, einen einheitlichen und obligatorischen Standard für die zivile Luftfahrt zu definieren, um so einen sicheren und effizienten Flugverkehr zu erzielen [3]. Damit wird auf internationaler Ebene der Grundstein für alle nationalen Gesetze gelegt. Die konkrete Umsetzung der ICAO Regularien auf nationaler Ebene in Form von Gesetzen oder Verordnungen obliegt jedoch den derzeit 193 Mitgliedsstaaten [24]. Auch wenn jeder Mitgliedsstaat seine eigenen Gesetze formulieren darf, wird oftmals eine ähnliche Ausführung und gegenseitige Anerkennung angestrebt, welche durch bilaterale Abkommen gewährleistet wird [25].

Beim Verfassen der Luftfahrtverordnungen wird die Legislative üblicherweise in Form von Gesetzesvorschlägen von den nationalen zivilen Luftfahrtbehörden (Behörde) unterstützt, da diese die nötige fachliche Kompetenz besitzen. Die Hauptaufgabe der Behörde als Teil der Exekutiven besteht jedoch darin, die Einhaltung der Gesetze zu überwachen. Des Weiteren legt sie die Gesetze in Gestalt von Umsetzungsempfehlungen und Bauvorschriften aus (siehe ...). Das Zusammenspiel von Gesetzen, Bauvorschriften und Umsetzungsempfehlungen wird im Unterabschnitt 3.1 behandelt. [26]

In den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) beispielsweise ist die zuständige Behörde die Federal Aviation Administration (FAA). Die FAA übernimmt in den USA die üblichen zuvor beschriebenen Aufgaben. Das deutsche Äquivalent zur FAA ist das Luftfahrt-Bundesamt (LBA) bzw. die European Aviation Safety Agency (EASA). In dem Staatenverbund der europäischen Union (EU) werden die nationalen Luftfahrtbehörden, wie z.B. das LBA in Deutschland, weitestgehend durch die EASA ersetzt. Die nationalen Behörden existieren jedoch weiter und arbeiten der EASA in fast allen Belangen zu. [26]

### 3.1 Regelwerke

In diesem Abschnitt geht es um die Vorstellung und Einordnung der verschiedenen Regelwerke, welche aus Verordnungen, Bauvorschriften und Umsetzungsempfehlungen bestehen (siehe ...) [26]. Diese werden jeweils am Beispiel der europäischen Union bzw. der EASA erklärt. Wie zuvor erläutert, bilden die ICAO Regularien das Fundament aller nationalen Regelwerke [26]. Diese Regularien beinhalten das mehrmals geänderte Chicagoer Abkommen mit den mittlerweile



law bezeichnet. Die EASA ist laut Artikel 76 (3) der Grundsatzverordnung dazu berechtigt, „Zertifizierungsspezifikationen und andere Einzelspezifikationen, annehmbare Nachweisverfahren sowie Anleitungen“ [30] zu erarbeiten. In den Zertifizierungsspezifikationen (engl. *Certification Specifications*, CS), häufiger Bauvorschriften genannt, stehen explizit einzuhaltende und nachzuweisende technische Anforderungen an Luftfahrtprodukte [31]. Luftfahrtprodukte sind nach ICAO entweder Luftfahrzeuge, Motoren oder Propeller (siehe Kapitel 3.2) [3]. Die für ein bestimmtes Produkt anzuwendenden Bauvorschriften unterscheiden sich und ergeben sich aus Art und Größe des Produkts [26]. Die Bauvorschriften sind zwar keine unmittelbaren Gesetze, haben jedoch den Charakter von solchen [31], da die EASA mit der Erstellung in der Grundsatzverordnung damit beauftragt wurde und auch für die Zulassungen verantwortlich ist [30]. Die zusätzlich erwähnten annehmbaren Nachweisverfahren und Anleitungen hat die EASA in Form der sogenannten *Acceptable Means of Compliance* (AMC) und dem *Guidance Material* (GM) umgesetzt. In diesen werden die Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der Bauvorschriften und Konformität beschrieben, die die EASA akzeptiert [31]. Sie unterscheiden sich zu den Bauvorschriften dahingehend, dass sie nicht zwangsläufig bindend sind [31]. Es steht jedem Antragssteller frei, eigene Nachweisverfahren zu entwickeln. Diese werden dann jedoch, anders als die AMC, nicht garantiert von der EASA akzeptiert. Die Hierarchie und Übersicht der Regelwerke in der zivilen Luftfahrt sind in **Abbildung 3.1** schematisch dargestellt.

### 3.2 Produkt- und Betriebszulassungen

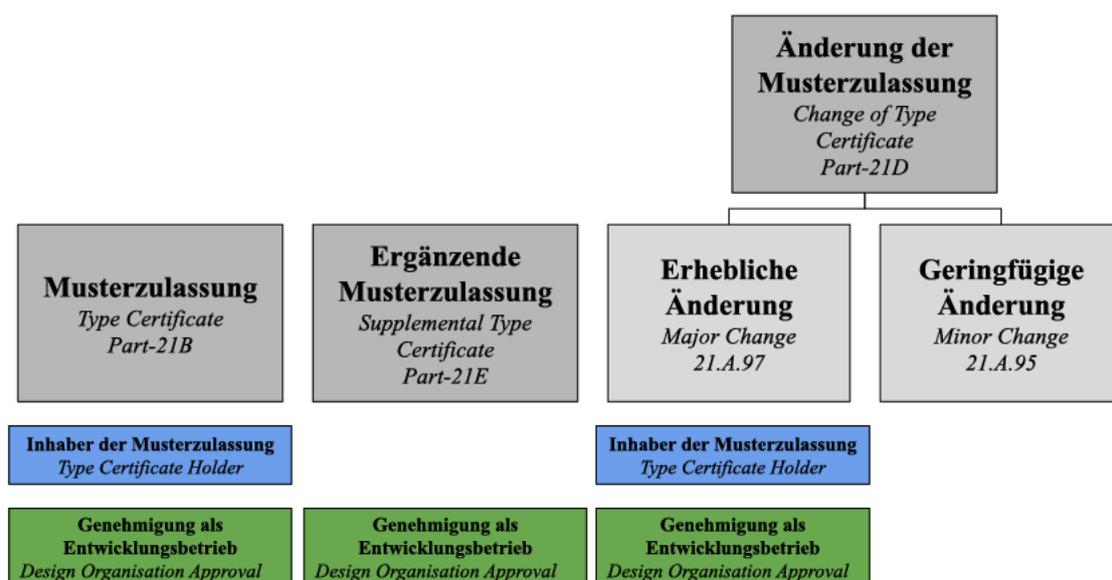
Die ICAO und die EU haben festgelegt, dass Produktzulassungen nur für bestimmte Luftfahrtprodukte ausgesprochen werden dürfen. Diese umfassen Luftfahrzeuge, Motoren und Propeller (Luftfahrtprodukte) [28, 32]. Wird eines dieser Luftfahrtprodukte neu zugelassen, so wird am Ende des Zulassungsprozesses eine sogenannte Musterzulassung (engl. *Type Certificate*, TC) erteilt [32]. Die Musterzulassung gilt für die gesamte Baureihe des Luftfahrproduktes [26]. Ein Beispiel dafür ist die 2014 erteilte Musterzulassung für den Airbus A350-900. Eine nachträgliche Änderung eines bestehenden TC kann durch eine sogenannte Änderung der Musterzulassung (engl. *Change of Type Certificate*) beantragt werden [32]. Eine Änderung der Musterzulassung kann, mit einigen Ausnahmen, nur von dem Inhaber der Musterzulassung selbst beantragt werden [26]. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Anbringung neuer, effizienterer Triebwerke am Airbus A320 (bzw. dann Airbus A320 NEO). Als dritte Option gibt es die sogenannte ergänzende Musterzulassung (engl. *Supplemental Type Certificate*, STC) [32]. Das STC ist ebenfalls eine Änderung eines bestehenden TC. Jedoch kann ein STC sowohl vom Inhaber des TC als auch von Dritten beantragt werden. Beispielweise haben die Elbe Flugzeugwerke eine *Passenger to Freighter Conversion* des Airbus A320/321 mit einem STC zugelassen [33].

Für die Beantragung dieser Zulassungen gelten einige Voraussetzungen, die der Antragssteller erfüllen muss (siehe **Abbildung 3.2**). Hierbei handelt es sich um die Betriebszulassungen nach Part-21. Für reine Betrachtung der erstmaligen Lufttüchtigkeit (engl. *Initial Airworthiness*) sind das die Genehmigung als Entwicklungs- und Herstellbetrieb. Eine Genehmigung als Entwicklungsbetrieb (engl. *Design Organisation Approval*, DOA) erfolgt nach den Anforderungen aus dem Part-21J. Die Genehmigung als Herstellbetrieb (engl. *Production Organisation Approval*, POA) erfolgt nach Part-21G. Diese *Subparts* aus dem Part-21 fordern den zu zertifizierenden

Betrieben einiges ab. Dazu gehört beispielsweise die Etablierung eines Qualitätssicherungssystems, welches definierte Anforderungen erfüllen muss. Auf der anderen Seite erhalten zertifizierte Betriebe im Rahmen der Betriebsgenehmigung bestimmte Privilegien. Des Weiteren ist die DOA eine Voraussetzung für die Beantragung einer Musterzulassung. [26]

Doch nicht alle Zulassungen setzen eine DOA Genehmigung voraus. Es gibt Ausnahmen, die sich auf Änderungen von Musterzulassungen beschränken und von der Einstufung der Änderung abhängen. Die Einstufung der Entwicklung, also der geplanten Änderungen, muss vor Beginn der Zulassung stattfinden. Es wird in geringfügige (engl. *minor*) und erhebliche (engl. *major*) Änderungen unterschieden (siehe **Abbildung 3.2**). Im Part-21 steht dazu: „Geringfügig“ sind Änderungen, die sich nicht merklich auf die Masse, den Trimm, die Formstabilität, die Zuverlässigkeit, die Betriebskenndaten, die Lärmentwicklung, das Ablassen von Kraftstoff, die Abgasemissionen oder sonstige Merkmale auswirken, die die Lufttüchtigkeit des Produkts berühren.“ Alle anderen Änderungen müssen als erheblich eingestuft werden. Neue Musterzulassungen (TC) sind demnach von dieser Unterscheidung direkt ausgeschlossen und gelten immer als erheblich. Alle Änderungen, die als geringfügig gelten, können jedoch ohne DOA Genehmigung beantragt werden. Das bedeutet, jede „natürliche oder juristische Person“, kann eine geringfügige Änderung beantragen. Für DOA Betriebe hat die Einstufung als minor Änderung auch einen Vorteil. Bei minor Änderungen kann ein DOA Betrieb die Zulassung zur Änderung der Musterzulassung selbst durchführen, ohne diese bei der EASA zu beantragen. Nichtsdestotrotz müssen die alle Bauvorschriften eingehalten werden. [32]

Zusammenfassend bedeutet das, dass es keine eigene Bauteilzulassung gibt. Bauteile können also immer nur im Rahmen eines TC zugelassen werden. Das hat den Hintergrund, dass eine Zulassung immer auch Komponenten- und Einbautests verlangt, wie später gezeigt wird. Eine isolierte Bauteilzulassung kann demnach gar nicht stattfinden, denn es muss verifiziert werden, dass das Bauteil die vorgesehene Funktion im Luftfahrtprodukt einwandfrei erfüllt. Allerdings gibt es auch



**Abbildung 3.2** Übersicht der Musterzulassungen und deren Anforderungen an den Antragssteller nach Part-21

hier eine kleine Ausnahme, die auch nicht wirklich eine ist. Neben den in **Abbildung 3.2** zu sehenden Zulassungen, gibt es noch die sogenannte ETSO-Zulassung (*European Technical Standard Order*) nach Part-21O [32]. Dies ist eine reine Bauteilzulassung und damit keinem TC untergeordnet. Häufig mit ETSO zugelassene Bauteile sind beispielsweise Passagiersitze oder Hilfstriebwerke [26] (APU gelten nicht als Motor, da sie kein Antrieb darstellen). Ein nach ETSO zugelassenes Bauteil erfüllt von den Bauvorschriften unabhängig (gemeint sind hier die Bauvorschriften der Luftfahrtprodukte) definierte, technische Mindestanforderungen [26]. Für einen Einbau oder eine Nutzung in einem Luftfahrtprodukt müssen dann noch nachträglich die produktspezifischen Bauvorschriften erfüllt werden [26]. Am Ende kommt man also um ein TC, STC oder eine Änderung der Musterzulassung nicht herum.

### 3.3 Allgemeiner Zulassungsprozesses

Nachdem die Arten der Musterzulassungen von Luftfahrtprodukten diskutiert wurden, soll in diesem Abschnitt der Weg dahin beschrieben werden. Es werden dabei keine bauteil- oder fertigungsspezifischen Einzelheiten bzgl. Materialspezifikationen oder Qualifizierung aufgeführt. Nochmals, in diesem Teil geht es lediglich um den gesetzlichen Rahmen, daher werden hier nur der organisatorische Ablauf und die dazugehörige Dokumentation behandelt. Es wurde erläutert, dass für Bauteile, um deren Zulassung es in dieser Arbeit vorrangig geht, keine isolierte Zulassung erteilt wird (siehe Kapitel 3.2). Für eine Zulassung in einem vorher noch nicht zugelassenen Luftfahrtprodukt, wird ein Bauteil im Rahmen eines TC zugelassen. Im Falle einer Bauteilzulassung im Rahmen eines bestehenden zugelassenen Luftfahrtproduktes, muss dies über eine Änderung der Musterzulassung passieren. Die Art der Entwicklungsänderung entscheidet über die Einstufung der Änderung in *major* oder *minor*. Diese Einstufung muss vor der Antragsstellung und damit vor dem Zulassungsprozess stattfinden, denn sie entscheidet über das *Level of Involvement* (LOI) der Behörde. Da sich der *major* und *minor* Zulassungsprozess sonst nur marginal unterscheiden, bzw. das LOI keine große Auswirkung auf die Inhalte des Zulassungsprozesses haben, wird sich im Folgenden auf den Ablauf eines *major* Zulassungsprozesses beschränkt. Dies deckt auch ein neues TC ab, welches immer als *major* einzuordnen ist. [34]

#### 3.3.1 Ablauf

Der Ablauf eines allgemeinen Zulassungsprozesses nach Hinsch ist in **Abbildung 3.3** dargestellt. Dieser Prozess beschränkt sich nicht auf eine bestimmte Behörde. Am Anfang eines jeden Zulassungsvorhabens steht die Entwicklung des sogenannten Musterprüfprogramms (engl. *Certification Programme*). Dies besteht aus einem *Certification Plan* (CP), einem Projektplan und einer *Compliance Checklist*. Der CP ist, wie der Name schon sagt, die Beschreibung des gesamten Zulassungsvorhabens. Dieser muss eine komplette Beschreibung des Entwicklungsprojekts beinhalten, also eine umfassende Beschreibung des Bauteils inkl. der vorgesehenen Funktion. Das Entwicklungsprojekt kann vor dem Beginn der Zertifizierung bereits abgeschlossen sein. Es ist



Abbildung 3.3 Ablauf eines Zulassungsprozesses (Musterprogramm). Aus [26]

jedoch üblich, dass noch während der Entwicklungsphase erste Zertifizierungstätigkeiten stattfinden. In dem Fall muss die Beschreibung des Entwicklungsprojekts nachgereicht werden. Außerdem muss der CP ein Vorschlag für die anzuwendenden Bauvorschriften (engl. *Certification Basis*, CB) enthalten. In der CB werden demnach zunächst alle nach Auffassung des Antragsstellers für das zu zertifizierende Entwicklungsprojekt geltenden Bauvorschriften aufgeführt, zu denen später die Konformität mittels Nachweisführung gezeigt werden muss. Die CB kann im späteren Verlauf der Zulassung noch von der Behörde verändert werden, denn die Auslegung der Bauvorschriften ist nicht immer eindeutig und kann in einigen Fällen großen Interpretationsspielraum offenbaren. Logischerweise ist der Antragssteller daran interessiert, die Anzahl der anzuwendenden Bauvorschriften möglichst gering zu halten, weil dies auch die Anzahl der zu erbringenden Nachweise reduziert und damit die Kosten senkt. Dadurch ist es üblich, dass die Behörde die CB erweitert. Neben der CB gehört auch eine Beschreibung der geplanten Nachweismethoden in den CP. Die Nachweisführung wird in **Kapitel 3.3.2** ausführlich behandelt. [26]

Nachdem die Entwicklung des Musterprüfprogramms abgeschlossen ist folgt, wie in **Abbildung 3.3** zu sehen, eine Phase der Abstimmung zwischen Antragsteller und Behörde. Hier findet vorzugsweise die Evaluierung des Musterprüfprogramms seitens der Behörde statt. Dazu gehört auch die zuvor erwähnte mögliche Ergänzung der CB. Ist dies abgeschlossen wird die finale CB und das Musterprüfprogramm vollständig dokumentiert und damit festgehalten. [26]

### 3.3.2 Nachweisführung

In diesem Schritt verbirgt sich der größte Aufwand für den Antragssteller. Bisher wurde nämlich nur definiert und dokumentiert. Das ändert sich mit der Nachweisführung. Hier werden alle im CP geplanten Nachweise durchgeführt [26]. Diese können je nach Entwicklung sehr aufwendig und kostspielig sein. Ebenfalls liegt hier der Fokus dieser Arbeit, denn die Schwierigkeit von AM bzgl. Zulassung liegen in der Art und Weise der adäquaten Nachweisführung. Wiederholend sei erwähnt, dass die Nachweisführung die Konformität zu den anzuwendenden Bauvorschriften aufzeigt [26]. Wie dieser Konformitätsnachweis erbracht wird, ist dabei entscheidend. Im Fall von AM kann sich dies, wie später gezeigt wird, aufgrund der Prozessinstabilität schwierig und aufwendig gestalten.

Die verschiedenen Nachweismethoden (engl. *Means of Compliance*, MoC) wurden von der EASA in den AMC 21.A15 (b) kategorisiert. Dies erfolgte in Form einer Durchnummerierung von 0 bis 9. Alle MoC sind in **Tabelle 3.1** zusammengefasst. Da diese aus den AMC stammen, ist die Verwendung dieser Kategorisierung kein Zwang, aber sie ist üblich. [32]

Der Ablauf der Nachweisführung beginnt vorbereitend mit einer Erstellung einer Testbeschreibung, Testanweisung, Beschreibung der Testeinrichtung und Beschreibung des Konfigurationsstandes des zu testenden Objekts. Darin enthalten sind beispielsweise die genaue Darlegung der zu verwendenden Messgeräte und Teststände. [26]

Während der Nachweiserbringung sind Durchführung und Testergebnisse zu dokumentieren. Bevor die Testergebnisse zusammen mit allen anderen Unterlagen bei der Behörde eingereicht werden können, müssen sie einer unabhängigen Zweitkontrolle unterzogen werden. Die Nachweisverifizierung prüft auf Korrektheit der Vorgänge, Tests und Dokumente. War dies erfolgreich, kann die Musterzulassung beantragt werden.

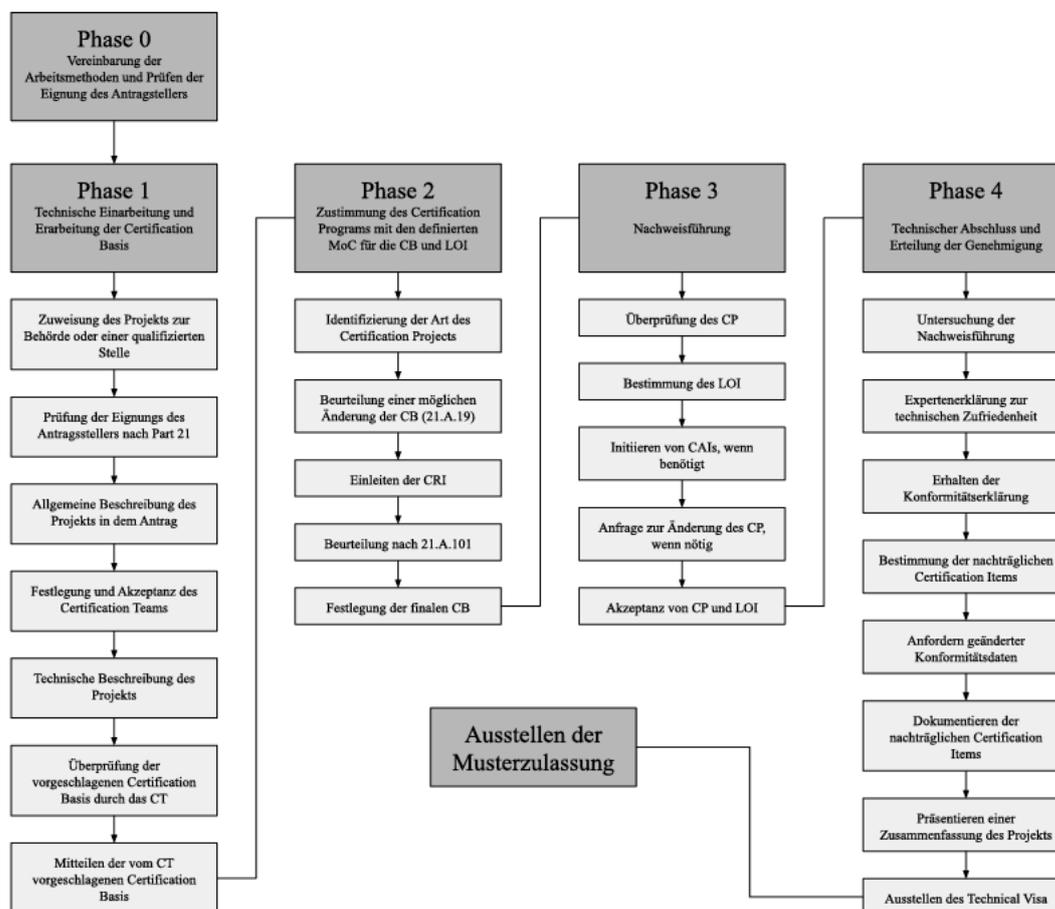
Wie in **Abbildung 3.3** zu sehen ist, beginnt mit der Nachweisführung bereits die sogenannte Musterprüfung. Die Zuständigkeit liegt hier einzig und allein bei der Behörde. Die Musterprüfung prüft i.d.R. stichprobenartig die Nachweisführung. Dies wird zum einen anhand der eingereichten

**Tabelle 3.1** Methoden der Nachweisführung (MoC) aus 21.A.15 (b) [32]

Art des Nachweises	Nummer	Nachweismethode
Engineering Evaluation	MoC 0	(a) Compliance statement (b) Reference to design data (c) Election of methods, factors, etc. (d) definitons
	MoC 1	Design review
	MoC 2	Calculation / analysis
	MoC 3	Safety assessment
Tests	MoC 4	Laboratory tests
	MoC 5	Ground test on related product(s)
	MoC 6	Flight tests
	MoC 8	simulation
Inspection	MoC 7	Design inspection/audit
Equipment qualification	MoC 9	Equipment qualification

Dokumente durchgeführt, zum anderen behält sich die Behörde vor, bei aller Art von Tests dabei zu sein, um diese persönlich zu begleiten. Der Umfang der Musterprüfung durch die Behörde wird in der Abstimmungsphase in Form des LOI festgelegt. Es sollte erwähnt werden, dass die Musterprüfung keineswegs einen am Ende des Zulassungsprozesses stattfindenden, isoliert zu betrachtenden Schritt darstellt. Vielmehr kann die Musterprüfung bereits nach Antragsstellung und Abstimmungsphase, unter Umständen sogar noch parallel zur Entwicklungsaktivität, stattfinden. Der Abschluss der Musterprüfung endet mit der Erteilung der Musterzulassung und damit endet der Zulassungsprozess. [26]

Zum besseren Verständnis dieses Prozesses wird in **Abbildung 3.4** ein detaillierter Ablauf des Zulassungsprozesses aus der Sicht der Behörde dargestellt. Hierbei wird der schiere Umfang deutlich. Ein Zulassungsprozess kann bei großen Entwicklungen bis zu fünf Jahre dauern, das folgt aus der Gültigkeit eines Antrags auf Musterzulassung [32]. Abschließend soll festgehalten werden, dass ein Zulassungsprozess keineswegs ein eigenverantwortlicher Prozess ist, weder seitens des Antragstellers noch der Behörde. Es ist unerlässlich, dass sich die beiden Parteien in einem regen Austausch befinden. Insbesondere bei neuen und unerforschten Technologien, wie AM, ist dies von großer Bedeutung.



**Abbildung 3.4** Detaillierter Ablauf eines Zulassungsprozesses aus Sicht der EASA. In Anlehnung an [35]

### 3.4 Relevante Bauvorschriften

Bei der Vorstellung des allgemeinen Zulassungsprozesses wurde gezeigt, dass es im Rahmen des Musterprüfprogramms und des CP eine Identifikation der anzuwendenden Bauvorschriften bedarf. Diese Bauvorschriften bilden die CB. Die Konformität zu diesen muss in der Nachweisführung belegt werden. Die Auswahl der Bauvorschriften hängt dabei in erster Linie von dem Luftfahrtprodukt ab, welches zugelassen werden soll, oder in welches das zuzulassende Bauteil eingebaut wird. Wie in **Kapitel 3.1** bereits erläutert, gibt es Bauvorschriften für Luftfahrzeuge, Motoren oder Propeller. Weiterhin werden die Bauvorschriften der Luftfahrzeuge nach Gewichtsklassen unterschieden. Da sich diese Arbeit auf den zivilen, kommerziellen Bereich der Luftfahrt beschränken soll, wird für Identifikation der Bauvorschriften nur die CS-25 zu Grunde gelegt. Darüber hinaus entscheidet das zuzulassende Bauteil über die CB. Je nach Funktion und Systemintegration können sich grundverschiedene CB ergeben. Da es hier um einen generischen Zulassungsprozess geht, können bauteilspezifische Aspekte nicht berücksichtigt werden. Deshalb wird sich bei der folgenden Vorstellung relevanter Bauvorschriften auf die allgemeingültigen Paragraphen beschränkt (siehe **Tabelle 3.2**).

Alle Materialien von sicherheitsrelevanten Bauteilen müssen nach CS.X.603 in Form von Erfahrungswerten oder Tests qualifiziert werden. Bei Verwendung eines Materials mit bereits vorhandenen Materialspezifikationen müssen die Konformität der Materialdaten sichergestellt werden. Das bedeutet, es kann nicht einfach ein Wert aus dem MMPDS entnommen werden und lediglich auf die identische chemische Zusammensetzung o.Ä. verwiesen werden. Es müssen die Materialeigenschaften nochmals validiert werden, jedoch in einem deutlich geringeren Umfang als bei der Qualifizierung eines neuen Materials. CS.X.603 bezieht sich jedoch nur auf mechanischen Eigenschaften von Materialien. Darüber hinaus müssen chemische Anforderungen erfüllt werden. Wird ein Bauteil in der Kabine verbaut, so müssen beispielsweise Tests zur Untersuchung der Toxizität, Rauchentwicklung und Entflammbarkeit nach CS.X.853 durchgeführt werden. [17]

Den Fertigungstechnologien wird in den CS nur ein kleiner Absatz gewährt, welcher hauptsächlich aussagt, dass eine Fertigungsmethode konsistente, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse erzielen muss. Für Kleben, Punktschweißen, Wärmebehandlungen und alle anderen Fertigungsmethoden, die diese Voraussetzung nicht ohne großen Mehraufwand erzielen können, ist eine zuzulassende Prozessspezifikation nötig. Alle neuen Fertigungsmethoden müssen außerdem einem Testprogramm unterzogen werden. Beide diese Punkte treffen auf AM zu. [17]

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Strukturbauteilen. Viele dieser Bauteile erfahren Belastungen, die sie anfällig für Materialermüdung machen. Materialermüdung ist die im Flugzeug am häufigsten auftretende Versagensform [35]. Bei Bauteilen, deren Versagensfolge als *catastrophic* eingestuft wird (kritische Bauteile), muss deshalb unter anderem gezeigt werden, dass kein Ermüdungsversagen aufgrund von Fertigungsfehlern über die gesamte Betriebszeit des Flugzeugs auftritt [17]. Dies mit AM zu erreichen, ist momentan noch eine große Herausforderung, weshalb die bisher zugelassenen AM-Bauteile in der zivilen Luftfahrt keine kritischen Bauteile sind [35], wie einige Beispiele später zeigen werden.

<b>Tabelle 3.2</b>	Auszug einiger für AM besonders relevanter Bauvorschriften aus den Certification Specifications [17]
<b>CS.X.603</b>	<p><b>Materials</b></p> <p>The suitability and durability of materials used for parts, the failure of which could adversely affect safety, must –</p> <p>(a) Be established on the basis of experience or tests;</p> <p>(b) Conform to approved specifications, that ensure their having the strength and other properties assumed in the design data (See AMC 25.603(b); and</p> <p>(c) Take into account the effects of environmental conditions, such as temperature and humidity, expected in service</p>
<b>CS.X.605</b>	<p><b>Fabrication methods</b></p> <p>(a) The methods of fabrication used must produce a consistently sound structure. If a fabrication process (such as gluing, spot welding, or heat treating) requires close control to reach this objective, the process must be performed under an approved process specification.</p> <p>(b) Each new aircraft fabrication method must be substantiated by a test programme.</p>
<b>CS.X.571</b>	<p><b>Damage tolerance and fatigue evaluation of structure</b></p> <p>(a) General. An evaluation of the strength, detail design, and fabrication must show that catastrophic failure due to fatigue, manufacturing defects, environmental deterioration, or accidental damage, will be avoided throughout the operational life of the aeroplane. [...]</p>
<b>CS.X.613</b>	<p><b>Material strength properties and Material Design Values</b></p> <p>(a) Material strength properties must be based on enough tests of material meeting approved specifications to establish design values on a statistical basis.</p> <p>(b) Material design values must be chosen to minimise the probability of structural failures due to material variability. Except as provided in sub-paragraphs (e) and (f) of this paragraph, compliance must be shown by selecting material design values which assure material strength with the following probability:</p> <p>(1) Where applied loads are eventually distributed through a single member within an assembly, the failure of which would result in loss of structural integrity of the component, 99 % probability with 95 % confidence.</p> <p>(2) For redundant structure, in which the failure of individual elements would result in applied loads being safely distributed to other load carrying members, 90 % probability with 95 % confidence.</p> <p>(c) The effects of environmental conditions, such as temperature and moisture, on material design values used in an essential component or structure must be considered where these effects are significant within the aeroplane operating envelope.</p> <p>(e) Greater material design values may be used if a “premium selection” of the material is made in which a specimen of each individual item is tested before use to determine that the actual strength properties of that particular item will equal or exceed those used in design.</p> <p>(f) Other material design values may be used if approved by the Agency.</p>
<b>CS 25.619</b>	<p><b>Special factors</b></p> <p>The factor of safety prescribed in CS 25.303 must be multiplied by the highest pertinent special factor of safety prescribed in CS 25.621 through CS 25.625 for each part of the structure whose strength is–</p> <p>(a) Uncertain.</p> <p>(b) Likely to deteriorate in service before normal replacement; or</p> <p>(c) Subject to appreciable variability because of uncertainties in manufacturing processes or inspection methods.</p> <p>Where the Agency is not satisfied in a specific case that a special factor is the correct approach to ensuring the necessary integrity of the parts of the structure under service conditions, other appropriate measures must be taken.</p>

Die CS.X.613 legt die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Materialfestigkeiten und Auslegungswerte (engl. *Design Values*) fest. Diese müssen einer statistischen Auswertung unterliegen, welche in diesem Paragraphen mit quantitativen Anforderungen vorgeschrieben werden. Damit sollen Variabilität in Material, Fertigung und Bauteil abgedeckt werden [17]. Ein kleiner Ausblick: Bei AM kann es besonders schwierig sein, diese Werte zu erreichen. Hier benötigt es ein hohes Verständnis der Prozessparameter und deren Auswirkungen, um einen entsprechend reproduzierbaren Prozess überhaupt erreichen zu können.

Der letzte in **Tabelle 3.2** aufgeführte Paragraph (CS 25.619) zeigt die mögliche Notwendigkeit von speziellen Sicherheitsfaktoren, die bei allgemeiner Unsicherheit über das Bauteil oder den verwendeten Fertigungsprozess nötig sein können. Anders als die bisher genannten Paragraphen ist dies eine speziell für *large aeroplane* geltende Vorschrift, die nur in der CS-25 vorkommt [17]. Dies ist außerdem ein gutes Beispiel für eine Bauvorschrift, die viel Interpretationsspielraum gewährt und sicherlich im Rahmen der Definition der CB ein zwischen der Behörde und dem Antragssteller abzuklärender Paragraph ist.

Anhand der präsentierten Auszüge aus den Bauvorschriften wird deutlich, dass die CS i.d.R. keine auf ein Material oder Fertigungsprozess bezogene Bauvorschriften herausgibt. Dennoch wird dies in Form der Notwendigkeit eines stabilen und konsistenten Fertigungsprozesses berücksichtigt. Allerdings gibt es eine Ausnahme: Im Paragraph CS 25.621 werden fertigungsbedingte Sicherheitsfaktoren für das Gießen von Strukturbauteilen festgelegt [17]. Bisher gibt es keine eigenen Sicherheitsfaktoren für AM, obwohl diese angesichts der Ähnlichkeiten der Technologien sicherlich denkbar wären.

### 3.5 Stellungnahmen der Behörden zu AM

Wie aus Kapitel 3.4 hervorgeht, erlassen die Behörden i.d.R. keine fertigungsspezifischen Vorschriften. Auch wenn es in der Zukunft spezielle AM-Vorschriften geben könnte, aufgrund der Neuheit der Technologie ist dies wahrscheinlich noch in weiter Ferne. Nichtsdestotrotz gibt es Stellungnahmen seitens der Behörden zum Thema additive Fertigung. Dies sind weder Vorschriften noch akzeptierte Nachweisverfahren und haben deshalb keinen bindenden Charakter. Trotzdem sind diese Informationen wichtig, denn sie werden von den Behörden herausgegeben, also der Organisation, die am Ende die Zulassung erteilt. Der Fokus liegt auf den Stellungnahmen der EASA und der FAA.

#### 3.5.1 EASA Certification Memorandum

Ein *Certification Memorandum* (CM) ist eine offizielle Stellungnahme der EASA zu einem bestimmten Thema hinsichtlich Zertifizierung. Die EASA veröffentlicht solche Stellungnahmen, wenn zu einem bestimmten Thema gehäuft Fragen aufkommen oder ein großer Bedarf an Aufklärung erkannt wird. Wie schon in der Einleitung zu diesem Kapitel erwähnt, ist der Inhalt nicht bindend und stellt nur eine Orientierungshilfe dar. Auch dürfen die Inhalte darin nicht als AMC, GM o.Ä. angesehen und im Zulassungsprozess referenziert werden. [36]

Im April 2017 veröffentlichte die EASA das CM-S-008 mit der Überschrift „Additive Manufacturing“ mit dem Zweck der ergänzenden Anleitung für die Einführung von AM in Luftfahrtprodukten [36]. Als erstes wird darin klargestellt, dass AM-Materialien prozessabhängig und damit nicht nur vom Materiallieferanten abhängig sind. Dies muss dementsprechend bei der Ermittlung der Materialkennwerte berücksichtigt werden. Darüber hinaus muss die gegebene hohe Variabilität des AM-Prozesses in die im *Type Design* geforderten Spezifikationen miteinfließen. Zusätzlich behält sich die EASA vor, bei der Einordnung von *Design Changes* in Form der Einführung neuer Fertigungstechnologien, eine von Fall zu Fall unterschiedliche Evaluierung, basierend auf der Erfahrung des Antragsstellers und der Kritikalität des Bauteils, durchzuführen. [36]

Die AM Zertifizierungspolitik der EASA wird in den folgenden Punkten zusammengefasst: [36]

- Bauteile und Produkte müssen unabhängig vom Fertigungsprozess die in der CB definierten anzuwendenden CS erfüllen.
- Es muss mittels Tests oder Erfahrung gezeigt werden, dass das Material für die vorgesehene Anwendung und das zu fertigende Bauteil geeignet ist.
- Das Ausgangsmaterial muss durch eine genehmigte Materialspezifikation erworben und mittels genehmigter Inspektionsmethoden kontrolliert werden.
- Es muss nachgewiesen werden, dass die Auslegungswerte auf statisch signifikanten Testdaten beruhen und dass damit alle Prozessparameter und die Maschinenvariation abgedeckt sind.
- Die Probekörper, mit denen die Testwerte ermittelt werden, müssen die mechanischen Eigenschaften des Bauteils widerspiegeln. Bei sehr komplexen Bauteilen können dagegen Tests aus dem oberhalb der Probekörper liegenden Teil der Testpyramide nötig sein.
- Faktoren, die Einfluss auf die Bauteileigenschaften nehmen, wie Bauraumausrichtung, Stützstruktur, unzugängliche Oberflächen und eine potenzielle Anisotropie, müssen zusätzlich zu den Prozessparametern berücksichtigt werden.
- Die Auslegungswerte müssen auf die Material- und Prozessspezifikationen, die zur Fertigung der Bauteile verwendet werden, anwendbar sein.
- Es muss nachgewiesen werden, dass Materialien und Prozesse durch Spezifikationen geregelt sind und wiederholenden Kontrollen unterzogen werden.
- Die Verwendung von AM als Fertigungstechnologie muss in dem CP berücksichtigt werden.

Bzgl. Reparaturzulassungen und *Design Changes* betont die EASA im CM, dass die Einstufung eines *Design Changes* im Falle der Einführung von AM als erhebliche Änderungen (*major*) erfolgen kann. In allen Fällen jedoch rät die EASA bei der Implementierung von AM zu einer frühen Kontaktaufnahme. [36]

Auch wenn die hier aufgeführten Punkte bzgl. der AM-Zulassung nicht bindend sind, sollen sie zusammen mit den in Kapitel 3.4 erläuterten bindenden Vorschriften den gesetzlichen Rahmen des Zulassungsprozesses bilden.

### 3.5.2 FAA und Workshops

Im Gegensatz zur EASA hat die FAA bis dato keine offizielle Stellungnahme zum Umgang mit AM herausgegeben, obwohl die FAA mit den sogenannten *Advisory Circulars* eine ähnliche Herangehensweise zu zulassungsrelevanten Stellungnahmen verfolgt. Die FAA hat lediglich ein internes Memorandum für AM Bauteile, die mit PBF-Verfahren gefertigt werden, erstellt, welches für die Mitarbeiter Anhaltspunkte für den Umgang mit AM in der Zertifizierung liefern soll [37]. Trotzdem gibt es einige Aussagen von Mitarbeitern der Behörde, aus denen in diesem Kapitel die wichtigsten Erkenntnisse extrahiert und vorgestellt werden. Diese kommen zum Großteil von Präsentationen aus AM-Workshops, die seit 2015 alljährlich abwechselnd von der EASA und der FAA organisiert werden [38]. Die Teilnehmer dieser Workshops sind hauptsächlich andere Zulassungsbehörden und Unternehmen aus der Luftfahrtindustrie sowie Standardisierungsorganisationen [38]. Ziel dieser Workshops ist es, die zulassungsrelevanten Unklarheiten zu AM im Gleichschritt zu bewältigen und einen engeren Austausch zwischen Industrie und Behörden zu initiieren [38]. Aufgrund der informellen Art und Weise der Vorträge, können aus ihnen nicht nur Kommentare zu Gesetzesauslegungen entnommen werden, sondern auch grundlegende Q&C Prozessspezifikationen und Erkenntnisse über AM.

Die FAA hat im Vorfeld der zu nennenden Hinweise bzgl. des AM-Zulassungsprozesses Probleme und Schwierigkeiten identifiziert. Daraus resultieren Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Diese Punkte spiegeln die momentane (2017) Situation wider. Dies ist der Ausgangspunkt, an welcher sich die FAA sieht.

- Limitiertes Verständnis über Toleranzbänder von kritischen Prozessparametern
- Limitiertes Verständnis von Ausfallmechanismen und Materialanomalien
- Fehlende Materialdatenbanken
- Entwicklung adäquater NDT Methoden
- Fehlende Spezifikationen und Standards
- Großer Spielraum für Konstruktionen
- Mangel an Zulieferer adäquater Ausgangsmaterialien
- OEM firmenexklusives Wissen und Ansätze
- Leichter Einstieg für unerfahrene Zulieferer [39]

Aus diesen zu bewältigenden Herausforderungen ergeben sich Maßnahmen und Berücksichtigungen der Prozessschritte (siehe **Tabelle 3.3**). Diese stammen indirekt aus dem erwähnten internen Engineering Memorandum der FAA. Obwohl das Memorandum nicht veröffentlicht wurde, hat die FAA im Rahmen des AM-Workshops 2016 einen tiefen Einblick in den Inhalt gewährt, was sich hier zu Nutze gemacht wird.

In der ersten Spalte von **Tabelle 3.3** sind die Berücksichtigungen beim Bauteildesign aufgeführt. Diese beinhalten unter anderem Überhänge und die Bauteilausrichtung im Bauraum. Warum es wichtig ist, dies bei der Bauteilentwicklung zu berücksichtigen, zeigt die **Abbildung 3.5**. Unten ist zu sehen, dass das Fertigungsergebnis bei kleiner werdendem Winkel schlechter wird. Oben wiederum ist zu erkennen, dass nicht nur der Winkel, sondern auch die Größe von Überhängen entscheidend ist. Überhänge von 90° sind möglich, wenn dieser nicht zu weit hinausragt. Mithilfe

**Tabelle 3.3** AM Prozessschritte und zu berücksichtigenden Aspekte aus dem internen FAA AM Engineering Memorandum. Aus [37]

Prozessschritt	Berücksichtigung von...
Bauteildesign	Stützstruktur, Oberflächenrauheit, Zugänglichkeit bei komplexen Geometrien, Löcher, Überhänge, Winkel, Bridging, Bauteilausrichtung (siehe <b>Abbildung 3.5</b> )
Ausgangsmaterial (Pulver)	Partikelgröße, Partikelform, Pulververteilung, chemische Zusammensetzung, Reinheit, Fließverhalten
Prozess / Verfahren	Materialdichte, Gefüge, Oberflächenstruktur, geometrische Details, Wiederverwendung des Pulvers
Nachbereitung	Wärmebehandlung, Entfernen von der Bauplattform, Entfernen der Stützstruktur
Inspektion	Erkennung winziger Materialanomalien, Fehlermuster, mehrere NDTs, Röntgen, Eindringprüfung, Wirbelstrommethoden, Ultraschall, Bauteilprüfung, Probekörperprüfung
Sonstiges	Elektronische Daten (CAD, Slicer, etc.), Kontamination, Fremdkörper, Luftstrom in der Baukammer, Rückverfolgbarkeit
Prozessvalidierung	Bauteilquerschnitte, metallurgische Untersuchung, chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften, Variabilität, Veränderung der Prozessparameter
Ermittlung der Materialdaten	Variabilität, Anisotropie, Testkörper, Bauteiltests, Signifikanz, Ursachen für Abweichungen, Berücksichtigung von Anomalien

von geschickter Bauteilausrichtung und Verwendung von Stützstruktur, können diese Phänomene vermieden werden. Deshalb muss dies bei der Konstruktion im Hinterkopf behalten werden.

Für die Ermittlung der Materialdaten hat die FAA, zusammenfassend aus Informationen von Workshops, einen fünfstufigen Ablaufplan zur Bestimmung und Verifizierung der Auslegungswerte (design values) gezeigt (siehe **Abbildung 3.6**). Demnach muss zunächst ein qualifizierter Prozess etabliert sein, bevor mit der Ermittlung der Materialdaten (*Design Values* und *Material Allowables*) begonnen werden kann. Der Prozess muss danach statistischen Kontrollen unterzogen werden, welche die Prozessstabilität gewährleisten. Zum Schluss werden die ermittelten Materialkennwerte anhand der Bauteilqualifizierung verifiziert. Darüber hinaus müssen zwischen den Schritten Methoden zum Nachweis der Äquivalenz eines bestimmten Materialdatensatzes zum Stammdatensatz durchgeführt werden. [40]

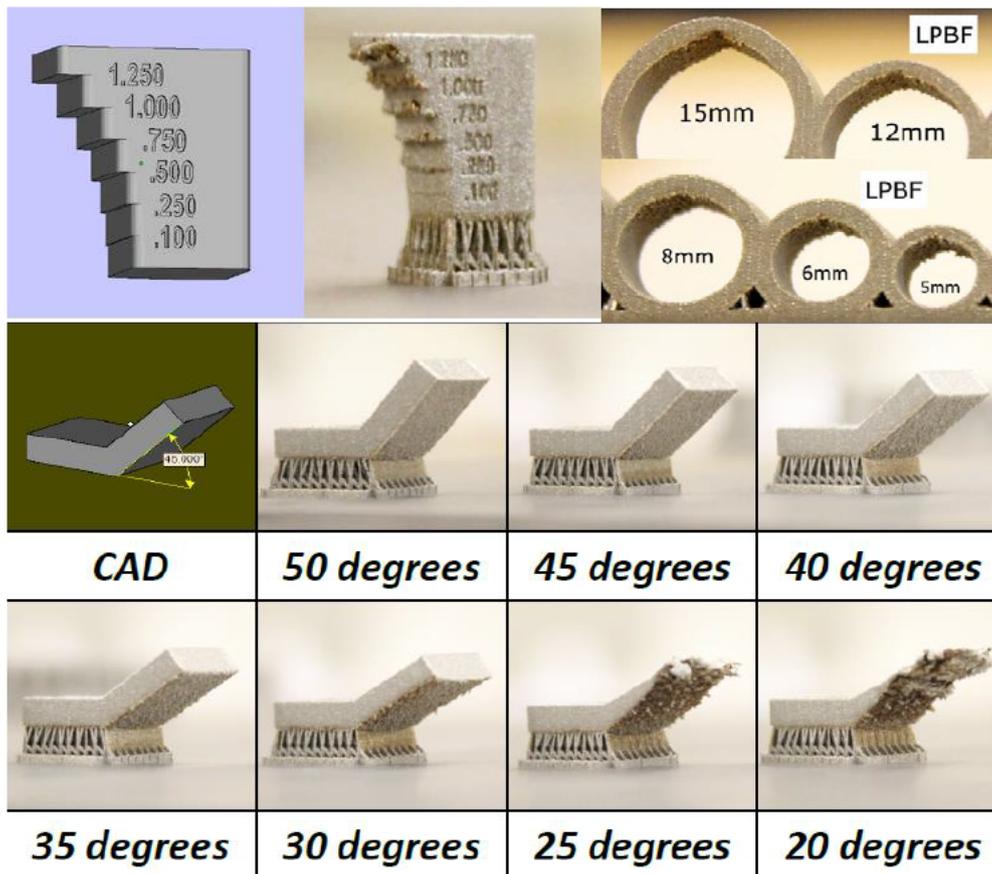


Abbildung 3.5 Druckergebnisse (LPBF) von Überhängen verschiedener Größen (oben) und Winkel (unten). Aus [37]

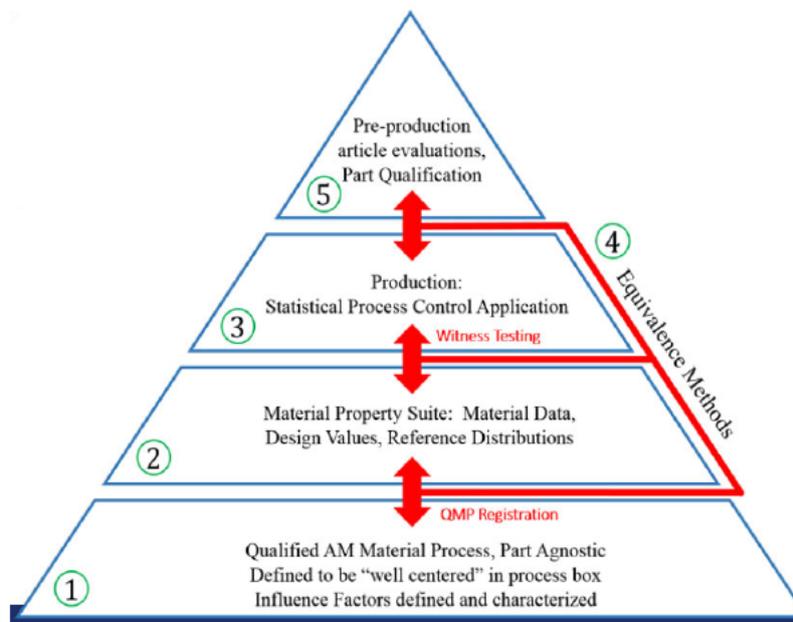


Abbildung 3.6 Fünfstufiger Ablaufplan zur Ermittlung von Design Values für Q&C von AM Bauteilen nach FAA [40]



---

## 4 Standardisierung der additiven Fertigung

Mit den Vorschriften der zivilen Luftfahrtbehörden wurde der gesetzliche Rahmen für die Zulassung von Flugzeugbauteilen beschrieben. Diese Gesetze, also die anzuwendenden Bauvorschriften, bilden die Grenzen, innerhalb derer der Zulassungsprozess stattfindet. Innerhalb dieser Grenzen gewährt die Behörde dem Antragssteller Freiheiten in der Art der Nachweisführung. Die AMC sind nicht bindend und stellen nur einen von der Behörde anerkannten Weg dar. Die Zulassungsvorschrift CS-25 definiert für herkömmliche Fertigungstechnologien teilweise spezielle Vorschriften und Empfehlungen, beispielsweise in Form von zusätzlichen fertigungsbedingten Sicherheitsfaktoren oder anerkannten Testmethoden. Für die additive Fertigung gibt es solche Vorschriften und Empfehlungen bisher noch nicht [17]. Der Mangel an behördlichen Empfehlungen und öffentlich verfügbarem Wissen führt im Falle der Einführung einer neuen Fertigungstechnologie, wie heutzutage bei der additiven Fertigung, zu einer großen Zulassungshürde. Entwicklungs- und Herstellbetriebe müssen sich eigene Testmethoden und Nachweisverfahren erarbeiten, was zu hohen Kosten führt. Diese Tatsache hat in der Luftfahrtindustrie zu firmenexklusivem Wissen geführt und so die Innovation durch mögliche gemeinschaftliche Forschung entschleunigt. Hier können Standardisierungen Abhilfe schaffen. Ein wichtiger Schritt zur Ermittlung des Stands der Technik in der Qualifizierung und Zertifizierung von additiv gefertigten Bauteilen ist deshalb die Recherche nach veröffentlichten Standardisierungen. In der Technik geschieht dies oftmals in Form von Normen.

Normen sind Dokumente, die Anforderungen und Eigenschaften von Produkten, Dienstleistungen oder Verfahren definieren, um diese gezielt und anwenderorientiert zu standardisieren. Durch diese Vereinheitlichung wird eine Vergleichbarkeit gewährleistet, was die Effizienz und Qualität steigern soll. Normen sind keine Gesetze und damit nicht bindend. Sie können jedoch bindend werden, wenn sie in Verträgen, beispielsweise in einem Liefervertrag als Lieferbedingung, festgehalten werden. In den meisten Fällen üben Normen bereits durch die kollektive Akzeptanz einen unumgänglichen Zwang aus. In Deutschland erstellt und veröffentlicht das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN) seit 1917 Normen und Standards. Als gemeinnütziger Verein arbeitet das DIN unabhängig als Partner für die Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft. Dabei ist eine der wichtigsten Aufgaben die Unterstützung bei der Einführung neuer innovativer Lösungen mithilfe von Standardisierung. [41, 42]

Aufgrund der heutigen Internationalität technischer Produkte wären rein nationale Normen nicht zielführend. Daher braucht es international harmonisierte Normen. In Europa werden Normen durch das *Europäische Komitee für Normung* (CEN) veröffentlicht, die teilweise auch als harmonisierte Normen im Auftrag nationaler Normungsinstitute erarbeitet werden [43]. *Die International Organization for Standardization* (ISO) ist ein internationaler Zusammenschluss 165 nationaler Normungsinstitute und veröffentlicht ebenfalls harmonisierte Normen [44].

Doch Standardisierung kann sich nicht nur in Normen manifestieren. Standardisierung ist, allgemein beschrieben, eine unverbindliche Vereinheitlichung von Produkten oder Prozessen. Ob eine Standardisierung auch zu einem genutzten und anerkannten Standard wird, entscheidet der Markt. Aufgrund dieser Tatsache kann es auch sein, dass eine zunächst nicht als Standardisierung vorgesehene Beschreibung zu einem Standard wird. In dem Kontext dieser Arbeit kann dies bedeuten, dass sich ein praktizierter Zulassungsprozess, wenn er denn öffentlich zur Verfügung gestellt wird, zu einem in der Industrie anerkannten und wiederholend praktizierten Standard wird. Aufgrund der großen Relevanz der praktizierten Zulassungsprozesse für diese Arbeit, werden diese in einem eigenen Abschnitt behandelt (Kapitel 5). Davon abgesehen, kann Standardisierung folgende Dokumente umfassen:

- Normen
- Standardisierte Prozesse und Arbeitsanweisungen
- Werkstoffhandbücher
- Materialdatenbanken
- Spezifikationen
- Roadmaps

#### 4.1 Standardisierungsaktivitäten

Der vorherrschende Mangel an Standardisierung für die additive Fertigung hat viele Standardisierungsinstitute und Organisationen dazu veranlasst, Arbeitsgruppen zu formen, die Normen oder andere Standardisierungsdokumente für die additive Fertigung ausarbeiten. Eine Übersicht der Standardisierungsaktivitäten ist in **Tabelle 4.1** zusammengestellt. Diese Tabelle erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, kann aber als grober Überblick der AM-Standardisierungslandschaft gesehen werden.

**Tabelle 4.1** Übersicht einiger AM Standardisierungsaktivitäten in der Luftfahrt- und Raumfahrt

Bezeichnung	Organisation	Output
AIA	<i>Aerospace Industries Association</i>	Zulassungsprozess
AMSC	<i>America Makes /American National Standards Institute</i>	Standardisierung-Roadmap
ASME Y14.4X	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>	Normen / Spezifikationen
ASTM F42	<i>American Society for Testing and Materials</i>	Normen
AWS D20	<i>American Welding Society</i>	Spezifikationen
CEN/TC 438	<i>Europäisches Komitee für Normung</i>	Normen
ISO / TC 261	<i>International Organization for Standardization / DIN</i>	Normen
MSFC-STD-3716	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>	Zulassungsprozess
NA 145-04 FBR	<i>Deutsches Institut für Normung</i>	Normen
NCAMP	<i>National Institute for Aviation Research</i>	Prozess/Materialdaten/ZP
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>	Publikationen/Roadmap
SAE-AMS-AM	<i>Society of Automotive Engineers</i>	Spezifikationen
VDI 3405	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i>	Normen

## 4.2 Zulassungsrelevante Normen

Aufgrund der Neuheit der additiven Fertigung werden in nahezu allen Bereichen dringend Normen zur Standardisierung benötigt. Für diese Arbeit sind jedoch in erster Linie die Normen interessant, die einen direkten Bezug zur Zulassung haben. Grundsätzlich können fast alle Aspekte der additiven Fertigung zulassungsrelevant sein. Für die spätere Ausarbeitung eines generischen Referenzprozesses sind jedoch nur Normen von Relevanz, die sich mit Testmethoden und Qualifizierung beschäftigen, da kein detaillierter Zulassungsprozess durchgespielt wird.

**Tabelle 4.2** Auswahl einiger zulassungsrelevanter Normen

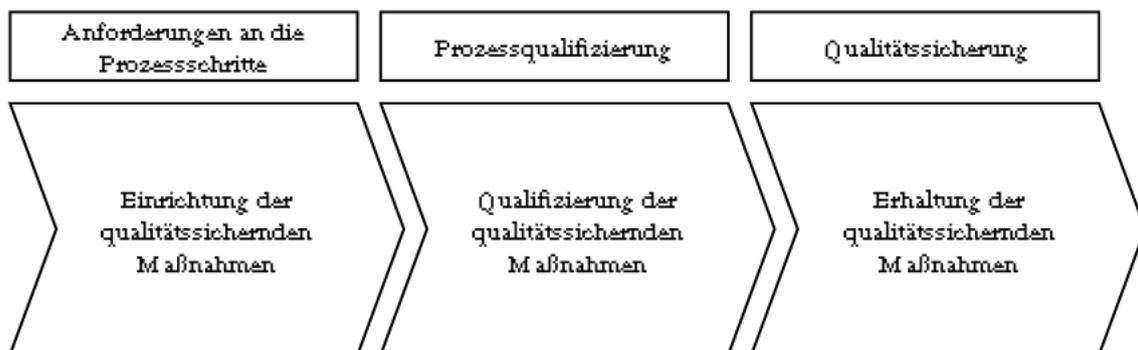
Norm	Jahr	Titel
DIN 17024-1	2020	Additive Fertigung - Prozessanforderungen und Qualifizierung - Teil 1: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unter Verwendung von Draht und Laser in der Luft- und Raumfahrt
DIN 17024-2	2019	Additive Fertigung - Prozessanforderungen und Qualifizierung - Teil 2: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unter Verwendung von Draht und Lichtbogen in der Luft- und Raumfahrt
DIN 17024-3	2020	Additive Fertigung - Prozessanforderungen und Qualifizierung - Teil 3: Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung unter Verwendung von Pulver und Laserstrahl in der Luft- und Raumfahrt
DIN 17296-3	2020	Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 3: Haupteigenschaften und entsprechende Prüfverfahren
DIN SPEC 17071	2019	Additive Fertigung - Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren
DIN 35224	2018	Schweißen im Luft- und Raumfahrzeugbau - Abnahmeprüfung von pulverbettbasierten Laserstrahlmaschinen zur additiven Fertigung
DIN 65123	2017	Luft- und Raumfahrt - Verfahren zur Prüfung von additiv mit Pulverbettverfahren hergestellten metallischen Bauteilen
ISO/ASTM 52902	2020	Additive Fertigung - Testkörper - Allgemeine Leitlinie für die Bewertung der geometrischen Leistung additiver Fertigungssysteme
ISO/ASTM 52904	2020	Additive Fertigung - Prozessanforderungen und Qualifizierung - Verwendung des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen bei kritischen Anwendungen
ISO/ASTM 52924	2020	Additive Fertigung - Qualifizierungsgrundsätze - Güteklassen für additiv gefertigte Kunststoffbauteile
ISO/ASTM 52925	2020	Additive Fertigung - Lasersintern von Polymerteilen/laserbasiertes pulverbettbasiertes Schmelzen von Polymerteilen - Qualifizierung von Materialien
VDI 3405 Blatt 2	2013	Additive Fertigungsverfahren - Strahlschmelzen metallischer Bauteile - Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung

#### 4.2.1 DIN SPEC 17071

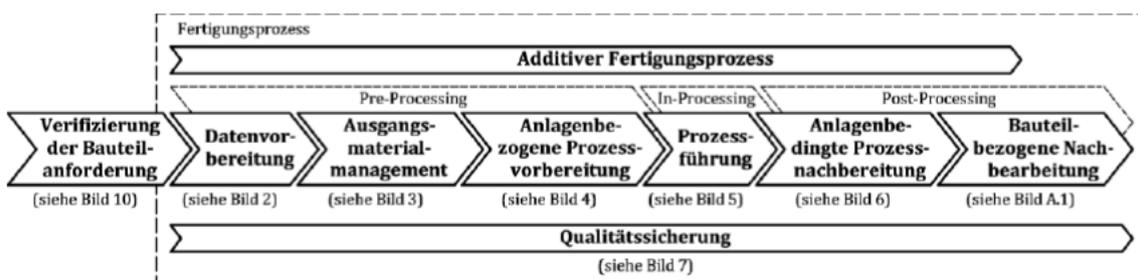
Wie aus **Tabelle 4.2** hervorgeht, handelt die DIN SPEC 17071 von Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für die additive Fertigungszentren. Der Namenszusatz „SPEC“ bedeutet, dass es sich hierbei um eine schnelle und direkte erarbeitete Norm eines temporären Gremiums handelt, was einen kürzeren Weg von der Forschung zum Produkt zur Folge haben soll [41]. Die Tatsache, dass eine Norm für die Definition von Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse auf diesem schnelleren Wege publiziert wird, zeigt abermals die große Notwendigkeit von Standardisierung für die Industrie.

Die DIN SPEC 17071 „legt Kriterien für additive Fertigungsprozesse sowie qualitätsrelevante Merkmale und Faktoren entlang der Prozesskette fest und definiert Tätigkeiten und Abläufe innerhalb eines additiven Fertigungszentrums“ [45]. Mit diesen Definitionen soll das Ziel einer hohen, beständigen und wiederholbaren Produktqualität erreicht werden [45]. Darüber hinaus soll damit die Basis für die Ausarbeitung stark regulierter Prozesse, wie z.B. in der Luft- und Raumfahrtindustrie, geschaffen werden [45]. Es können demnach mithilfe dieser Norm wichtige Prozessparameter und Qualitätssicherungsmaßnahmen identifiziert werden, die für einen Zulassungsprozess nach Luftfahrtvorschriften essenziell sind. Damit stellt diese Norm ein wichtiges Fundament für die Erarbeitung eines Zulassungsprozesses dar.

Es kristallisieren sich 3 Abschnitte des gesamten Qualitätsmanagements eines additiven Fertigungsprozesses heraus, die in **Abbildung 4.2** dargestellt sind. Es kann dabei in Einrichtung, Qualifizierung und Qualitätssicherung der qualitätssichernden Maßnahmen unterschieden werden. Die Anforderungen an die jeweiligen Prozessschritte der Prozesskette müssen zunächst mit den



**Abbildung 4.2** Abschnitte der qualitätssichernden Maßnahmen eines additiven Fertigungsprozesses in Anlehnung an die DIN SPEC 17071



**Abbildung 4.1** "Qualitätsgesicherter Prozess in einem additiven Fertigungszentrum" [45]

von der Norm lokalisierten kritischen Schritten und Parametern eingerichtet werden. Diese werden in **Kapitel 4.2.1.1** erläutert. Sind alle Maßnahmen getroffen, müssen diese mit einer Prozessqualifizierung verifiziert werden. Mögliche Methoden hierfür werden in **Kapitel 4.2.1.2** aufgeführt. Grundsätzlich reicht es nicht aus, einen Prozess zu erstellen und diesen zu qualifizieren. Es bedarf zusätzlich einer stetigen Qualitätssicherung (**Kapitel 4.2.1.3**), also einer Erhaltung der getroffenen Maßnahmen, um die gewünschte Bauteilqualität über einen längeren Zeitraum zu erhalten. [45]

#### 4.2.1.1 Prozessschritte und Anforderungen

Für die angestrebte hohe Qualität der additiv zu fertigenden Bauteile müsse die gesamte Prozesskette in die Qualitätssicherung einbezogen werden [45]. In **Abbildung 4.1** ist die Prozesskette eines generischen, additiven Fertigungsprozesses, bestehend aus 6 Unterprozessen, abgebildet. Die wichtigsten Anforderungen an die einzelnen Prozessschritte sind in **Tabelle 4.3** übersichtlich zusammengetragen. In der Spalte „Unterprozessschritte“ sind die zu definierenden, prüfenden und dokumentierenden Aspekte des jeweiligen Prozessschrittes zu finden. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte der Prozessschritte aus der DIN SPEC 17071 beschrieben.

##### Datenvorbereitung

Der erste Prozessschritt ist die Datenvorbereitung, die als „Digitale Abläufe, die vor der additiven Fertigung stattfinden“ definiert wird. Die digitale Datenverarbeitung ist ein nicht zu vernachlässigender Prozessschritt, da die additive Fertigung, anders als viele herkömmliche Fertigungstechnologien, komplett auf digitalen Daten aufbaut. Wie aus Kapitel 2.2 hervorgeht, wird die in der CAD-Software erstellte Bauteilgeometrie mithilfe des sogenannten *Slicers* in Schichtdaten

**Tabelle 4.3** Anforderungen der Prozessschritte eines qualitätsgesicherten additiven Fertigungsprozesses nach DIN SPEC 17071 [45]

Prozessschritt	Anforderungen
Datenvorbereitung	Prüfung der Daten, Fertigungsbedingte Anpassungen der Geometrie, Platzierung des Bauteils, Generierung der Stützen (Supportstruktur), Generierung der Schichtdaten, Archivierung der Daten
Ausgangsmaterialmanagement	Kontrolle der Charge, Lagerung, Vorbereitung zur Prozessführung, Transport in die Maschine, Transport aus der Maschine
Anlagenbezogene Prozessvorbereitung	Vorbereitung der Anlage, Vorbereitung des Produktionsdurchlaufs
Prozessführung	Betrieb der Anlage, Überwachung des Prozessdurchlaufs
Anlagenbedingte Prozessnachbereitung	Konditionierung der Baukammer, Datensicherung und Archivierung, Entnahme des Bauteils, Nachbereitung der Anlage, Durchführung anlagebedingter Folgeprozesse, Einzelbehandlung der Bauteile
Bauteilbezogene Nachbearbeitung	<i>Keine Anforderungen definiert</i>

umgewandelt. Diese werden dann zusammen mit den ausgewählten Druckparametern zum Drucker gesendet. Um vergleichbare Proben für die anschließende Prozessqualifizierung gewährleisten zu können, schreibt die Norm daher vor, dass die druckerspezifischen Schichtdaten mit allen Prozessparametern zu definieren und einzuhalten sind. Insbesondere bei einer Software-Aktualisierung müsse darauf geachtet werden, dass die gleichen Eingabewerte auch zu denselben Ausgangsdaten wie bei der vorherigen Version der Software führen. Neben den teilweise technisch sehr komplizierten Druckparametern, wie beispielsweise die Laserleistung, sind relativ banale Aspekte wie die Bauraumausrichtung und Generierung der Stützstruktur ebenfalls sehr entscheidende Aspekte, die während der Datenvorbereitung geschehen und dokumentiert werden müssen. [45]

### Ausgangsmaterialmanagement

Bei der Verwaltung des Ausgangswerkstoffs konzentriert sich die Norm hauptsächlich auf die Kontrolle der Wiedereinspeisung von gebrauchtem Material in den Materialkreislauf. Bei einigen Halbzeugen ist es möglich, nicht verwendetes Material eines vorherigen Druckauftrags wiederzuverwenden, wodurch Materialien und Kosten eingespart werden. Bei pulverförmigen Halbzeugen werden beispielsweise nur einige Bereiche der ausgelegten Pulverschicht aufgeschmolzen. Die DIN SPEC 17071 legt als qualitätssichernde Maßnahme eine Unterscheidung von neuen und gebrauchten Ausgangswerkstoffen fest. Des Weiteren wird in Einzel- und Mischchargen unterschieden. Gebrauchte Ausgangswerkstoffe sind solche, die von einem vorherigen Druckauftrag recycelt wurden, während Mischchargen eine Materialmischung mindestens zweier verschiedener Herstellerchargen darstellen. Die **Tabelle 4.4** zeigt die in der Norm bereitgestellte Übersicht zur Unterscheidung der Chargen und Reinheit. Bei gebrauchtem Ausgangswerkstoff und Mischchargen könne keine eindeutige Rückverfolgbarkeit des Ausgangswerkstoffes gewährleistet werden, was Rückschlüsse vom Ausgangswerkstoff auf das Druckergebnis erschwere. Deswegen müsse die Materialhistorie dokumentiert werden. Außerdem müssten die Verfahren zur Wiedergewinnung des bereits verwendeten Materials dokumentiert werden, z.B. das Sieben bei pulverförmigen Halbzeugen. Um Kontamination zweier Chargen zu vermeiden, sollte zusätzlich beim Transport des Materials in und aus der Maschine auf minimierten Kontakt mit der Umgebung und sichere Transportbehälter geachtet werden. Als letzten Punkt sollte bei der Lagerung auf geeignete Lagerkonditionen geachtet werden, bei denen mindestens die Überwachung der Feuchte und Temperatur durchgeführt wird. [45]

**Tabelle 4.4** Rückverfolgbarkeit, Zyklierungsgrad, Chargenreinheit. Aus [45]

<b>Herstellercharge</b> <b>Materialnutzung</b>	<b>Einzelcharge</b> (Filament/Granulat, Pulver, Flüssigkeit)	<b>Mischcharge</b> (Pulver, Flüssigkeit)
<b>Neu</b> (Filament/Granulat, Pulver, Flüssigkeit)	Klare Zuordnung; Eindeutige Charakteristik des Ausgangswerkstoffes	Eingeschränkte Zuordnung; Eingeschränkte Charakteristik <sup>a</sup> des Ausgangswerkstoffes
<b>Gebraucht</b> (Pulver, Flüssigkeit)	Klare Zuordnung; Eingeschränkte Charakteristik <sup>a</sup> des Ausgangswerkstoffes	Erschwerte Zuordnung; Eingeschränkte Charakteristik <sup>a</sup> des Ausgangswerkstoffes

<sup>a</sup> Rückverfolgbarkeit, Zyklierungsgrad, Chargenreinheit

### **Anlagenbezogene Prozessvorbereitung**

Als erster Schritt der anlagenbezogenen Prozessvorbereitung schlägt die Norm im Rahmen der Vorbereitung der Anlage eine Wiederherstellung des Ausgangszustandes der Maschine vor. Nur bei gleichen Ausgangsbedingungen könnten reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden. Dazu gehören die Reinigung, eine fachgerechte Vorbereitung der Maschine mit allen vom Hersteller vorgeschriebenen Schritten und eine Kontrolle des Filterzustands der Schutzgasumgebung. Anschließend sollte laut Norm eine Vorbereitung des Produktionsdurchlaufs geschehen. Dies beinhaltet eine Festlegung der Mindestanforderungen an die Bauplattform und das Sicherstellen des adäquaten Ausgangsmaterialzustand in der Maschine. [45]

### **Prozessdurchführung**

Der Kern der additiven Fertigungsverfahren ist der Druckprozess selbst. Die Systemüberwachung des Druckvorgangs ist deshalb sehr entscheidend für die Qualität und Reproduzierbarkeit. Neben trivialen Anforderungen, wie die Einhaltung der Herstellervorgaben bei den Prozessschritten des Druckers, wird eine Protokollierung des gesamten Produktionsdurchlaufs empfohlen. Dies beinhaltet die Daten des an Drucker gesendeten Fertigungsauftrags, sämtliche fertigungsspezifische Prozessparameter, Status der maschinellen Komponenten mit Messung verschiedenster Temperaturen sowie der verwendeten Werkstoffe und Merkmale der verbauten Maschinenkomponenten. In der Norm wird zusätzlich auf die Möglichkeit einer automatisierten Prozessüberwachung verwiesen, die mithilfe von Sensorik eine echtzeitgeregelte Schichtfehleranalyse durchführt. Auch eine optische Kontrolle per Bildgebung solle in die Überwachung des Prozessdurchlaufs einbezogen werden. [45]

### **Anlagenbedingte Prozessnachbereitung**

Je nach verwendetem additiven Fertigungsverfahren ergeben sich anlagenbedingte Prozessnachbereitungsschritte, um das Bauteil in der gewünschten Form zu erhalten. Die Fertigstellung des Druckauftrags fällt in den seltensten Fällen mit der Fertigstellung des Bauteils zusammen. Beginnend beim Entfernen des Drucks von der Bauplattform, das ebenfalls kontrolliert passieren müsse. Daraufhin müssten sämtliche anlagenbedingten Prozessschritte bis zur Fertigstellung definiert und dokumentiert werden. Dies beinhaltet das Reinigen des Bauteils von überschüssigem Material sowie das Entfernen von Stützstrukturen und anderen nicht zum fertigenden Bauteil gehörenden Strukturen. [45]

### **Bauteilbezogene Nachbearbeitung**

Aufgrund der bereits umfangreich vorhandenen Normen zur Qualitätssicherung der bauteilbezogenen Nachbearbeitung definiert die DIN SPEC 17071 keine Anforderungen zu diesem Prozessschritt [45].

#### **4.2.1.2 Prozessqualifizierung**

Die von der Norm definierten Anforderungen an die jeweiligen Prozessschritte sollen einen qualitätsgesicherten additiven Fertigungsprozess gewährleisten. Es reicht jedoch nicht, einfach diesen Anforderungen nachzukommen und zu hoffen, dass dieser Prozess die angestrebte hohe

Qualität der Bauteile erreicht. Es müsse für jeden der sechs genannten Prozessschritte eine Prozessqualifizierung absolviert werden. Damit soll „die Feststellung reproduzierbarer, produktbezogener Kenngrößen“ erlangt werden. Die Norm schlägt hierfür „die Prüfung von Referenzprobekörpern in statistisch signifikantem Umfang, die die zu qualifizierende Prozesskette durchlaufen haben“ vor. Des Weiteren könne die Prozessqualifizierung Aufschluss über die Qualität des Prozesses geben. Die Prozessqualifizierung ist in erster Linie als Grundlage für die Bewertung der Kenngrößen im Vorfeld der Bauteilfertigung anzusehen. Darüber hinaus kann die Prozessqualifizierung als Teil der Qualitätssicherung auch während der Bauteilfertigung in Form von Fertigungsbegleitproben weitergeführt werden. [45]

Es wird deutlich klargestellt, dass die Qualifizierung einer additiven Fertigungsanlage nur für den in der Prozessqualifizierung verwendeten Prozessparametersatz, das verwendete Ausgangsmaterial und die applizierte Vor- und Nachbereitung gilt. Das bedeutet, es muss immer die Kombination aus Fertigungsverfahren, Maschine, Material und Prozessparametern qualifiziert werden. Wird einer dieser Punkte verändert, muss der Prozess erneut qualifiziert werden. [45]

Wie bereits erwähnt, sind für die Qualifizierung Referenzprobekörper nötig. Diese sollen Werkstoffkennwerte liefern. Für die Ermittlung der Werkstoffkennwerte sagt die DIN SPEC 17071, dass sich, wenn vorhanden, auf genormte Probekörper des jeweiligen Materials mit Herstellung herkömmlicher Fertigungstechnologien bezogen werden soll. Die Anzahl der Probekörper und Druckaufträge sollte in „statistisch repräsentativer Weise“ gewählt werden. Aufgrund der fertigungsbedingten Anisotropie sind die Bauraumausrichtung und Positionierung des Bauteils für das Ergebnis entscheidend, weshalb die Referenzprobekörper in „geeigneter Weise“ platziert werden müssen. [45]

Im Anhang A der DIN SPEC 17071 wird zusätzlich über eine Serien-Qualifizierung geschrieben. Das Erlangen einer Serien-Qualifizierung ist das ausgewiesene Ziel eines Zulassungsprozesses für additiv gefertigte Flugzeugbauteile. Die Norm unterscheidet drei Phasen, die simultan durchgeführt werden können: [45]

- Akzeptanz des Qualifizierungsbauteils
- Akzeptanz des ersten Produktionsbauteils
- Akzeptanz des finalen Bauteils

#### 4.2.1.3 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung dient nach erfolgreicher Prozessqualifizierung zum Erhalt der qualitätssichernden Maßnahmen. Die drei von der Norm genannten Aspekte der Qualitätssicherung sind das Personal, die Dokumentation und die Infrastruktur (siehe **Abbildung 4.3**).

##### Personal

Neben den vielen technischen Anforderungen, die die Norm beschreibt, dürfen auch menschliche Aspekte nicht vernachlässigt werden. 3D-Drucker arbeiten zwar während des eigentlichen Fertigungsprozesses weitestgehend automatisiert, jedoch bedarf es für Vor- und Nachbereitung sowie

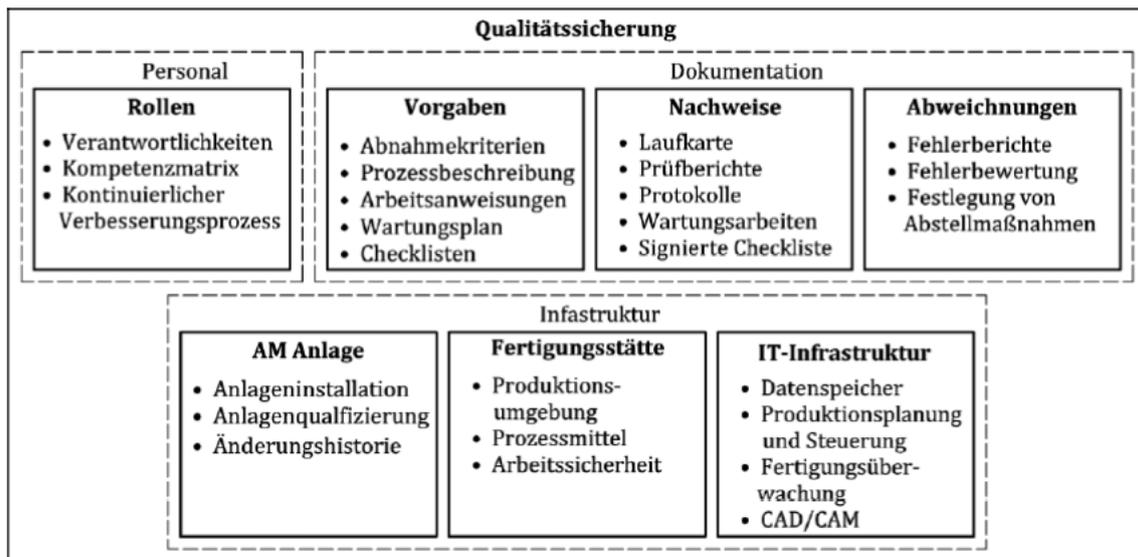


Abbildung 4.3 Elemente der Qualitätssicherung nach DIN SPEC 17071 [45]

für die Prozessüberwachung ausgebildetes Personal. Folgende Punkte sollten für qualifiziertes Personal eingehalten werden: [45]

- Sicherstellen der personellen Aufgabenqualifizierung durch Fähigkeitsnachweise
- Dokumentation des Personaleinsatzes
- Dokumentation über Schulungsnachweise
- Kenntnisnahme der Qualitätsziele durch das Personal

Herstell- und Entwicklungsbetriebe, die eine luftfahrtbehördliche Zulassung als solche haben, müssen ohnehin diese und weitere qualitätssichernde Maßnahmen etabliert haben. Besonders für das Personal gibt es strenge Vorschriften. Für diese Betriebe sind die definierten Anforderungen demnach schon vorhanden. Allerdings werden luftfahrttechnische Produkte nicht nur durch derartige Betriebe entwickelt oder gefertigt. Doch auch diese Betriebe müssen die Nachweise über die Qualitätssicherung erbringen, wenn sie Bauteile für die Luftfahrt entwickeln oder fertigen. Deshalb ist es wichtig, die Anforderungen zu nennen, da diese am Ende wichtiger Bestandteil eines luftfahrtbehördlich anerkannten Zulassungsprozesses sind.

### Dokumentation

Die Dokumentation und Infrastruktur sind ebenfalls wichtige Bestandteile der Qualitätssicherung nach DIN SPEC 17071 (Abbildung 4.3). Nur bei hinreichend genauer und umfangreicher Dokumentation kann die Sicherstellung der qualitätssichernden Maßnahmen überwacht werden. Wie bereits bei den für den Prozess zu definierenden Anforderungen erwähnt wurde, müssen jeder Prozessschritt, jeder Prozessparameter und alle Tätigkeiten zur Einrichtung der qualitätssichernden Maßnahmen dokumentiert werden [45]. Dies gewährleistet eine Rückverfolgbarkeit bei einer Untersuchung zur Reproduzierbarkeit und Qualität einer Material-Prozess-Kombination. Im Rahmen der Erhaltung der qualitätssichernden Maßnahmen sieht die Norm ebenfalls die Dokumentation von Abweichungen vor, denn nur so können Unregelmäßigkeiten frühzeitig erkannt und ausgemerzt werden [45]. Auch das ist eine für luftfahrttechnische Betriebe gängige Praxis [26].

Die Anforderungen an die Infrastruktur additiver Fertigungszentren sollen hier nicht weiter behandelt werden.

### Qualitätskontrollen

Bisher hat sich die Qualitätssicherung auf die Prozessüberwachung beschränkt. Zusätzlich müssen die Bauteile am Ende der Fertigung einer Qualitätskontrolle unterzogen werden. Die Prozessschritte der Qualitätskontrolle nach DIN SPEC 17071 sind in **Abbildung 4.4** dargestellt. Hauptbestandteile sind die fertigungslosen und bauteilbezogenen Qualitätskontrollen. [45]

Bei der fertigungslosen Prüfung geht es zum einen um die zuvor beschriebene Verifizierung sämtlicher prozessbezogener Parameter. Hierzu gehört beispielsweise die Überprüfung der richtigen Druckereinstellungen, mit denen der Prozess qualifiziert wurde. Zum anderen geht es bei der fertigungslosen Qualitätskontrolle um die Prüfung der Fertigungsbegleitproben. Wie oben erwähnt, können Probekörper nicht nur bei der Prozessqualifizierung, sondern auch bei der Qualitätssicherung während der eigentlichen Fertigung in Form von Fertigungsbegleitproben zum Einsatz kommen. Mit Hilfe dieser sollen mechanische und technologische Aussagen über das Bauteil getroffen werden können, ohne das Bauteil selbst genauer dahingehend prüfen zu müssen. Die Proben gewährleisten außerdem einen auf den Produktionsdurchlauf bezogene Rückverfolgbarkeit. Sie können für nachträgliche zerstörende und nicht-zerstörende Tests herangezogen werden. Die Norm schlägt je nach Bauhöhe des Druckauftrags die Verwendung mehrerer Probekörper vor, die in der vertikalen Richtung verteilt werden, sodass „alle Schichten des Produktionsdurchlaufs durch die Prüfung erfasst werden“. Im Nachgang könnten damit dann beispielsweise die „Dichte, Porosität, Härte, Zugfestigkeit, Kerbschlagarbeit, Maßhaltigkeit kontrolliert werden“. Hierzu verweist die DIN SPEC 17071 auf die ISO/ASTM 52902 (**Kapitel 4.2.3**) und auf die VDI Richtlinie 3405. [45]

Jedes Bauteil muss selbstverständlich einer bauteilspezifischen Prüfung unterzogen werden. Es reicht nicht aus, nur die Fertigungsbegleitproben zu prüfen. Wie in **Abbildung 4.4** zu sehen ist, wird in zerstörungsfreie und zerstörende Bauteilprüfung unterschieden. Eine zerstörende Prüfung eines Bauteils bedeutet gleichzeitig, dass der Druckauftrag mindestens mit Losgröße 2 durchgeführt wurde, da hierfür ein zu zerstörendes „Opferbauteil“ benötigt wird. Dies kann auch in Form einer Stichprobenprüfung geschehen. Da die DIN SPEC 17071 lediglich auf die Prozessprüfung eingeht, wird auf eine genaue Beschreibung der Bauteilprüfung verzichtet. Hierfür verweist die Norm auf zahlreiche speziell für diese Anwendung entwickelte Normen. [45]

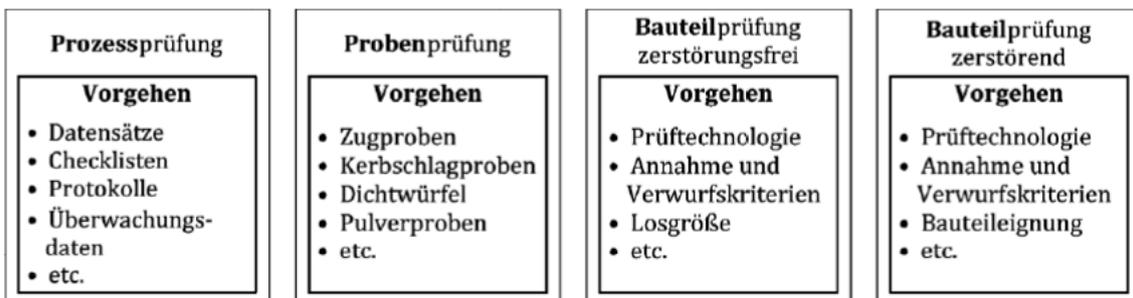


Abbildung 4.4 Ansätze zur Qualitätskontrolle [45]

## 4.2.2 ISO/ASTM 52902

Wie aus Kapitel 3. hervorging, sind die Material- und Prozessqualifizierung ein großer Bestandteil des luftfahrtspezifischen Zulassungsprozesses. Aufgrund der Art und Weise der additiven Fertigung müssen Prozess- und Materialqualifikation jedoch immer in Kombination durchgeführt werden. Dies folgt sowohl aus dem Memorandum der EASA [36] sowie aus der DIN SPEC 17071 [45]. Die DIN SPEC 17071 (Kapitel 4.2.1) schlägt für die Qualifizierung die Anfertigung von Probekörpern vor und verweist auf die Norm ISO/ASTM 52902. Auf diese Norm wird in diesem Kapitel näher eingegangen. Sie beschäftigt sich ausschließlich mit der Anfertigung additiv gefertigter Testkörper und deren Bewertung für einen Rückschluss auf die geometrische Leistung eines additiven Fertigungsprozesses [46]. Die ISO/ASTM 52902 definiert dafür Testkörpergeometrien und deren Herstellung sowie Hinweise zur Messung. Aufgrund der allgemeinen, verfahrensunabhängigen Beschreibung werden jedoch keine quantitativen Angaben zu akzeptierten Maßtoleranzen gemacht. Diese müssen je nach Anwendung und Anspruch selbst definiert werden oder von zuständigen Zulassungsbehörden vorgeschrieben werden. Es sei darauf hingewiesen, dass sich diese Norm nicht mit einer mechanischen Bewertung des Fertigungsprozesses beschäftigt, sondern sich lediglich auf die Geometrie beschränkt.

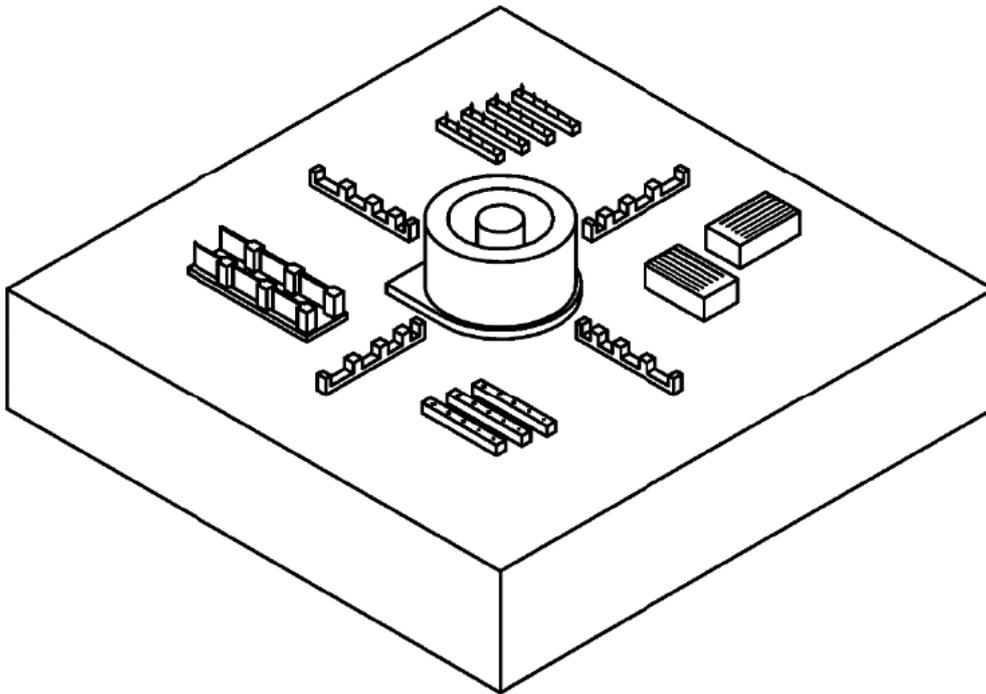
### 4.2.2.1 Testkörperherstellung

Für die Herstellung der Testkörper muss ein „Qualitäts-Ausgangswerkstoff“ verwendet werden, sodass reproduzierbare Ergebnisse ermöglicht werden. Sämtliche werkstoffüblichen Eigenschaften müssen vom Hersteller dokumentiert werden. Zusätzlich müsse insbesondere bei der Verwendung von pulverförmigen Halbzeugen auf das Mischverhältnis von neuem zu gebrauchtem Pulver geachtet werden. Diese müsse durch eine Werkstoffspezifikation begrenzt werden, sodass eine eindeutige Rückverfolgbarkeit des Ausgangsmaterials gewährleistet werden kann (siehe **Kapitel 4.2.1.1** und **Tabelle 4.4**). [46]

Die Anzahl der für die Leistungsbewertung verwendeten Testkörper wird laut Norm von zwei verschiedenen Aspekten bestimmt. Zum einen muss die statische Signifikanz gewährleistet werden können, was zu einer Mindestanzahl von 5 Testkörpern führt. Zum anderen sollte die Bauplattform komplett ausgenutzt werden, sodass mögliche lokale Leistungsschwankungen auf der Bauplattform erfasst werden können. Bei sehr großen Druckern, deren Bauplattform für den zu qualifizierenden Prozess vollständig genutzt wird, kann es demnach nötig sein, mehr als 5 Testkörper drucken zu müssen, um dies zu gewährleisten. Die Norm schreibt eine Ausnutzung der Fläche von mindestens 80% vor. [46]

Positionierung und Ausrichtung der Testkörper haben einen Einfluss auf das Druckergebnis. Daher ist es wichtig, diese Aspekte bei der Testkörperherstellung zu beachten. Es wird hier auf die ISO/ASTM 52921 verwiesen, die ausschließlich von der Positionierung und Ausrichtung im Bauplattformraum handelt [47].

Die Verwendung von Stützstrukturen bei der Testkörperherstellung sollte weitestgehend vermieden werden. Ist die nicht möglich, so sollten die Stützstrukturen die Messung nicht beeinflussen.



**Abbildung 4.5** Beispielhafte Testkonfiguration der Testkörper mit Ausrichtung und Positionierung im Raum nach ISO/ASTM 52902 [46]

Dies und auch die dadurch erforderliche Nachbearbeitung zum Entfernen der Stützstruktur müssen in der Prozessspezifikation angegeben werden. [46]

#### 4.2.2.2 Testkörpergeometrien

Der eigentliche Zweck der Norm ist die Definition von Testkörpergeometrien. Diese sollen hier nur kurz demonstriert werden, da für einen generischen Zulassungsprozess keine detaillierten geometrischen Testkörper benötigt werden. Es werden 7 verschiedene Testkörper definiert, wovon jeder einen bestimmten Aspekt der Leistung des Druckers testet. Für die Prüfung der Genauigkeit werden lineare und kreisförmige Testkörper definiert. Damit soll zum einen die Genauigkeit der Maschinenrichtungen geprüft werden. Die übrigen Testkörper sollen die Auflösung des Druckers bewerten. Dies geschieht mit Stiften, Löchern, Wandungen und Schlitzern. In **Abbildung 4.5** wird eine beispielhafte Testkonfiguration mit den 7 Testkörpern gezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei den linearen Testkörpern und Auflösungsschlitzern verschiedene Ausrichtungen verwendet wurden. Dies soll, wie zuvor erwähnt, eine Genauigkeit der Maschinenrichtung gewährleisten. [46]

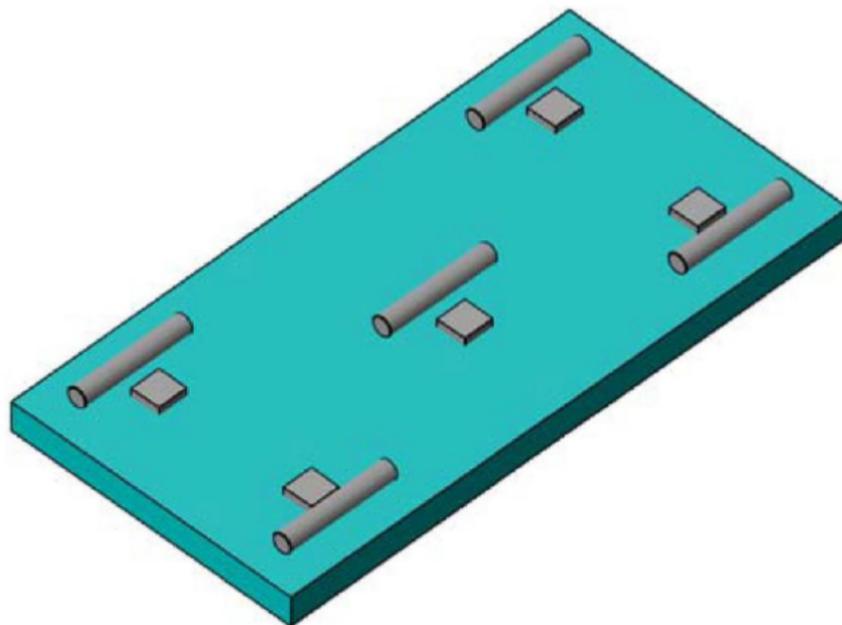
#### 4.2.3 ISO/ASTM 52904

Die ISO/ASTM 52904 ist das internationale Pendant zur nationalen DIN 17024 und legt ebenfalls Prozessanforderungen und Qualifizierungsaspekte für pulverbasierte Schmelzverfahren fest. Hier soll lediglich das Kapitel 7.3 der Norm behandelt werden, in dem es um die Maschinen-, Prozess-

und Bauteilqualifizierung geht, da hier viele neue Aspekte genannt werden und dies der Fokus dieser Arbeit ist. [48]

Zunächst legt die Norm fest, dass für die kombinierte Maschinen,- Prozess- und Bauteilqualifizierung eine Qualifizierungsfertigungsplan zur Herstellung der Probekörper erstellt werden muss. Dieser Produktionsplan beinhaltet die Definition und Dokumentation aller Prozessschritte inkl. Vor- und Nachbereitung sowie die verwendeten maschinenspezifischen Prozessparameter. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Produktionsplan alle Einstellungen und Tätigkeiten genauestens definiert und dokumentiert. Dieser ähnelt sehr dem von der DIN SPEC 17071 (**Kapitel 4.2.1**) vorgestellten qualitätssicherndem Prozess, weshalb dieser hier nicht weiter erläutert wird. Die in dem Produktionsplan verwendeten Parameter sind dann die Basis für alle kommenden Druckaufträge. Nur für diesen Parametersatz ist die Qualifikation gültig. [48]

Anders als die ISO/ASTM 52902 behandelt die ISO/ASTM 52904 auch Probekörper für die Bewertung nicht-geometrischer Eigenschaften. Es sollen mit gedruckten Proben Aussagen hinsichtlich „chemischer Zusammensetzung, Mikrostruktur, Porosität und mechanischen Eigenschaften“ getroffen werden. Die Probekörper müssen vom Hersteller an mindestens 5 verschiedenen Stellen der Bauplattform platziert und gefertigt werden (siehe **Abbildung 4.6**). Zusätzlich werden weitere in Z-Richtung ausgerichtete Probekörper empfohlen. In einigen Fällen verlangt die Bauteilgeometrie dynamisch veränderliche Prozessparameter während des Fertigungsvorgangs. Sofern diese Veränderung kritische Prozessparameter betrifft, müssen für jeden Druckauftrag Probekörper mitgedruckt werden. Für die Bewertung der mechanischen Eigenschaften dieser Probekörper wird auf die Norm ASTM F3122 verwiesen. [48]



**Abbildung 4.6** Beispiele für Rohlinge für den Zugversuch sowie zusätzliche Probekörper, die an fünf Stellen auf der Bauplattform platziert sind [48]

---

Geht es nach der ISO/ASTM 52602, reicht eine einmalige Prozessqualifizierung nicht aus. Das Qualifikationsverfahren muss mindestens alle sechs Monate wiederholt werden. Bei Auftreten der folgenden Fälle muss die Qualifizierung ebenfalls erneut durchgeführt werden: [48]

- Drucker oder Teilsystem wird an einen anderen Standort innerhalb oder außerhalb des bestehenden Fertigungszentrums befördert
- Neue Kalibrierung
- Reparaturen, die Maschinenbauteile betreffen
- Die Software, das Betriebssystem oder der Speicher wird in irgendeiner Form verändert
- Umrüstung der Maschine für eine andere Legierungsklasse

Der letzte wichtige Punkt, der bzgl. der Maschinen- und Prozessqualifizierung in der Norm erwähnt wird, ist die mögliche Berücksichtigung des Druckauftrags als Ganzes. Damit ist Platzierung mehrerer Bauteile auf der Bauplattform, die in einem einzigen Druckauftrag gefertigt werden, gemeint. Bisher wurde lediglich die Bauteilfertigung einzeln betrachtet. Im Falle mehrerer Bauteile pro Druck, kann eine zusätzliche Qualifizierung notwendig sein, da sich aufgrund zusätzlicher Schmelzprozesse die „thermische Vorgeschichte“ der Bauteile verändern könnte, was zu anderen Werkstoffeigenschaften führen könnte.

---

## 5 Praktizierte Zulassungsprozesse aus der Luftfahrtindustrie

Ein wichtiger Stützpfiler der Recherchearbeit sind Informationen aus erfolgreich durchgeführten Referenzprozessen der Luftfahrtindustrie. Neben den Zulassungsvorschriften sind diese für eine realitätsnahe Ausarbeitung eines generischen Zulassungsprozess essenziell. Anders als die Standardisierungen haben die praktizierten Zulassungsprozesse den Erfolg einer Bauteilzulassung unmittelbar unter Beweis gestellt. Aufgrund der geringen Informationsdichte seitens der Zulassungsbehörden bzgl. AM bekommt dieses Kapitel eine noch wichtigere Bedeutung. Für die Vorstellung im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Zulassungsprozesse ausgewählt, die allesamt viele öffentlich verfügbare Informationsquellen gemein haben.

### 5.1 General Electric

Der globale Großkonzern *General Electric* (GE) ist in vielen technischen Geschäftsfeldern vertreten. Dazu gehört auch die zivile Luftfahrtbranche, wo GE hauptsächlich für die Entwicklung von Triebwerken bekannt ist. Die Triebwerksentwicklung kann aufgrund vieler spezieller technischer und auch umweltbedingter Herausforderungen als eigene Branche angesehen werden. Angesichts dieser hohen Anforderungen mussten die Triebwerkshersteller schon immer technologisch ans Limit gehen, wobei bei Anwendungen in der zivilen Luftfahrt die finanziellen Aspekte nicht vernachlässigt werden dürfen. Um dies erreichen zu können, ist die Integration innovativer Technologien essenziell. Dadurch haben sich die Triebwerkshersteller zu Pionieren der Luftfahrtindustrie entwickelt, was innovative Technologien angeht, so auch bei der Involvierung der additiven Fertigung als vielversprechende neuartige Fertigungstechnologie. Die teilweise komplizierten Geometrien der Triebwerksbauteile machen die additive Fertigung zudem finanziell interessant, da die Fertigungskosten ab einem bestimmten Komplexitätsgrad geringer sind als bei herkömmlichen Fertigungstechnologien [49]. Deshalb macht es Sinn, schon vorhandene Erkenntnisse zur Zulassung additiv gefertigter Bauteile aus dem Triebwerksbereich zu extrahieren, um diese auf Flugzeugstrukturbauteile übertragen zu können.

#### 5.1.1 AM Bauteile

Das erste in einem GE-Triebwerk eingebaute und erste jemals von der FAA zugelassene, additiv gefertigte Triebwerksbauteil war 2015 ein Sensorgehäuse im Einlass des Hochdruckverdichters, genannt T25 (siehe **Abbildung 5.1**) [50]. Die darin verbauten Sensoren liefern Informationen wie Druck und Temperatur [50]. Das Gehäuse wurde per selektivem Lasersintern gefertigt [50] und

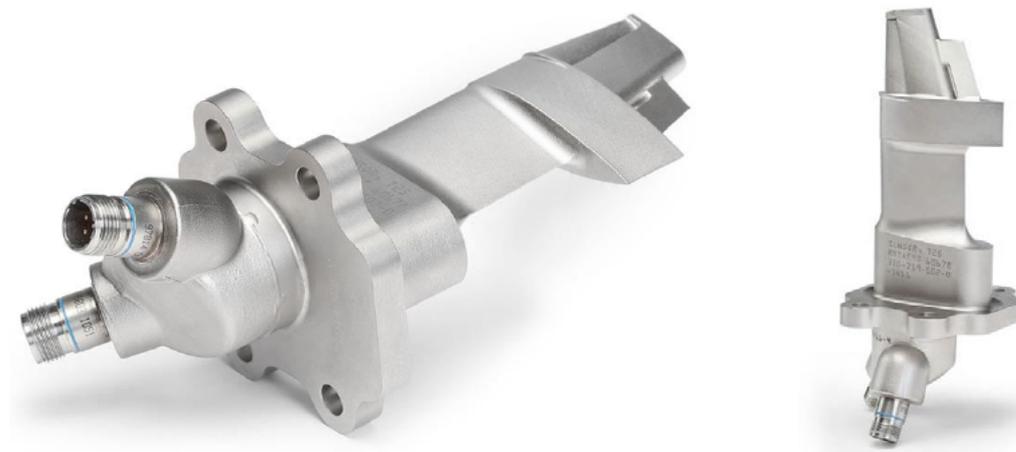


Abbildung 5.1 Additiv gefertigtes T25 Sensorgehäuse für das GE90 Triebwerk [50]

besteht aus einer Kobalt-Chrom-Legierung [51]. Eingebaut wurden das Sensorgehäuse als Retrofit in 400 *GE90-94B* Triebwerke [52], welche die *Boeing 777* antreiben. Des Weiteren kommen sie auch in der neuen Version *GE9X* zum Einsatz [51], die Triebwerke für die neue *Boeing 77X*.

Wenig später folgte dann die Zulassung des wohl bekanntesten und bisher erfolgreichsten additiv gefertigten Bauteils der zivilen Luftfahrt [53]: Die Kraftstoffdüsen Spitze für das *CFM LEAP (Leading Edge Aviation Propulsion)* Triebwerk (siehe **Abbildung 5.3**), welches sowohl beim *Airbus A320 NEO* als auch bei der *Boeing 737 MAX* eingesetzt wird [54]. Pro Triebwerk werden 19 von diesen Kraftstoffdüsen Spitzen verbaut [50]. Durch den Einsatz der additiven Fertigung konnte die vorher aus 20 Bauteilen bestehende Komponente auf nur ein einziges Bauteil reduziert werden [53]. Weiterhin wurden 25% Gewicht eingespart und es konnte eine fünf Mal höhere Lebensdauer erreicht werden [53]. Im Oktober 2018 verzeichnete GE die Herstellung der 30.000 Kraftstoffdüsen Spitze [2], was die Machbarkeit einer Serienproduktion additiv gefertigter Bauteile eindrucksvoll bestätigt. Identisch zum Sensorgehäuse wurde eine Kobalt-Chrom-Legierung in Verbindung mit selektivem Lasersintern verwendet [51].

Aufgrund des scheinbar großen Erfolgs dieser AM Anwendungen, baute GE für das bereits erwähnte *GE9X* die Verwendung von AM weiter aus (siehe **Abbildung 5.2**) [55]. Insgesamt kommen hier 7 additiv gefertigte Komponenten zum Einsatz, zu denen auch das gezeigte Sensorgehäuse und die Kraftstoffdüsen Spitze gehören, die für die neue Entwicklung übernommen wurden. Beim neuen Turboprop-Triebwerk (*GE Catalyst*) demonstriert GE einen großen Vorteil von AM, indem man 855 herkömmlich gefertigte Bauteile auf 12 additiv gefertigte Bauteile reduzierte. [55]



Abbildung 5.3 Kraftstoffdüsen Spitze des GE LEAP Triebwerks [57]

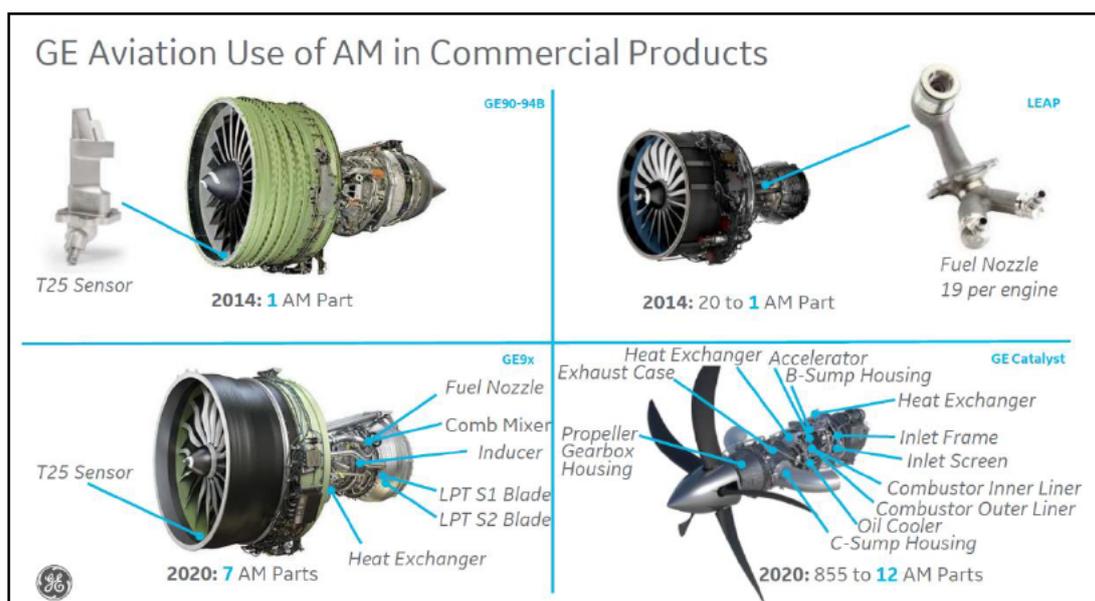


Abbildung 5.2 Additiv gefertigte Bauteile von GE in zivilen Triebwerken [55]

### 5.1.2 Identifikation von Problemen und kritischen Prozessparametern

Eine der größten Schwierigkeiten der Qualifizierung und Zulassung additiv gefertigter Bauteile ist zweifelsohne der nicht vorhandene Determinismus des Fertigungsprozesses. Kleine Änderungen des Ausgangszustands haben große Auswirkungen auf das Ergebnis. Daher ist es sehr wichtig, die Faktoren zu kennen, die einen großen Einfluss auf das fertige Bauteil haben. Diese werden als kritische Prozessparameter bezeichnet.

Im Rahmen der Beschreibung des Ausgangspunktes eines Qualifizierungsprozesses nennt CFM einige Faktoren, die mit „Materialunsicherheiten und Variationen“ betitelt werden: [56]

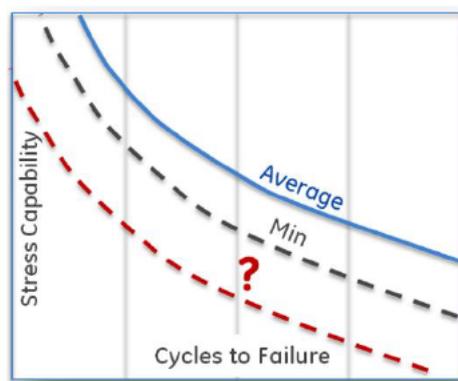
- Materialvariation zwischen und innerhalb von Maschinen
- Kontrolle von Rohmaterial
- Chemie, Größe, Verteilung
- Maschinenkontrolle
- Laserparameter, Kalibrierung, Umweltbedingungen
- Bauteilkontrolle
- Positionierung, Orientierung
- Thermische Bearbeitung
- Heiß-isostatisches-Pressen
- Leistungsindikatoren
- Oberflächenbeschaffenheit, Zugfestigkeit, Dauerfestigkeit, Ermüdung, Korngröße
- Herstellungs- und Betriebsumgebung
- Temperatur, Korrosion

Diese Unsicherheiten müssen mit qualitätssichernden Maßnahmen reduziert werden. Alle diese Unsicherheiten führen zu der in **Abbildung 5.4** rot eingezeichneten Kurve, bzw. ist die Lage der Kurve unbekannt. Die zulässigen Spannungen müssen alle Unsicherheiten und Variationen berücksichtigen und kleiner sein, um ein sicheres Bauteil gewährleisten zu können.

GE hat allein mehr als 100 Laser- und Maschinenparameter während der Entwicklung des Fertigungsprozesses identifiziert (siehe **Abbildung 5.6**), die für jeden zu qualifizierenden Prozess definiert werden müssen, weil sie dementsprechend einen Einfluss auf das Endergebnis haben und damit kritische Prozessparameter sind. Sicherlich sind hier einige Parameter kritischer (haben größeren Einfluss auf das Endergebnis) als andere.

### 5.1.3 Q&C Ansatz

Wie zuvor erwähnt, haben sowohl das Sensorgehäuse als auch die Kraftstoffdüsen Spitze eine FAA bzw. EASA Zulassung im Rahmen des jeweiligen TC des Triebwerks erhalten und fliegen in diesen um die Welt [53]. Die anderen Bauteile sind vermutlich zum jetzigen Zeitpunkt noch



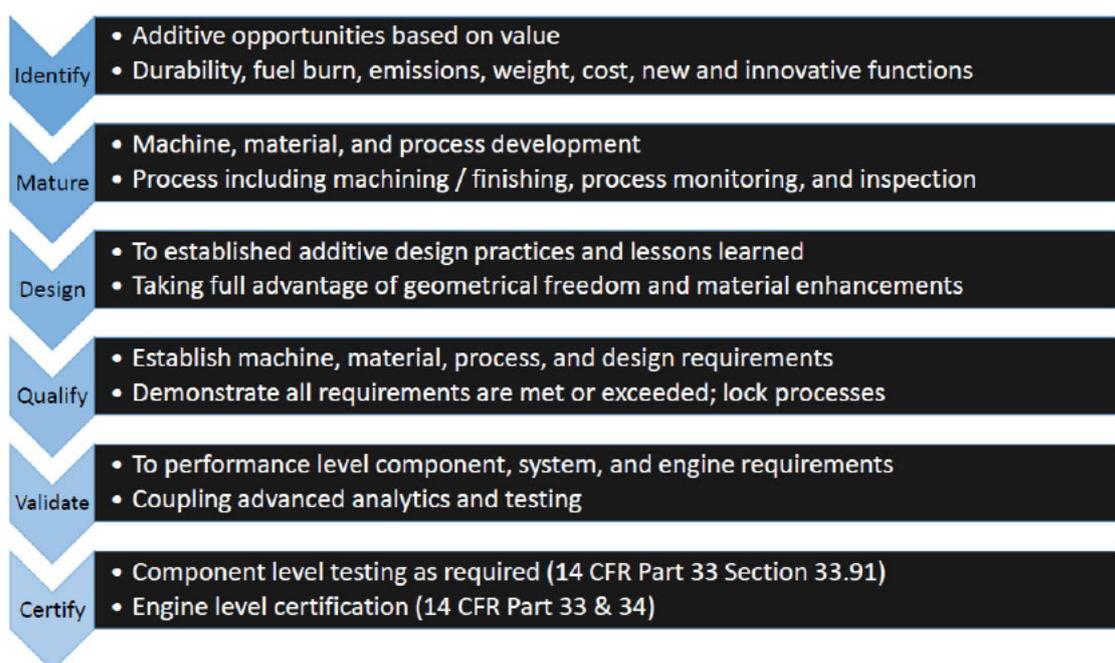
**Abbildung 5.4** Fertigungsbedingte Unsicherheiten bei den zulässigen Spannungen eines AM-Materials [56]

nicht zugelassen oder befinden sich momentan im Zulassungsprozess. Vorgestellt wurden die Bauteile jedoch, um deren praktizierten Zulassungsprozesse, mit dem die Zulassung erlangt wurde, zu erläutern. Dies gestaltet sich, wie schon öfter erwähnt, aufgrund wenig veröffentlichter Informationen schwierig. GE jedoch hat einige nützliche Informationen publiziert, die im Folgenden vorgestellt werden.

**Abbildung 5.5** zeigt die Roadmap eines additiv gefertigten Bauteils bei GE [53]. Die ersten drei Schritte dieses Ablaufs beschreiben hauptsächlich die Entwicklung und Ausreifung von Maschine und Materialien sowie die Konstruktion des Bauteils und sind für diese Arbeit nicht relevant. Lediglich die Ausreifung des Prozesses kann relevante Aspekte enthalten, da dies Einfluss auf die Qualifizierung haben kann. Wichtig sind die letzten drei Schritte, die in der Reihenfolge Qualifizierung, Validierung und Zertifizierung durchgeführt werden [53].

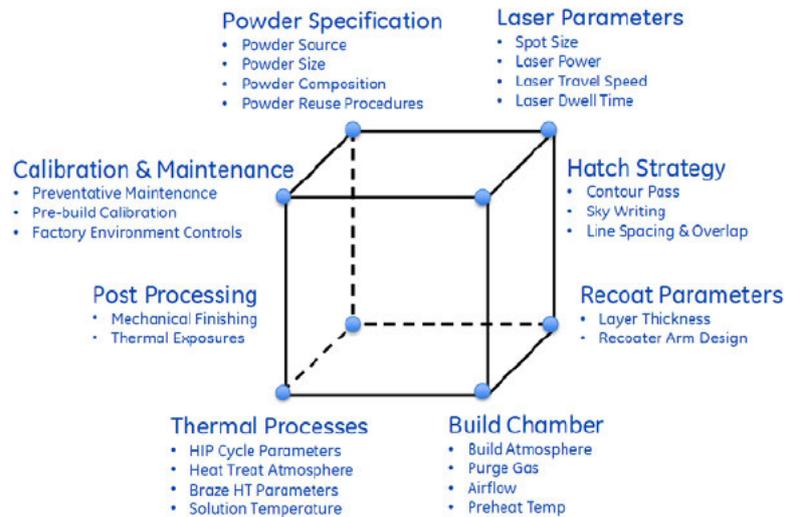
Vor der Qualifizierung findet im Schritt „Mature“ (eng.: ausreifen) die Definition der Maschinen-, Material- und Prozessanforderungen statt. Die Anforderungen folgen aus der Entwicklung von Maschine und Material und manifestieren sich in Parametern. Allein die Maschinenparameter, von denen eine Auswahl in **Abbildung 5.6** zu sehen ist, können sehr umfangreich sein. Dies wird in die Bauteilentwicklung miteinbezogen, welche wiederum selbst Anforderungen an die spätere Fertigung definiert. Alle diese Anforderungen müssen nun in der Qualifizierung etabliert werden. Dafür werden zunächst alle definierten Einstellungen (Parameter), beispielsweise der Maschine, eingerichtet. Im nächsten Schritt muss demonstriert werden, dass alle Anforderungen erfüllt werden. Ist dies der Fall, wird der Prozess anschließend „eingefroren“ und gilt als qualifizierter Prozess, jedoch nur in Kombination mit den in der Qualifizierung verwendeten Parametern. [53]

Wenn von einem qualifizierten Prozess gesprochen wird, so gilt dieser immer nur für eine ganz bestimmte Maschine (siehe **Abbildung 5.8**, links). Das bedeutet, wenn ein bereits qualifizierter



**Abbildung 5.5** Ablaufplan von der Idee zur Zertifizierung eines additiv gefertigten Bauteils bei GE [53]

## Additive Manufacturing development process 100+ Laser & Machine Parameters



**Abbildung 5.6** Entwicklung des additiven Fertigungsprozesses bei GE mit über 100 Laser- und Maschinenparametern [57]

Prozess als Kombination aus Maschinen- und Materialqualifizierung, auf eine baugleiche Maschine (Drucker) angewendet wird, so muss die Qualifizierung erneut stattfinden. [57]

Die Validierung der Qualifizierung erfolgt unter anderem durch Qualitätskontrollen an Probekörpern. Die Qualitätskontrolle wird in Form von Inspektionen durchgeführt, die in DT und NDT aufgeteilt wird (siehe **Abbildung 5.7**). Auf der einen Seite wird bei der zerstörungsfreien Prüfung nochmal in verschiedenste Scan-Tests sowie in bauteilspezifische Funktionstests unterschieden. Mit den Scan-Tests werden zum einen die Maßhaltigkeit der Proben oder Bauteile mithilfe einer Koordinatenmessmaschine (engl. *Coordinate Measuring Machine*, CMM) überprüft. Zum anderen wird Computertomographie (CT) für Untersuchungen zu Materialdefekten eingesetzt. Die Funktionstests sind für eine Qualifizierung und Zertifizierung der Behörde zwar sehr wichtig, werden hier jedoch aufgrund der bauteilspezifischen Anforderungen nicht genauer ausgeführt. Auf der anderen Seite gibt es die zerstörenden Prüfungen, die eine Unterscheidung in Tests an Proben und Bauteil voraussetzt. Die zerstörungsfreie kommt bei der reinen Bauteilfertigung auch ohne Probekörper aus, wohingegen nicht jedes gedruckte Bauteil für eine Prüfung zerstört werden kann, was Probekörper unvermeidbar werden lässt. Ein Bauteil wird bei GE zerstörend geprüft, indem Querschnitte herausgeschnitten werden. Die Probekörper hingegen werden umfangreichen Materialtests unterzogen. Dazu zählen zusätzlich auch Untersuchungen hinsichtlich der Korngröße, Porosität, Oberflächenbeschaffenheit und Nachbearbeitung. [53]

Aus weiteren Quellen geht eine etwas genauere Beschreibung der Untersuchungen an den Probekörper hervor (siehe **Abbildung 5.8**, Mitte). Danach wird jeder Druckauftrag in der Fertigung mit zusätzlichen Probekörpern versehen, die die Bauteilhöhe (Z-Richtung) durch die Positionierung im Bauraum komplett abdeckt, um so auch Aussagen über diese Bereiche treffen zu können. Es werden Probekörper für Zugversuche, Untersuchungen hinsichtlich des Gefüges und Dauerfestigkeitstests gedruckt. Darüber hinaus werden bei jedem neuen Druckauftrag weitere Probekörper gefertigt, die für potenzielle zukünftige Tests aufbewahrt werden. Diese Proben können später



Abbildung 5.8 Informationen über die Fertigung bei GE [57]

Validate Inspection and Quality Touch Points

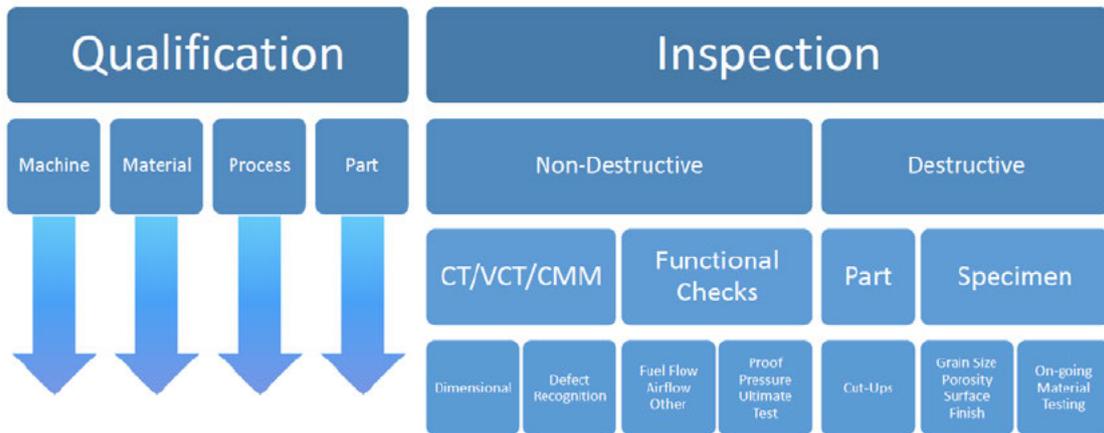


Abbildung 5.7 Berührungspunkte von Qualifizierung und Inspektion bei GE [53]

einem bestimmten Druckauftrag zugeordnet werden und erlauben so auch lange Zeit nach dem Fertigungsprozess noch Rückschlüsse auf das Material und die Geometrie. [57, 58]

Wie schon erläutert, wird die Maßhaltigkeit mit zerstörungsfreier Prüfung überprüft [53]. Zusätzlich werden die Querschnitte der zerstörend geprüften Probebauteile einer Dimensionsüberprüfung unterzogen [53, 57]. Die daraus ermittelten Werte werden daraufhin statistisch ausgewertet (siehe **Abbildung 5.8**, rechts). Die gestrichelten Linien rechts und links im Diagramm stellen die obere bzw. untere Spezifikationsgrenze dar. Je enger der Bereich zwischen den Linien ist, desto kleiner sind die Maßtoleranzen und desto höher sind damit die Anforderungen.

Als letzten Schritt zum Weg zur Zulassung nennt GE die Zertifizierung (siehe **Abbildung 5.5**). Hier soll das Bauteil bzw. die Komponente ganzheitlich Tests unterzogen werden. Daraufhin folgt der obligatorische Test im eingebauten Zustand auf Triebwerkebene, in welchem Kontext das Bauteil auch seine Zulassung erhält. [53]

GE erwähnt, dass sie den in der Luftfahrtindustrie üblichen Zulassungsprozess befolgen [55]. Damit ist der *Aerospace Industries Association* (AIA) Zulassungsprozess [59] gemeint, welcher im Kapitel 5.1.3 behandelt wird.

## 5.2 Aerospace Industries Association

Die *Aerospace Industries Association* (AIA) ist ein seit 1917 bestehender US-amerikanischer Zusammenschluss von mehr als 300 Unternehmen aus der Luft- und Raumfahrtindustrie. Die Vereinigung hat das Ziel, die nationale (USA) Wirtschaft und Sicherheit im Luft- und Raumfahrtsektor nachhaltig zu stärken. Dies geschieht durch Vertreten politischer Interessen, was die Bereitstellung staatlicher Fördergelder für eine Beschleunigung bei der Einführung neuer Innovationen initiieren soll. [60]

2015 formierte die AIA eine Arbeitsgruppe mit dem Ziel der Entwicklung von Anleitungen für die Konstruktion, Herstellung und Zertifizierung von additiv zu fertigenden Bauteilen. Auf Initiative der FAA wurde im Januar 2020 ein Leitfaden für die Zertifizierung von AM-Bauteilen veröffentlicht. In diesem Dokument wird sich auf die Verfahren Powder Bed Fusion (PBF) und Directed Energy Depositon (DED) fokussiert. Die darin erläuterten Prozesse basieren auf Erfahrungen und aktuellen Erkenntnisse sowie besten Praktiken aus der Industrie. Zusammenfassend beschreibt dieses Dokument die wichtigsten Aktivitäten für *Design Approval Holder* (DAH) zum Erlangen einer FAA Zulassung. [59]

Der Leitfaden stellt zunächst klar, dass die AIA, entgegen einiger anderer Meinungen, trotz der vielen neuen Herausforderungen, die die additive Fertigung mit sich bringt, auf von herkömmlichen Fertigungstechnologien bekannte Qualifizierungsprozesse und Methoden setzt. Nichtsdestotrotz muss dies unter Berücksichtigung der AM-spezifischen Faktoren geschehen. [59]

Im Allgemeinen unterscheidet die AIA fünf verschiedene Phasen (siehe

), die nicht zwingenderweise hintereinander ablaufen müssen. Sie können sich also überschneiden. Alle diese Phasen sind entweder in Entwicklung, Qualifizierung oder Validierung einzuordnen. Zur Entwicklung gehören die Material-, Prozess- und Bauteilentwicklung. Zur Qualifizierung gehören dieselben Bereiche, wobei zusätzlich noch die Qualifizierung der Lieferkette hinzukommt. Lediglich die Qualitätskontrollen sind bei der Validierung einzuordnen. [59]

Im Entwicklungsprozess finden zunächst die Aktivitäten statt, die für die reine Inbetriebnahme der Maschine notwendig sind. Die Maschine muss für die Entwicklung der Spezifikationen ersten Kontrollen und Maßnahmen unterzogen werden, die einen relativ kontrollierten Fertigungsprozess gewährleisten. Dies ist noch nicht die Maschinenqualifizierung, sondern lediglich die Vorbereitung darauf, denn für die Qualifizierung werden die zu verifizierenden Spezifikationen

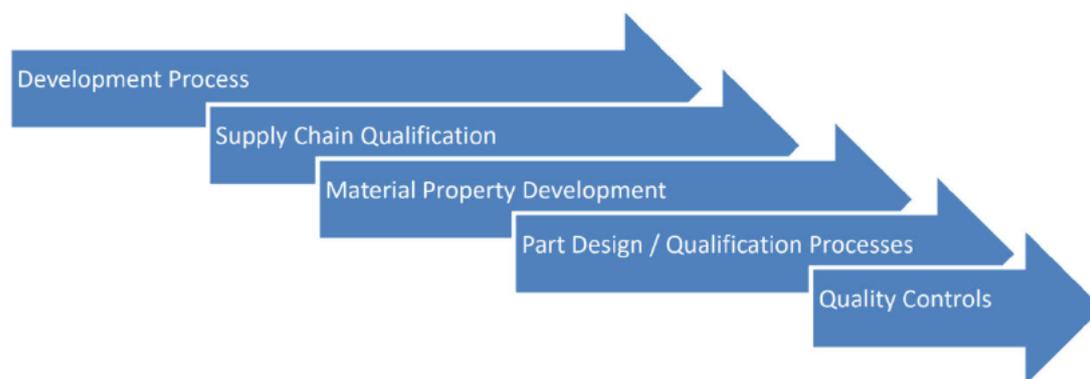


Abbildung 5.9 Entwicklungs- und Qualifizierungsschritte der additiven Fertigung nach AIA [59]

benötigt. Hier finden unter anderem auch die Identifikation kritischer Prozessparameter statt. Dieser Schritt wird nicht weiter erläutert, da es hier in erster Linie um die Verifizierung und Validierung gehen soll. [59]

### 5.2.1 Material,- Maschinen- und Prozessqualifizierung

Aufbauend auf den in der Entwicklung definierten Material,- Maschinen,- Bauteil- und Prozessspezifikationen (*Development Process*), die nach der Entwicklung „eingefroren“ und dokumentiert werden, wird die Qualifizierung durchgeführt. Diese wird aufgeteilt in die Schritte *Supply chain qualification* und *Part Design / Qualification Process*. Der Schritt *Material Property Development* (siehe **Kapitel 5.2.2**) liegt dazwischen, weil die bauteilspezifischen Materialkennwerte für die Bauteilqualifizierung benötigt werden. Es sei außerdem erwähnt, dass die Material- und Maschinenqualifizierung nicht immer getrennt werden können, da es sich bei der additiven Fertigung um ein generatives Fertigungsverfahren handelt. Diese Wechselwirkung wird in der Prozessqualifizierung berücksichtigt. [59]

Bei der Materialqualifizierung muss in bauteilspezifische und bauteilunspezifische Qualifizierung unterschieden werden. Alternativ kann gleichbedeutend auch zwischen Qualitäts- und Quantitätsbewertung unterschieden werden. Die bauteilunspezifische Qualifizierung ist eine Qualitätsbewertung des Materials. Ein Maß dafür ist die Konformität mit den Spezifikationen und die Reproduzierbarkeit bzw. die Variabilität des Prozesses. Hierbei kann wiederum weiter zwischen der Qualifizierung des Ausgangsmaterials und des gefertigten Materials unterschieden werden. Bei der qualitativen Beurteilung des gefertigten Materials kann keine isolierte Materialqualifikation durchgeführt werden, da die verwendete Maschine ebenfalls Einfluss nimmt. Lediglich die qualitative Bewertung des Ausgangswerksstoff kann demzufolge isoliert betrachtet werden. Die bauteilspezifische Materialqualifizierung ist Teil der Bauteilqualifizierung (siehe **Kapitel 5.2.3**) und benötigt die Ermittlung von Werkstoffkennwerten für eine quantitative Bewertung (siehe **Kapitel 5.2.2**). In diesem Kapitel wird daher nur die Ausgangsmaterialqualifizierung erläutert.

Die Ausgangsmaterialien müssen immer rückverfolgbar sein, was eine genaueste Dokumentation voraussetzt. Im Falle von Mischchargen oder Wiederverwendung von Pulver muss demnach die Historie aufgezeichnet werden. Zudem sollte bei einer Wiederverwendung von Pulver ab einem

gewissen Mischverhältnis eine erneute Überprüfung der Spezifikationen durchgeführt werden. Die Wiederverwendung muss für jeden Prozess hinsichtlich der Auswirkungen auf Materialperformance, Maßhaltigkeit und Funktion qualifiziert werden. Um nicht gewollte Wiederverwendung durch Vermischung von Pulverchargen zu vermeiden, sollte bei der Handhabung auf dementsprechende Maßnahmen geachtet werden. Bei der Kontrolle des Pulvers sollten mindestens die folgenden Eigenschaften untersucht werden: [59]

- Partikelgrößen
- Partikelverteilung
- Morphologie
- Chemische Zusammensetzung
- Reinheit
- Fließverhalten
- Streufähigkeit
- Klopff- und Schüttdichte

Die Maschinenqualifizierung wird nach AIA in Installations- und Betriebsqualifikation unterschieden. Die Installationsqualifizierung soll zusammenfassend sicherstellen, dass die Maschine (Drucker) entsprechend den Herstellervorgaben und den Fertigungsspezifikationen installiert wurde. Darunter fallen unter anderem Aufbau, Kalibrierung und ein vom Maschinenhersteller definierter Testdruck. Die Betriebsqualifizierung wird fertigungsbegleitend durchgeführt und dient dem Erhalt einer stabilen Materialperformance. Die Betriebsqualifizierung geschieht nach einer erfolgten Qualifizierung und kann auch als Qualitätssicherung bezeichnet werden. Es beinhaltet wiederholende Kalibrierung, präventive Wartung und die Durchführung von Tests zur Validierung der spezifizierten „metallurgischen, mechanischen und physikalischen Eigenschaften“. Diese Tests sollen an Probekörpern durchgeführt werden. Diese werden während der Fertigung mitgedruckt und sollen zusätzlich auch für Untersuchungen zur Maßhaltigkeit und Oberflächenrauheit verwendet werden. [59]

Die zum Schluss erfolgende Prozessqualifizierung (*Process Performance Qualification*) ist eine Kombination aus der Material- und Maschinenqualifizierung sowie der Nachbehandlung und berücksichtigt deren Wechselwirkung. Die Prozessqualifizierung sieht eine statistische Auswertung der Ergebnisse aus Tests mehrerer verschiedener Bauteile vor. Ist die Prozessqualifizierung erfolgt, werden alle Prozessparameter dementsprechend festgesetzt und „eingefroren“. Wird nur eines dieser Prozessparameter verändert, muss eine Requalifizierung erfolgen. Für den Fall, dass mehrere Maschinen für denselben Prozess qualifiziert werden sollen, müssen alle Maschinen die gesamte Prozessqualifizierung durchlaufen. Es muss zusätzlich nachgewiesen werden, dass die Maschinen dieselben Ergebnisse produzieren. Hier kann der Qualifizierungsaufwand durch die Verwendung eines Nullhypothesentests reduziert werden. [59]

## 5.2.2 Ermittlung der Materialeigenschaften

In Kapitel 5.2.1 wurde bereits die bauteilunspezifische Materialqualifikation thematisiert. Hier soll es um die Ermittlung der Werkstoffdaten für die bauteilspezifische Materialqualifikation

gehen. Im Allgemeinen sollen hier quantitative Materialkennwerte ermittelt werden, die für eine spätere Bauteilqualifizierung benötigt werden. Dieser Schritt muss vor der Finalisierung der Bauteilentwicklung stattfinden. Beispielsweise ist die Ermittlung der maximalen zulässigen Spannungen wichtig, damit der Konstrukteur und die Berechnungsabteilung bei der Entwicklung des Bauteils auf Werkstoffkennwerte für eine adäquate Dimensionierung und Evaluierung der Konstruktion zurückgreifen können. Aber auch die Auswahl eines passenden Werkstoffs aus einer künftigen Materialdatenbank (Werkstoffhandbuch) wird dadurch ermöglicht. Die AIA unterscheidet ebenfalls zwischen *Material Allowables* und *Design Values*. [59]

Die *Material Allowables* werden aus einer Reihe von Tests mit anschließender statistischer Auswertung ermittelt (siehe **Abbildung 5.10**). Es können nicht einfach die durchschnittlichen Materialkennwerte verwendet werden, sondern müssen mit einem gewissen Signifikanzwert statistisch bereinigt werden, um den natürlichen Schwankungen Rechnung zu tragen. Das kann man in **Abbildung 5.10** daran erkennen, dass die in dem Fall zulässigen Spannungen geringer sind als die durchschnittlichen Spannungen. Diese Vorgehensweise ist in der Luftfahrtpraxis gängig und wird für die additive Fertigung einfach übernommen. Bei herkömmlichen Fertigungstechnologien und Materialien können hierfür einfach Werte aus Werkstoffhandbüchern genommen werden (siehe Kapitel 2.4). Bei der additiven Fertigung hingegen müssen diese zum jetzigen Zeitpunkt in den meisten Fällen noch eigenständig entwickelt werden. Bei den Tests zur Ermittlung dieser Werte sollten unter anderem die folgenden Ursachen für Variationen berücksichtigt werden: [59]

- Ausgangsmaterial von Charge zu Charge
- Druckauftrag zu Druckauftrag
- Drucker zu Drucker,
- Charge der Wärmebehandlung
- Auswirkung der thermischen Unterschiede verschiedener Druckaufträge (Anzahl und Positionierung der Bauteile im Bauraum) auf das Gefüge
- Prozessabweichungen der wichtigen Prozessparameter bei Erreichen der Toleranzgrenze

Die AIA schlägt die Anfertigung einer Testmatrix vor, die zum einen alle möglichen Variationsursachen beinhaltet, aber auch die gegenseitige Beeinflussung dieser berücksichtigt. [59]

Für die Durchführung der Tests und die darin enthaltende Berücksichtigung der Variationsursachen wird eine Strategie empfohlen, die folgende Punkte beinhalten sollte: [59]

- Berücksichtigung der Variation von Ausgangsmaterial und Prozess durch eine angemessene Anzahl an Proben aus verschiedenen Materialchargen und Druckaufträgen.
- Entwicklung von Experimenten, die die Effekte der Prozessparameter für ein akzeptiertes Toleranzband abbilden
- Ermittlung der Richtungsabhängigkeit von Materialeigenschaften mit mehreren Probestücken, die unterschiedlich im Bauraum ausgerichtet sind. Daraus folgt entweder die Angabe isotroper oder anisotroper (richtungsabhängiger) Materialkennwerte.

Nachdem die reinen Materialkennwerte ermittelt und statistisch bereinigt wurden, könnten diese für eine Bauteilentwicklung und die dazugehörige Analyse (z.B. FEM) verwendet werden. Allerdings kann es durch bauteilspezifische Geometrie zu lokalen fertigungsbedingten Materialabschwächungen kommen. Dies würde bedeuten, dass es trotz der vorher durchgeführten Ermittlung

der zulässigen Materialspannung, früher zu Materialversagen kommen kann. Diese Faktoren müssen unbedingt berücksichtigt werden. Die AIA hat hierfür die *Design Values* eingeführt, die sich von den zulässigen Materialkennwerten durch einen Skalierungsfaktor unterscheiden. [59]

Die Ermittlung der *Design Values* erfolgt ebenfalls durch Tests. Anders als bei den *Material Allowables* müssen die Tests für die Ermittlung der Auslegungswerte am Bauteil oder an ausgewählten, isolierten Bereichen der Bauteile stattfinden. Es werden im Folgenden einige mögliche geometrische Merkmale von Bauteilen genannt, die einen Einfluss auf die Abweichungen von zulässigen Materialkennwerten und Auslegungswerten haben können und somit in Tests genaueren Untersuchungen unterzogen werden sollten: [59]

- Dünnwandige Bereiche
- Komplexe Geometrie
- Löcher, Überhänge und Bridging
- Wenn die Substratplatte zum fertigen Bauteil gehört und eine andere Wärmebehandlung bekommen hat als die in die qualifizierte Nachbehandlung
- Die Flächen und Bereiche des fertigen Bauteils die bei der Fertigung Kontakt mit der Substratplatte hatten
- Schnittpunkte von Stegen
- Flächen zwischen Bauteil und Stützstruktur, da es hier zu Veränderungen im Gefüge oder lokalen Spannungsspitzen kommen kann

Es wird zudem betont, dass die zulässigen Materialkennwerte und Auslegungswerte nur für die bestimmte, qualifizierte Prozesskombination und deren Parameter bzw. für das bestimmte Bauteil gültig sind. Für den Fall, dass Materialdaten nicht nur für ein Bauteil, sondern eine für eine Bauteilfamilie ermittelt werden sollen, ist dies nur möglich, wenn alle kritischen geometrischen Merkmale der Bauteilfamilie untersucht werden sowie allgemein gleiche Voraussetzungen und Spezifikationen für alle Bauteile der Bauteilfamilie gelten. [59]

Wurden alle diese kritischen geometrischen Merkmale eines Bauteils beispielsweise mechanischen Tests unterzogen, kann ein bauteilspezifischer und fertigungsbedingter Skalierungsfaktor für die Auslegungswerte bestimmt werden. Der Auslegungswert ist hier dann die maximale Spannung, für die das Bauteil dimensioniert wird (siehe **Abbildung 5.10**). Der Skalierungsfaktor kann als zusätzlicher, zu den in der Luftfahrt vorgeschriebenen, fertigungsbedingter Sicherheitsfaktor angesehen werden.

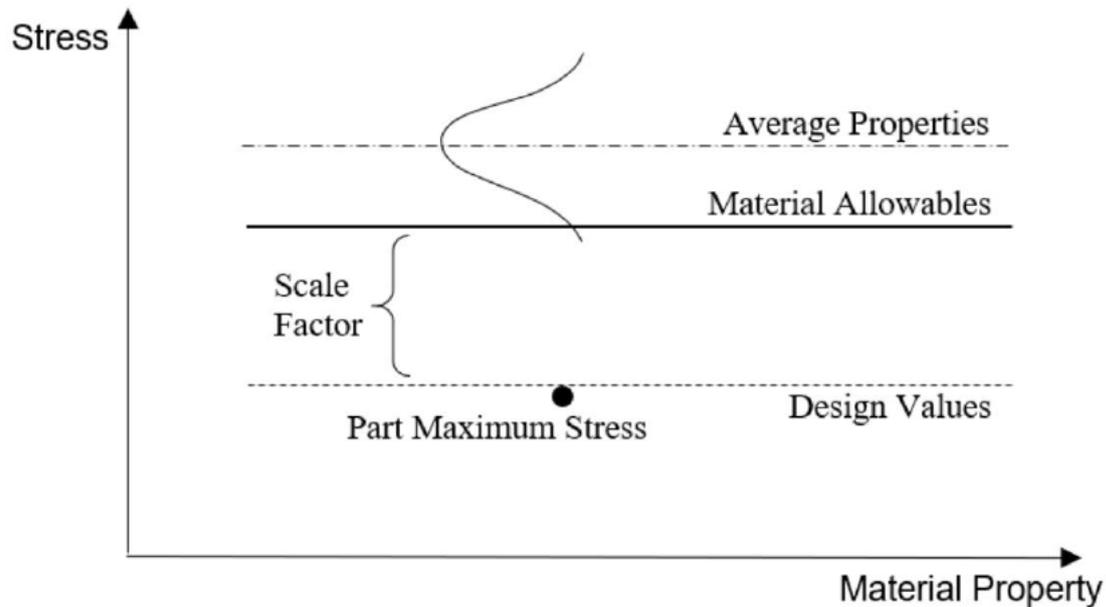


Abbildung 5.10 Unterschied zwischen den maximal zulässigen Spannungen und den Auslegungswerten [59]

### 5.2.3 Bauteilqualifizierung

Die für die Bauteilentwicklung ermittelten *Design Values* (siehe Kapitel 5.2.2) müssen zunächst qualifiziert werden. Die Materialdaten haben nur die Quantität aber nicht die Qualität bestimmt. Hierbei geht es wiederholt um die Verifizierung der Reproduzierbarkeit und Konformität. Obwohl Entwicklung und Qualifizierung dieser Werte verschiedene Prozesse sind, können sie aufgrund der Ähnlichkeit parallel ablaufen. [59]

Als letzten Schritt vor der Fertigungsfreigabe muss das Bauteildesign qualifiziert werden. Hierfür kann bei vorhandenen verifizierten Materialdaten sowie qualifizierter Software die Finite Elemente Methode (FEM) angewandt werden. Hierfür müssen alle nicht von der FEM erfassten Faktoren, wie Änderung der Umgebungsbedingungen, Kornwachstum und Temperatur in den Skalierungsfaktoren (bzw. Auslegungswerten) berücksichtigt werden. [59]

Abschließend muss das Bauteil in der Fertigung einer sogenannten Systemqualifizierung unterzogen werden. Diese soll sicherstellen, dass das Bauteil die vorgesehene Funktion im Einbau über die gesamte Lebensdauer erfüllt. Dafür sind Tests im eingebauten Zustand durchzuführen. Es müssen Wechselwirkungen sämtlicher Art mit der Einbauumgebung untersucht werden. Das Bauteil muss im Gesamtprodukt Flugzeug einwandfrei funktionieren. Wird ein zuvor durch herkömmliche Fertigungstechnologie hergestelltes Bauteil durch Reverse-Engineering additiv gefertigt, so muss auch die Systemqualifizierung zum Teil oder komplett neu durchgeführt werden. Ein letzter wichtiger Punkt der Systemqualifizierung ist die Fehleranalyse. Dabei ist der Fertigungsprozess unabhängig davon, wie systemkritisch ein Bauteil ist, da dies nur von Geometrie und Systemintegration abhängt. Allerdings muss bei additiv zu fertigenden Bauteilen die Systemintegration in der Entwicklung und Qualifizierung berücksichtigt werden. [59]

### 5.2.4 Qualitätskontrollen

„Der Ansatz für Qualitätskontrollen basiert auf der absolvierten Prozessqualifizierung und der finalisierten Fertigungsconfiguration inklusive aller Bauteile, Stützstrukturen und separat gefertigte Probekörper.“ [59]

Demnach ist der von der AIA als Qualitätskontrolle definierte Prozess als fertigungsbegleitende Validierung zu sehen und erhält die Qualifizierung aufrecht. Bevor der sogenannte *Quality Plan* aufgestellt werden kann, müssen laut AIA Qualitätskontrollen am Produktionsprozess etabliert werden. Diese überwachen alle Prozessparameter und stellen im Allgemeinen sicher, dass die Prozessqualifizierung erhalten bleibt. Dies wird üblicherweise durch eine statistische Prozesskontrolle gewährleistet. Zusätzlich muss eine prozessbasierte Fehleranalyse durchgeführt werden, die Ursachen und Auswirkungen von möglichen Fehlerquellen beschreibt. [59]

Der *Quality Plan* legt qualitätssichernde Maßnahmen und durchzuführende Tests fest, die an jedem Bauteil durchgeführt werden müssen. Damit wird die Konformität zur Qualifizierung gezeigt. Dies beinhaltet zunächst die genaue Beschreibung des Fertigungsprozesses, wozu folgende Punkte gehören: [59]

- Ausrichtung im Bauraum
- Positionierung der Bauteil(e) im Bauraum
- Information zu den Probekörpern (Geometrie, Positionierung, Anzahl)
- Plan zur Inspektion der Maßhaltigkeit
- Plan für den Funktionstests
- Plan für DT und NDT
  
- Definition der herausgeschnittenen Querschnitte und die Häufigkeit der Stichproben
- Statistische Prozesskontrolle der wichtigsten Prozesscharakteristiken (Dichte, Zugfestigkeit, Korngröße, chemische Zusammensetzung)

**Tabelle 5.1** Inspektionen zur Qualitätssicherungen nach AIA

Inspektion	Material	Dimension
Eigenschaften	<u>Materialanomalien:</u> Porosität als Einschluss kleiner Gasblasen, Einschlüsse chemisch abweichender Teilchen, unvollständiges Aufschmelzen, Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächenrauheit	Alle physisch messbaren Dimensionen
Testmethoden	<u>NDT:</u> Röntgen, Eindringprüfung, Computertomographie	<u>NDT:</u> CT, CMM, Streifenlichtscanning, Laserscanning der Oberfläche, Funktionstests, Messung der Oberflächenrauheit  <u>DT:</u> Herausgeschnittene Querschnitte

Ist ein Bauteil nicht konform, so muss diesem unverzüglich dieser Status verliehen werden und dokumentiert werden. Im Anschluss ist eine Auswertung der Bauteil- und Prozesshistorie durchzuführen. Damit sollen die Prozessparameter identifiziert werden, die zu dem nonkonformen Bauteil geführt haben. Die daraus entsprechend folgenden Korrekturmaßnahmen zur Wiederherstellung des qualifizierten Zustands sind zu ergreifen. Es ist möglich, den Prozess solange als nicht qualifiziert zu betiteln, bis die Korrekturmaßnahmen durchgeführt wurden. Bei größeren Fehlern und benötigten umfangreicheren Maßnahmen kann eine Requalifizierung initiiert werden. [59]

Des Weiteren geht die AIA bei der Qualitätskontrolle genauer auf die Durchführung der Inspektionen ein. Die Inspektion wird in Material-, Dimensions- und Funktionsinspektionen aufgeteilt [59]. Die dabei stattfindenden Untersuchungen und die Methoden sind in **Tabelle 5.1** zusammengefasst. Inspektionen hinsichtlich der Funktion wurden vernachlässigt, da es sich hierbei um bauteilspezifische Tests handelt.

### 5.3 NCAMP / Stratasys

Der NCAMP-Prozess ist eine standardisierte Arbeitseinweisung zur Ermittlung von Daten und Materialkennwerten für die Zulassung von Verbundwerkstoffen in der Luftfahrt [61]. Im Allgemeinen soll diese eine Anleitung zur Erstellung von Material- und Prozessspezifikationen sein [61]. Der NCAMP-Prozess wurde im Laufe der Jahre stetig weiterentwickelt und bildet heute mit der Veröffentlichung der mit diesem Prozess gewonnenen Daten im CMH-17 heute ein Standardwerk in der Faserverbundtechnologie. Die FAA und EASA haben die Akzeptanz des NCAMP-Prozesses in Memoranda schriftlich festgehalten [62, 63]. Doch nicht nur Materialien für Verbundwerkstoffe können so zugelassen werden, denn der NCAMP-Prozess wurde ebenfalls für die Zulassung des ersten polymeren AM-Material, in Verbindung mit einem bestimmtem Herstellungsprozess, herangezogen [64].

#### 5.3.1 NCAMP-Prozess

Im Jahr 1995 startete die *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) ein Programm zur Entwicklung eines Prozesses für die Ermittlung von Materialkennwerten von Verbundwerkstoffen. Das sogenannte *Advanced General Aviation Transport Experiment* (AGATE) Programm wurde in Zusammenarbeit mit der FAA und dem Werkstoffhandbuch MIL-HDBK-17 (heute CMH-17) durchgeführt. Die bis zu diesem Zeitpunkt in dem MIL-HDBK-17 veröffentlichten Informationen wurden für eine Zulassung von Verbundwerkstoffen nicht anerkannt. Das Ziel war es demnach, die damalige Lücke an öffentlich verfügbaren und standardisierten Materialkennwerten und Prozessen für Verbundwerkstoffe zu schließen, um somit den Zulassungsaufwand für die Flugzeugbauer und Behörden zu verringern. [61]

Der anfänglich nur für die allgemeine Luftfahrt (*small aeroplanes*) als Nachweisführung anerkannte AGATE-Prozess erfreute sich großer Beliebtheit in der Luftfahrtindustrie. Aus diesem Grund etablierte die NASA im Jahr 2005 das *National Center of Advanced Materials Performance* (NCAMP), als Teil des *National Institute of Aviation Research* (NIAR) an der Wichita State University in Kansas. NCAMP wurde zusammen mit dem CMH-17 damit beauftragt, den

**Tabelle 5.2** Übersicht der Dokumente des NCAMP-Prozesses und den Material- und Prozessspezifikationen für *Certified ULTEM 9085 Resin* und *Fortus 900mc* [65]

NSP 100 NCAMP Standard Operating Procedure	Standardisierte Vorgehensweise des NCAMP bei der Material- und Prozessqualifizierung und Ermittlung der Materialkennwerte
ULTEM 9085 NCAMP Process Specification	Spezifiziert die Methoden zur Fertigung der Prüflinge und legt alle Prozessparameter fest.
ULTEM 9085 NCAMP Material Base Specification	Definiert die Spezifikationen des Ausgangsmaterials
ULTEM 9085 Material Slash Specification	Definiert die Spezifikationen des Filaments
Material Property Data Report	Materialdatenbank mit allen Kennwerten
Statistical Analysis Report	Gibt Auskunft über die bei der Ermittlung der Materialdaten verwendeten statistischen Methoden

AGATE Prozess zu verbessern, um somit eine behördliche Anerkennung für alle Bereiche der Luftfahrtindustrie zu erreichen. Bis zum Jahr 2008 wurde der AGATE Prozess in über 50 Materialqualifikationen verwendet und hat sich somit zum Luftfahrtstandard für die Erstellung von öffentlich zugänglichen Materialkennwerten für Verbundwerkstoffe entwickelt. Die mithilfe des AGATE-Prozesses ermittelten Materialkennwerte wurden allesamt in dem CMH-17 veröffentlicht. [61]

Die Daten und Prozesse hatten jedoch noch nicht die Reife vergleichbarer Werkstoffhandbücher, wie beispielsweise das MMPDS. Deshalb wurde der Prozess im Jahr 2008 nochmals weiterentwickelt und wird seit jeher als NCAMP-Prozess aufgeführt [61]. Der NCAMP-Prozess ist keineswegs ein kommerzielles Produkt. Es wird, als ursprünglich von der NASA initiiertes Vorhaben, staatlich gefördert. Dadurch werden alle nötigen Dokumente kostenlos und öffentlich auf der Website des NIAR zur Verfügung gestellt [65]. Eine Übersicht dieser, inkl. der Dokumente der Material- und Prozessspezifikationen, stellt **Tabelle 5.2** dar.

Obwohl dieser Prozess weder für die additive Fertigung noch für Metallbauteile entwickelt wurde, ist er für diese Arbeit von großem Nutzen. Nicht nur weil aufgrund des öffentlichen Zugangs viele Informationen vorhanden sind, sondern auch weil die Vorgehensweise in der Spezifizierung und Qualifizierung der Materialien und Prozesse sich nicht großartig unterscheidet. Wie in Kapitel 3.4 gezeigt wurde, gelten die Bauvorschriften unabhängig davon. Des Weiteren kann auf Grundlage dieses Prozesses eine wichtige Fragestellung beantwortet werden, denn hier wird ein Prozess für Faserverbundwerkstoffe auf die additive Fertigung angewendet.

### 5.3.2 Zugelassene Materialien, Prozesse und Bauteile mittels NCAMP

Aus den einleitenden Worten geht hervor, dass der NCAMP-Prozess primär zur Entwicklung von Material- und Prozessspezifikationen von Faserverbundwerkstoffen genutzt wird, wofür dieser auch ursprünglich entworfen wurde. Wie oben bereits erwähnt, wurde mit diesem Prozess, entgegen der eigentlichen Intention, das erste polymere AM-Material für eine Verwendung mittels FDM in der Luftfahrt qualifiziert und zugelassen [64]. Diese Qualifizierung wurde jedoch nicht von NCAMP selbst durchgeführt, sondern von Stratasys. Stratasys ist ein US-amerikanisches Unternehmen, welches Drucker und Materialien für die additive Fertigung entwickelt und vor über 30 Jahren eines der ersten additiven Fertigungstechnologien erfunden hat [66]. Stratasys nutzt den NCAMP-Prozess für die kombinierte Material- und Prozessqualifizierung des Materials *ULTEM 9085 Resin* (siehe **Abbildung 5.11 (a)**) in dem hauseigenen FDM-Drucker *Fortus 900mc* (siehe **Abbildung 5.11 (b)**) [64, 67, 68]. Das FDM-Material war vorher schon im Firmenrepertoire vorhanden und hat durch die Zulassung den Zusatz „Certified“ im Namen bekommen [67]. Warum das wichtig ist, wird später klar. Mithilfe von *rp+m*, ein auf AM spezialisierter Herstellbetrieb, wurden im Anschluss an die Entwicklung der Material- und Prozessspezifikationen die Qualifizierung dieser durch die Herstellung und Prüfung von Testkörpern realisiert [64, 69]. Noch während der Qualifizierungsphase im Jahr 2013 hat sich Airbus mit Stratasys zusammengetan und dem Vorhaben zugearbeitet [70]. Danach hat Airbus die erste Bauteilzertifizierung mit den Material- und Prozessspezifikationen des *Certified ULTEM 9085 Resin* und *Fortus 900mc* durchgeführt. Airbus hat mehr als 1000 nicht-strukturelle Bauteile im *A350 XWB* mit additiv gefertigten Bauteilen ersetzt. Hauptsächlich sind dies Verkleidungen für die Kabineninnenausstattung und Rohrleitungen [71] (siehe **Abbildung 5.11 (c)**).

### 5.3.3 Prozessqualifizierung

Es hat sich bereits herausgestellt, dass die Prozessqualifizierung die größte Herausforderung im ganzen Zulassungsprozess darstellt. Die vielen möglichen Ursachen für Variabilität müssen identifiziert und kontrolliert werden. Aufgrund der großen Unterschiede hinsichtlich der



**Abbildung 5.11** Zusammensetzung des Stratasys Prozesses mit (a) Granulat des Certified ULTEM 9085 Resin [72], (b) Stratasys Fortus 900mc [73], (c) zugelassene Bauteile im Airbus A350 [71]

Fertigungsverfahren und Materialien zwischen diesem und dem späteren Referenzprozess, können keine spezifischen Aussagen zu kritischen Prozessparametern gemacht werden. Diese unterscheiden sich grundlegend. Das einzige, was sie gemeinsam haben, ist die Tatsache, dass die Reproduzierbarkeit verifiziert werden muss. Deshalb soll es in diesem Abschnitt primär um die Methoden der Nachweisführung gehen, die bei der Ermittlung der Materialkennwerte verwendet wurden. Unterteilt werden kann die gesamte Nachweisführung in die Fertigung der Prüflinge, Tests & Inspektionen der Prüflinge sowie die statistische Auswertung der quantitativen Testergebnisse.

Die Prozessqualifizierung startet mit der Fertigung der Prüflinge. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Fertigung der Prüflinge alle möglichen Ursachen für Variabilität abdecken muss, um den späteren Bauteilfertigungsprozess so gut wie möglich widerzuspiegeln. Bei der additiven Fertigung bedeutet dies in der Prozessqualifizierung die Involvierung der Material- und Maschinenabweichungen. **Abbildung 5.12** zeigt das Schema der Prüflingsfertigung und offenbart die Methode zur Abdeckung dieser Abweichungen. Es werden zunächst drei unterschiedliche Ausgangsmaterialchargen verwendet, die jeweils in einem eigenen Prozess zu einem Filament verarbeitet werden. Jedes dieser Filamente wird für einen Fertigungsprozess in zwei unterschiedlichen Druckern verwendet. Jeder dieser Drucker fertigt dann vier Prüflinge. Dadurch ergeben sich in Summe 24 Prüflinge. Zusätzlich wird die Positionierung der Prüflinge im Bauraum variiert. Dies wurde mit den kleinen schwarzen Strichen in einer Draufsicht versucht anzudeuten. Das Schema zeigt einen einzigen Durchlauf und bildet damit lediglich die Material- und Druckervariabilität ab. Die Prozessvariabilität wird durch eine vielfache Wiederholung dieses Ablaufs erreicht. Das bedeutet die Anzahl der Prüflinge für die Prozessqualifizierung beläuft sich auf das n-fache von 24, wobei 24 das Mindestmaß für die Anzahl der Prüflinge pro Durchlauf ist, denn es werden für die Qualifizierung mindestens 3 verschiedene Drucker empfohlen, was dann schon zu 36 Prüflingen führen würde. Der Aufwand ist demnach sehr groß. Das *Joint Advanced Materials & Structures Center of Excellence (JAMS)* war in das Testen der Prüflinge involviert und nennt eine Anzahl von insgesamt 2846 Prüflingen für die gesamte Prozessqualifizierung [74].

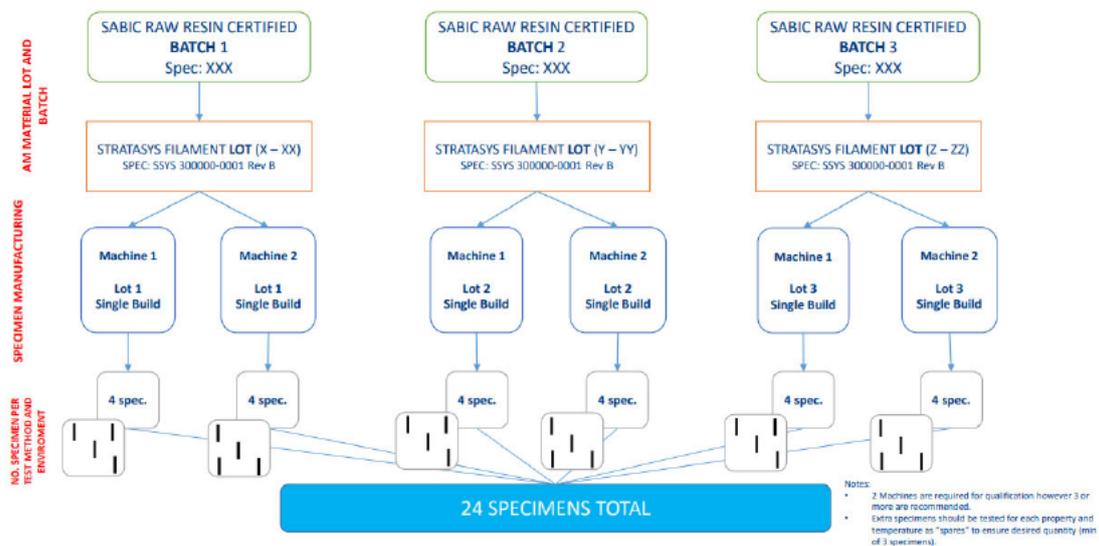
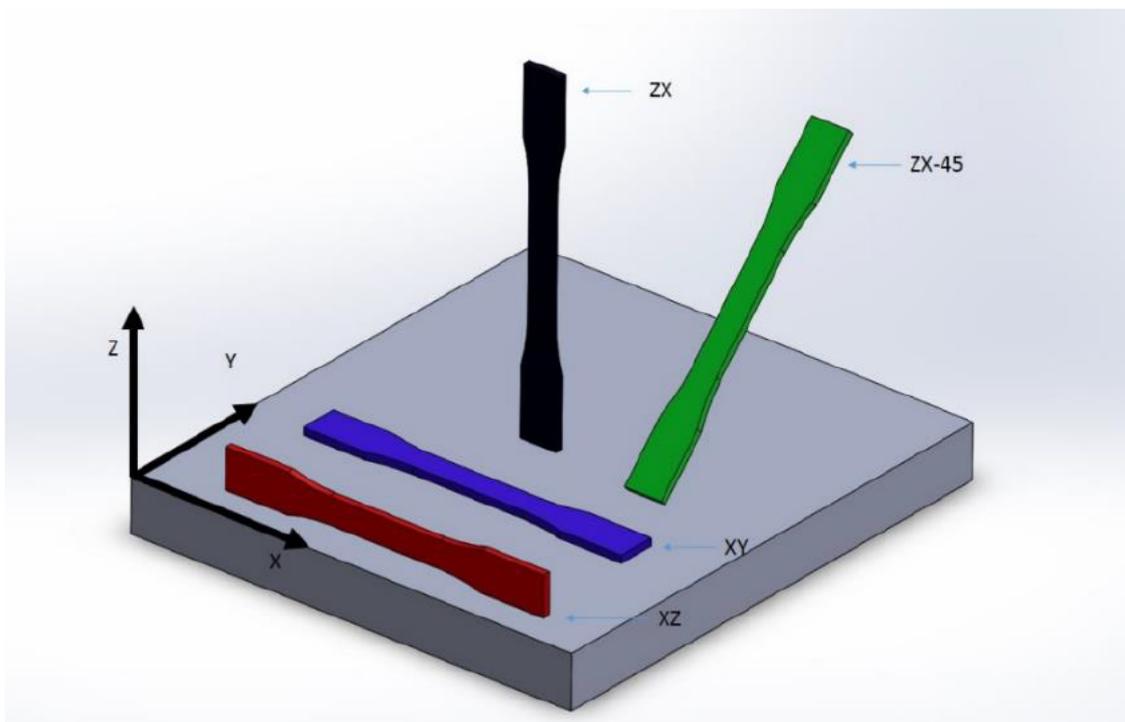


Abbildung 5.12 Schematischer Aufbau der Fertigung der Prüflinge für die Prozessqualifizierung [69]

Neben der Variation der Positionierung im Bauraum spielt die Ausrichtung auch eine wichtige Rolle. Die vier Prüflinge werden in vier verschiedenen Ausrichtungen gedruckt (siehe **Abbildung 5.13**). Der Hintergrund ist hier jedoch nicht die Abdeckung fertigungsbedingter Variationen, sondern die Ermittlung richtungsabhängiger Materialkennwerte und damit die Untersuchung einer möglichen Anisotropie. Es werden umfangreiche mechanische Materialtests durchgeführt, die aus den verschiedenen Chargen, Maschinen und Prüflingen richtungsabhängig ermittelt und beispielsweise in der Form von **Tabelle 5.3** zusammengetragen [74]. Es werden zunächst die rein aus der Messung stammenden Werte für die 0,2% Streckgrenze und die Zugfestigkeit durchschnittlich ermittelt. Dies findet für alle vier Prüflingen mit verschiedener Bauraumausrichtung statt. Hier ist bereits deutlich eine Anisotropie zu erkennen, denn beispielsweise die Zugfestigkeit der Z45- und Z- Prüflinge ist deutlich geringer als die der X- oder Y-Prüflinge. Hier scheint also die Ausrichtung in die Schichtaufbauichtung eine klare Schwäche zu sein. Auf genaue Materialwerte soll in dieser Arbeit nicht eingegangen werden, es zeigt jedoch die Notwendigkeit der Tests an unterschiedlich ausgerichteten Prüflingen.

Diese Werte können so noch nicht im Rahmen einer Materialdatenbank veröffentlicht werden. Es bedarf zusätzlich einer statistischen Auswertung der gemessenen Materialkennwerte. In der unteren Hälfte von **Tabelle 5.3** ist dies beispielhaft zu sehen. Die mathematische, statistische Auswertung erfolgt mithilfe des CMH-17 STATS, einem Analyseprogramm für die Generierung von zulässigen Materialkennwerten [75].



**Abbildung 5.13** Ausrichtung der Prüflinge im Bauraum [69]

Tabelle 5.3 Beispieltabelle mit Materialkennwerten aus den Tests der Prüflinge [69]

Dogbone Tension (DT) Basis Values and Statistics - CTD Condition									
Axis	0.2% Offset Yield Strength					Strength			
	X-Axis	Y-Axis	Z45-Axis	Z-Axis	X, Z45 & Z Axes	X-Axis	Y-Axis	Z45-Axis	Z-Axis
Mean	6.714	7.792	6.606	6.804	6.708	12.965	13.594	9.768	10.720
Stdev	0.710	0.499	0.549	0.398	0.565	0.665	0.926	0.466	0.667
CV	10.582	6.407	8.314	5.855	8.424	5.131	6.814	4.773	6.225
Mod CV	10.582	7.204	8.314	6.927	8.424	6.565	7.407	6.386	7.112
Min	5.557	6.762	5.837	6.194	5.557	11.465	11.584	8.848	8.730
Max	8.917	8.582	7.780	7.512	8.917	14.501	15.050	10.877	11.880
Batches	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Machines	2	2	2	2	2	2	2	2	2
No. Spec.	24	24	24	24	72	24	24	24	24
Basis Values and Estimates									
B-Basis	5.398	6.868	5.149	6.066	5.642	11.733	11.879	8.648	9.374
A-Estimate	4.455	6.205	4.139	5.537	4.866	10.849	10.649	7.866	8.025
Method	Normal	Normal	ANOVA	Normal	ANOVA	Normal	Normal	ANOVA	Weibull
Modified CV Basis Values and Estimates									
B-Basis	NA	6.752	NA	5.931	NA	11.387	11.728	8.612	9.307
A-Estimate		6.007		5.305		10.257	10.391	7.784	8.294
Method		Normal		Normal		Normal	Normal	Normal	Normal

### 5.3.4 Ablauf des Zulassungsprozesses

Der Ablauf des Stratasys/NCAMP-Prozesses ist in

Abbildung 5.14 schematisch dargestellt. Mit dieser Abbildung soll deutlich werden, wie viel Aufwand hinter einer Material- und Prozessqualifikation steckt. Erst wenn die Spezifikationen definiert wurden, kann mit der Qualifizierung des eigentlichen Bauteils begonnen werden. Die Pfeile auf der rechten Seite sollen dies symbolisieren. Dies zeigt abermals, warum die Standardisierung und Erstellung von Materialdatenbanken nach Vorbild des MMPDS so wichtig sind. Durch die Vorleistung von Stratasys können deren Kunden einen zertifizierten Prozess kaufen (Material, Drucker und Prozesseinstellungen) und sofort mit dem Konformitätsnachweis bzw. mit der Bauteilqualifizierung beginnen, vorausgesetzt die Behörden erkennen die Spezifikation und Materialkennwerte an, was bei NCAMP der Fall ist. Das spart enorm viel Aufwand und senkt die Schwelle für Entwicklungs- und Herstellbetriebe bei der Abwägung über den Einstieg in AM.

Der Konformitätsnachweis wird mit Äquivalenztests durchgeführt, die denselben Ablauf haben wie die Prozessqualifizierung, nur in einem deutlich kleineren Umfang. Hintergrund ist, dass die Maschine bei der Bauteilfertigung nicht an demselben Standort steht und damit nicht unbedingt denselben Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist. Es muss daher verifiziert werden, dass die Maschine nach den zugelassenen Spezifikationen arbeitet und ebenso reproduzierbare Bauteile fertigt, wie die Maschinen, auf denen die Basis-Qualifizierung durchgeführt wurde. Zusätzlich werden dadurch vorhandenen Fehler in der Maschine offengelegt.

Der in Abbildung 5.12 dargestellte Fertigungsablauf muss demnach nochmals durchgeführt werden. Die dabei gedruckten Prüflinge werden wiederholt getestet. Die dabei gemessenen Kennwerte, müssen dann mit denen aus den Materialdaten übereinstimmen. Die Anzahl der zu fertigenden Prüflinge ist jedoch deutlich geringer. Hier liegt der Nutzen der bereits durchgeführten Prozessqualifizierung. Nach Angaben von JAMS lag die Anzahl der Prüflinge bei den

Äquivalenztests bei 504 [74]. Hingegen wurden bei der eigentlichen Prozessqualifizierung 2846 Prüflinge gefertigt [74]. Dies bedeutet ein Qualifizierungsaufwand von nur 18% der eigentlichen Prozessqualifizierung.

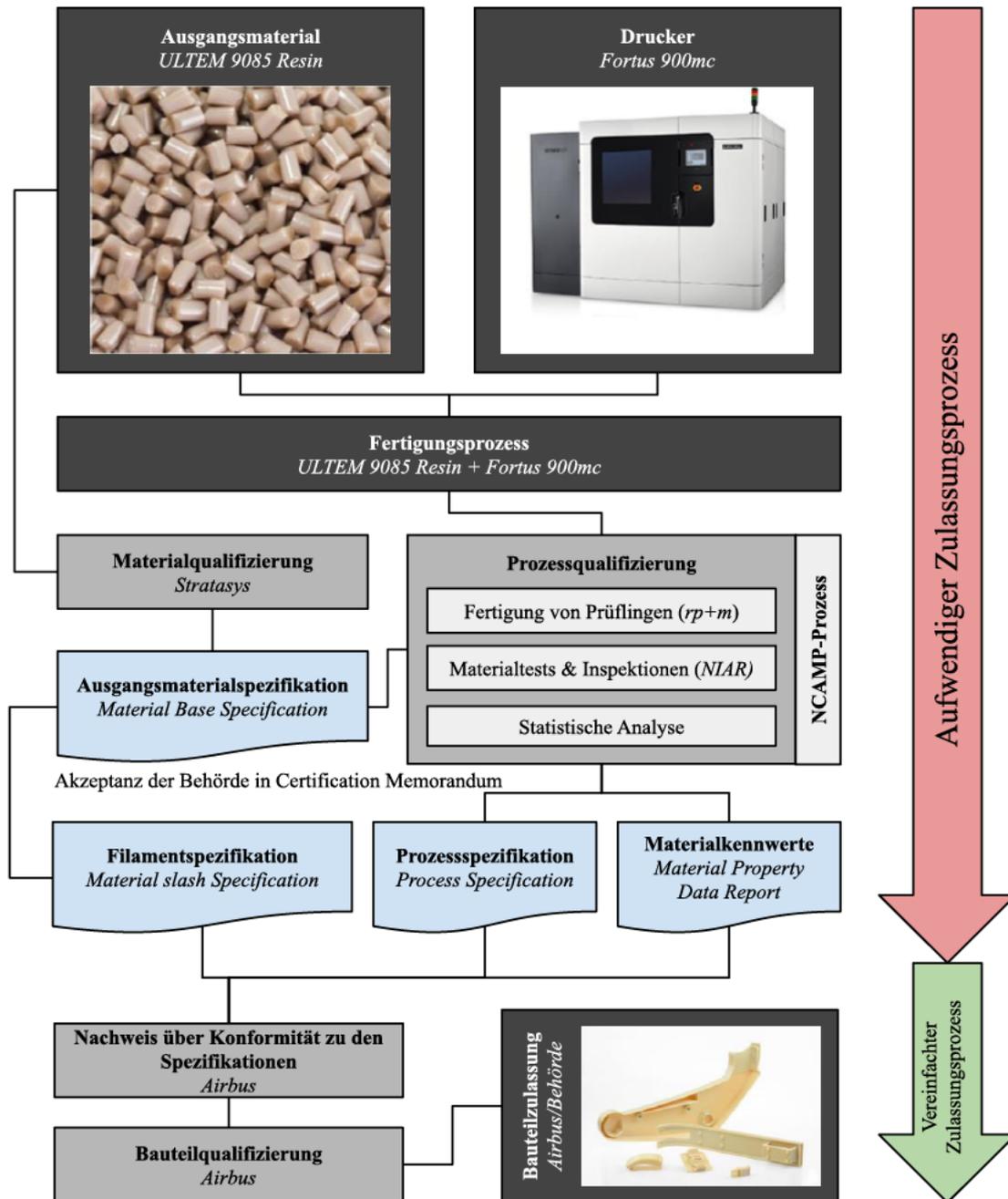


Abbildung 5.14 Ablauf des NCAMP/Stratasys Zulassungsprozesses

## 6 Analyse

Die technischen Möglichkeiten der additiven Fertigung und die Vorschriften der zivilen Luftfahrt haben den Rahmen für einen Zulassungsprozesses festgelegt. Eine mögliche Umsetzung dieses Rahmens wurde dann mit den Standardisierungen und den praktizierten Zulassungsprozessen demonstriert. Aus allen drei Quellen ist eine Menge an Vorschriften, Anforderungen und Empfehlungen für den Zulassungsprozess zu entnehmen. In den vorherigen Kapiteln wurden diese Informationen quellenweise präsentiert, was eine Erfassung der Unterschiede und Gemeinsamkeiten erschwert. In **Tabelle 6.1** wurden deshalb alle relevanten Informationen gefiltert und in eine der Prozessschritte des Zulassungsprozesses eingeordnet. Dieses Kapitel kann als Übergang und Bindeglied zwischen den Rechercheergebnissen und der Ausarbeitung eines Zulassungsprozesses anhand dieser gesehen werden.

Aus den Rechercheergebnissen haben sich im Wesentlichen drei Hauptphasen herauskristallisiert. Dies sind die Entwicklungsphase, Verifizierungsphase und Validierungsphase. Der eigentliche Zulassungsprozess findet dabei streng genommen nur während der Verifizierungsphase statt. Die Entwicklungs- und Validierungsphase haben jedoch anhand einiger Aspekte einen Einfluss auf die Verifizierungsphase, weshalb diese fortan zum Zulassungsprozess dazugehörig angenommen werden.

Die Verifizierungsphase wiederum besteht aus der Qualifizierungs- und Zertifizierungsphase. Da die Zertifizierung lediglich der behördliche Ablaufprozess und die Bestätigung zur Konformität der Qualifizierungsphase darstellt, wird diese hier nicht als eigenständige Phase interpretiert. Die Qualifizierungsphase muss wiederum in drei Unterqualifizierungsprozesse unterteilt werden. Um hier schon Missverständnisse zu vermeiden, werden die groben Inhalte der Phasen erläutert.

Die Materialqualifizierung ist bei AM, durch die generative Technologie, in eine prozesseitige Qualifizierung und die des Ausgangsmaterials (z.B. Pulver) zu unterteilen. Der fortan als Materialqualifizierung (MQ) aufgeführte Prozessschritt umfasst lediglich die Qualifizierung des Ausgangsmaterials. Die Qualifizierung des gedruckten Materials fällt unter die Prozessqualifizierung (PQ). Unabhängig von diesen beiden gibt es die Bauteilqualifizierung (BQ), die sich nur auf die bauteilspezifischen Anforderungen bezieht

Die hier genannten Phasen werden nacheinander geordnet in **Tabelle 6.1** zusammengefasst.

**Tabelle 6.1** Zusammenfassung und Einordnung der Anforderungen an die verschiedenen Phasen eines AM Zulassungsprozesses aus Vorschriften der zivilen Luftfahrtbehörden, Normen und praktizierten Zulassungsprozessen

ZP- Zulassungsprozess E - Entwicklungsphase MQ – Materialqualifizierung (Ausgangsmaterial) PQ – Prozessqualifizierung BQ – Bauteilqualifizierung QS – Qualitätssicherung (Validierungsphase)			
Quellentyp	Quelle	Prozessschritt	Anforderung an den Zulassungsprozess / Berücksichtigung nötig
Vorschrift	[26]	Behörde	Musterprüfprogramm, Certification Plan, Entwicklungsvorhaben, Certification Basis, Nachweisführung, Projektplan, Compliance Checklist
ZP	[53]	E	Ausarbeiten von Maschinen-, Material- und Prozessspezifikationen in der Entwicklungsphase
Memorandum	[36]	MQ	Ausgangsmaterial muss mit Materialspezifikation erworben und kontrolliert werden
Memorandum	[37]	MQ	Partikelgröße, Partikelform, Pulververteilung, chemische Zusammensetzung, Reinheit, Fließverhalten
Norm	[45]	MQ	Kontrolle der Charge, Lagerung, Vorbereitung zur Prozessführung, Transport in die Maschine, Transport aus der Maschine
Norm	[45]	MQ	Unterscheidung des Pulvers in Einzel- oder Mischcharge sowie neu oder gebraucht. Rückverfolgbarkeit gewährleisten
Norm	[45]	MQ	Definition des Wiederaufbereitungsprozesses für das Pulver
ZP	[56]	MQ	Kontrolle von Ausgangsmaterial, Chemie, Größe, Verteilung
ZP	[59]	MQ	Ausgangsmaterial muss rückverfolgbar sein. Deswegen ist eine Dokumentation erforderlich
ZP	[59]	MQ	Bei Wiederverwendung: Untersuchung der Auswirkung auf Materialperformance, Maßhaltigkeit und Funktion im Prozess
ZP	[59]	MQ	Kontrolle des Pulvers: Partikelgröße, Partikelverteilung, Morphologie, Chemische Zusammensetzung, Reinheit, Fließverhalten, Streufähigkeit, Klopf- und Schüttdichte
ZP	[56]	PQ	Heiß-isostatisches-Pressen, Thermische Bearbeitung
Vorschrift	CS 25.603	PQ	Alle Materialien von sicherheitsrelevanten Bauteilen müssen nach CS.X.603 in Form von Erfahrungswerten oder Tests qualifiziert werden
Vorschrift	CS 25.605	PQ	Fertigungsmethode muss konsistente, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse erzielen
Vorschrift	CS 25.605	PQ	Alle neuen Fertigungsmethoden müssen außerdem einem Testprogramm unterzogen werden
Vorschrift	CS 25.613	PQ	Statistische Auswertung der Materialkennwerte in Form der Design Values
Memorandum	[36]	PQ	Prüfkörper müssen Eigenschaften des Bauteils widerspiegeln
Memorandum	[37]	PQ	Materialdichte, Gefüge, Oberflächenstruktur, geometrische Details, Wiederverwendung des Pulvers
Memorandum	[37]	PQ	Wärmebehandlung, Entfernen von der Bauplattform, Entfernen der Stützstruktur
Memorandum	[37]	PQ	Variabilität, Anisotropie, Testkörper, Bauteiltests, Signifikanz, Ursachen für Abweichungen, Berücksichtigung von Anomalien
Norm	[45]	PQ	Überwachung des Prozessdurchlaufs
Norm	[45]	PQ	Konditionierung der Baukammer, Datensicherung- und Archivierung, Entnahme des Bauteils, Nachbereitung der Anlage, Durchführung anlagebedingter Folgeprozesse, Einzelbehandlung der Bauteile
Norm	[45]	PQ	„Prüfung von Referenzprobekörpern in statistisch signifikantem Umfang, die die zu qualifizierende Prozesskette durchlaufen haben“
Norm	[45]	PQ	Qualifizierung einer additiven Fertigungsanlage gilt nur für den in der Prozessqualifizierung verwendeten Prozessparametersatz, das Ausgangsmaterial und Vor-/Nachbearbeitung
Norm	[45]	PQ	Bei Veränderung der Prozessparameter muss erneut qualifiziert werden
Norm	[45]	PQ	Genormte Prüfkörper mit statistisch repräsentativer Anzahl
Norm	[45]	PQ	Ausrichtung und Positionierung der Prüfkörper in geeigneter Weise zur Erfassung möglicher Anisotropie
Norm	[45]	PQ	Es muss eine kombinierte Material- und Prozessqualifizierung stattfinden
Norm	[46]	PQ	Ausnutzung der Bauplattform von mind. 80%, um lokale Leistungsschwankungen identifizieren zu können

Norm	[46]	PQ	Positionierung und Ausrichtung müssen für die Prüfkörper genauestens definiert sein
Norm	[46]	PQ	Vermeidung von Stützstrukturen bei Prüfkörpern
Norm	[46]	PQ	Verwendung von Prüfkörpern zu geometrischen Leistungsbewertung
Norm	[48]	PQ	Es benötigt Prüfkörper für die kombinierte Maschinen- und Prozessqualifizierung
Norm	[48]	PQ	Prüfkörper zur Ermittlung von chemischer Zusammensetzung, Mikrostruktur, Porosität und mechanische Eigenschaften an mind. 5 vers. Stellen auf der Bauplattform.
ZP	[56]	PQ	Materialvariation von Maschine zu Maschine, Maschinenkontrolle, Laserparameter, Kalibrierung, Umweltbedingungen, Leistungsindikatoren, Oberflächenbeschaffenheit, Zugfestigkeit, Dauerfestigkeit, Ermüdungsverhalten, Korngröße, Herstellungs- und Betriebsumgebungen, Temperatur, Korrosion
ZP	[56]	PQ	Die zulässigen Spannungen müssen alle Unsicherheiten und Variationen berücksichtigen und kleiner sein, um ein sicheres Bauteil gewährleisten zu können
ZP	[53]	PQ	Prozessparameter werden nach erfolgreicher Qualifizierung „eingefroren“
ZP	[53]	PQ	Validierung der Qualifizierung erfolgt an Prüfkörpern
ZP	[57]	PQ	Statistische Auswertung der Dimensionskontrollen mit 4 Sigma
ZP	[57]	PQ	Jede Maschine muss separat qualifiziert werden
ZP	[59]	PQ	Maschinenqualifizierung als Installationsqualifizierung: Sicherstellen der Installation nach Herstellervorgaben.
ZP	[59]	PQ	Bei Mehreren Maschinen: Jede Maschine muss die vollständige Prozessqualifizierung durchlaufen. Verwendung statistischer Auswertung (Nullhypothesentest) möglich
ZP	[59]	PQ	Ermittlung der Materialkennwerte muss Variationen berücksichtigen: Ausgangsmaterial von Charge zu Charge, Druckauftrag zu Druckauftrag, Drucker zu Drucker, Charge der Wärmebehandlung, thermische Unterschiede bei Bauraumanordnung, Prozessabweichungen
ZP	[59]	PQ	Druck der Prüfkörper aus verschiedenen Chargen und Druckaufträgen
ZP	[59]	PQ	Experimente, die Auswirkungen veränderlicher Prozessparameter erfassen
ZP	[59]	PQ	Ermittlung der Richtungsabhängigkeit von Materialeigenschaften mit mehreren Probekörpern, die unterschiedlich im Bauraum ausgerichtet sind
ZP	[59]	PQ	Berücksichtigung fertigungsbedingter geometriebasierter Materialabschwächungen durch <i>Design Values</i> der sich von den <i>Material Allowables</i> mit einem Skalierungsfaktor unterscheidet. Diese werden anhand Tests geometrischer Details bestimmt: Dünnwandige Bereiche, Komplexe Geometrie, Löcher, Überhänge, Bridging, Auflagefläche, Streben, Stege, Berührungspunkte der Stützstruktur.
ZP	[69]	PQ	Fertigung der Prüfkörper müssen alle Prozessvariationen abdecken
ZP	[69]	PQ	Unterscheidung bei der Prüfkörperfertigung in Ausgangsmaterialchargen, (Filamentchargen, Maschinen (mind. 3) und Bauraumpositionierung
ZP	[69]	PQ	Prüfkörper mit unterschiedlicher Bauraumausrichtung zur Erfassung der Anisotropie
ZP	[75]	PQ	Mathematisch statistische Auswertung der gemessenen Materialkennwerte mit CMH-17
Vorschrift	CS 25.571	BQ	Kein Ermüdungsversagen aufgrund von Fertigungsfehlern über die gesamte Betriebszeit des Flugzeugs auftritt bei kritischen Bauteilen
Vorschrift	CS 25.619	BQ	Zusätzlicher Sicherheitsfaktor bei Unsicherheit über Fertigungsprozess
Memorandum	[36, 37]	BQ	Bauraumausrichtung, Stützstruktur, unzugängliche Oberflächen, Anisotropie, Löcher, Überhänge, Winkel, Bridging müssen bei Bauteildesign berücksichtigt werden
Memorandum	[36]	BQ	<i>Design Values</i> müssen auf das Bauteil anwendbar sein
Memorandum	[37]	BQ	Elektronische Daten (CAD, Slicer, ...), Kontamination, Fremdkörper, Luftstrom in der Baukammer, Rückverfolgbarkeit
Norm	[45]	BQ	Prüfung der Daten, Fertigungsbedingte Anpassungen der Geometrie, Platzierung des Bauteils, Generierung der Stützen (Supportstruktur), Generierung der Schichtdaten, Archivierung der Daten
Norm	[48]	BQ	Berücksichtigung der gegenseitigen thermischen Beeinflussung beim Druck mehrerer Bauteile in einem Baujob
ZP	[56]	BQ	Positionierung, Orientierung, Bauteilkontrollen
ZP	[53]	BQ	Komponenten-Tests und Zertifizierung im Kontext des TC
ZP	[59]	BQ	<i>Design Values</i> müssen am Bauteil verifiziert werden
ZP	[59]	BQ	Systemqualifizierung am Ende, die sicherstellt, dass das Bauteil seine Funktion über die gesamte Lebensdauer hinweg erfüllt. Im eingebauten Zustand im Flugzeug.

ZP	[59]	BQ	Fehleranalyse zur Untersuchung der Auswirkungen und Wahrscheinlichkeit des Versagensfalls
Memorandum	[36]	QS	Materialien und Prozesse müssen durch Spezifikationen definiert und wiederholt kontrolliert
Memorandum	[37]	QS	Erkennung winziger Materialanomalien, Fehlermuster, mehrere NDTs, Röntgen, Eindringprüfung, Wirbelstrommethoden, Ultraschall, Bauteilprüfung, Probekörperprüfung
Memorandum	[37]	QS	Bauteilquerschnitte, metallurgische Untersuchung, chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften, Variabilität, Veränderung der Prozessparameter
Norm	[45]	QS	Druck von Fertigungsbegleitproben
Norm	[45]	QS	Notwendigkeit einer Personalqualifizierung für Maschinenbediener etc.
Norm	[45]	QS	Dokumentation aller Schritte und Variation der Prozessparameter
Norm	[45]	QS	Unterscheidung in fertigungslose und bauteilbezogene Qualitätskontrolle. Fertigungslos: Prüfkörper in gesamter Bauhöhe (alle Schichten abdecken) für nachträgliche Tests (Dichte, Härte, Zugfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit, Maßhaltigkeit; Bauteilbezogen: Bauteilkontrollen
Norm	[45]	QS	Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung des Bauteils. Mindestens Losgröße 2 damit Opferbauteile gedruckt und zerstört werden können.
Norm	[48]	QS	Widerholen der Prozessqualifizierung alle 6 Monate
Norm	[48]	QS	Bei Störungen im System, die die Prozessparameter beeinflussen muss die Prozessqualifizierung erneut durchgeführt werden: Standortwechsel, Kalibrierung, Reparaturen, Software-Update, Umrüstung der Maschine
ZP	[53]	QS	DT (An Bauteil & Prüfkörper): <i>Cut-Ups</i> für Korngröße, Porosität, Oberflächenbeschaffenheit und Nachbearbeitung NDT: Maßhaltigkeit, Materialdefekte, Funktionstests
ZP	[57, 58]	QS	Fertigungsbegleitende Prüfkörper, die die gesamte Bauteilhöhe im Bauraum abdecken Zugversuche, Untersuchungen zum Gefüge, Dauerfestigkeitstests + zusätzliche Prüfkörper zur Aufbewahrung für spätere Untersuchungen
ZP	[59]	QS	Maschinenqualifizierung als Betriebsqualifizierung, fertigungsbegleitend: Kalibrierung, präventive Wartung, Tests von Prüfkörpern
ZP	[59]	QS	Qualitätskontrollen basieren auf den Tätigkeiten in der Qualifizierung
ZP	[59]	QS	Stetige Überwachung der Einhaltung aller Prozessparameter
ZP	[59]	QS	Genaue Beschreibung des Fertigungsprozesses: Ausrichtung, Positionierung, Prüfkörper (Anzahl, Positionierung, Geometrie), Plan zur Inspektion der Maßhaltigkeit, Plan für Funktionstests, Plan für DT & NDT, Häufigkeit der Stichproben
ZP	[59]	QS	Untersuchungen zu: Porosität als Einschluss kleiner Gasblasen, Einschlüsse chemisch abweichender Teilchen, unvollständiges Aufschmelzen, Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächenrauheit mit NDT (Röntgen, Eindringprüfung, Computertomographie)
ZP	[59]	QS	Maßhaltigkeit überprüfen mit NDT (CT, CMM, Streifenlichtscanning, Laserscanning, Funktionstests, Oberflächenrauheit), DT ( <i>Cut-Ups</i> )

## 7 AM Zulassungsprozess

Die Analyse hat alle recherchierten Informationen aus dem Teil I dieser Arbeit zusammengefasst und diese in brauchbare und unbrauchbare Informationen vorbereitend eingeteilt. Aus den zusammengefassten Erkenntnissen ergeben sich Anforderungen, die dieser Zulassungsprozess erfüllen muss. Diese Anforderungen stammen nicht zwangsläufig aus behördlichen Vorgaben. Jedoch sind die praktizierten Zulassungsprozesse als unumgänglich anzusehen, sofern diese für den Anwendungsbereich dieses Zulassungsprozesses zutreffen (siehe **Kapitel 7.1**), da die Praktiken sich bewährt haben und zu einer erfolgreichen Zulassung geführt haben.

In den nächsten Unterkapiteln werden einige Diagramme gezeigt. Zum größten Teil sind dies Flussdiagramme. Flussdiagramme können systematische Vorgehensweisen und Prozesse ideal abbilden. Der AM Zulassungsprozess ist jedoch keineswegs als ein Weg oder ein „roter Faden“ anzusehen. Viele Prozesse geschehen gleichzeitig, beeinflussen sich gegenseitig oder sind nicht genau zeitlich anzuordnen, was die Darstellung mit einem klassischen Flussdiagramm schwierig macht. Aufgrund der guten Lesbarkeit von Flussdiagrammen wurde trotzdem auf diese Art der Darstellung - mit einigen Modifikationen - zurückgegriffen. Im Folgenden werden die verwendeten Zeichen und Symbol erklärt.

Der Zulassungsprozess wird in drei verschiedenen Ebenen betrachtet. Angefangen wird bei der Betrachtung des allgemeinen Ablaufs, ohne detailliert auf Anforderungen einzugehen. Daraufhin werden die einzelnen Phasen des Ablaufs etwas genauer beschrieben, woraufhin ausgewählte Unterprozesse detailliert beschrieben werden.

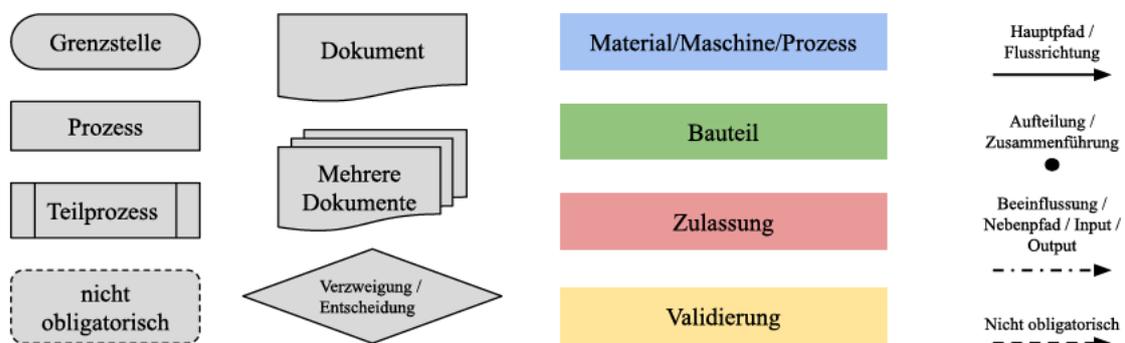


Abbildung 7.1 Legende der verwendeten Symbole für die Darstellung des Zulassungsprozesses

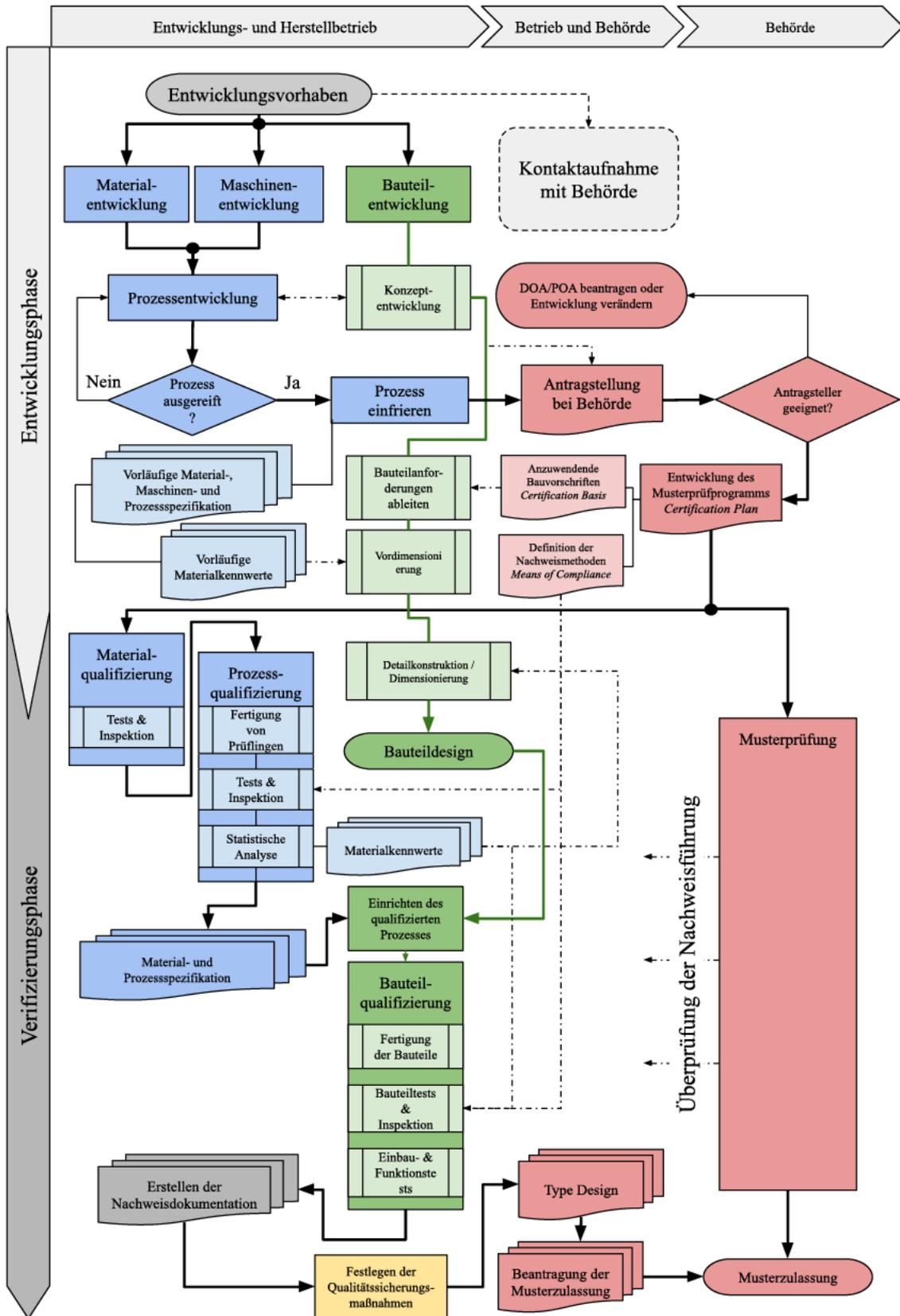


Abbildung 7.2 Ablauf des AM Zulassungsprozesses vom Entwicklungsvorhaben bis zur Musterzulassung

## 7.1 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich dieses Zulassungsprozesses beschränkt sich auf:

- AM-Bauteile
- PBF-Verfahren
- Flugzeugstrukturbauteile
- Metallische Bauteile
- Unkritische Bauteile
- Ausgangslage ohne vorhandene Spezifikationen

## 7.2 Ablauf

**Abbildung 7.2** zeigt den gesamten Ablauf des Zulassungsprozesses vom Entwicklungsvorhaben bis zur Musterzulassung. Vertikal von oben nach unten verlaufen die Phasen. Der Prozess wird dabei zunächst in die Entwicklungs- und Verifizierungsphase aufgeteilt. Die Verifizierungsphase besteht wiederum aus der Qualifizierungsphase, gefolgt von der Zertifizierungsphase. Im Diagramm sind diese jedoch nicht eingezeichnet, weil die beiden Phasen zeitlich nicht trennbar sind und weitestgehend parallel verlaufen. Die Zertifizierung wird, seitens der Behörde, in den meisten Fällen schon während der noch stattfindenden Qualifizierung durchgeführt. Deshalb wird diese Phase zusammenfassend als Zertifizierungsphase betitelt. Auch allgemein soll hier erwähnt werden, dass die Phasen sowie die einzelnen Prozessschritte nicht statisch sind und sich teilweise überschneiden dürfen. Wo dies möglich ist und wo nicht, wird an der jeweiligen Stelle hervorgehoben. Horizontal zeigt das Diagramm von links nach rechts verlaufend die Zuständigkeiten. Ausgehend von den Herstellungs- und Entwicklungsbetrieben vergrößert sich nach rechts die Involvierung der Behörde bzw. die Zuständigkeit. Die Farben sollen dies zusätzlich visuell trennen. Ebenfalls trennen die Farben die Prozessentwicklung und -qualifizierung von der Bauteilentwicklung und -qualifizierung ab. Mit der vertikalen und horizontalen Einteilung ergibt sich ein Raster, welches beispielweise oben links einen frühen Entwicklungsprozess mit der Zuständigkeit bei den Herstell- und Entwicklungsbetrieben zeigt. Analog dazu ist ein Prozess unten rechts am Ende der Zertifizierungsphase mit Zuständigkeit bei der Behörde einzuordnen, wie etwa die Musterzulassung. Der Hauptfluss des Prozesses verläuft mit den durchgezogenen Linien und Pfeilen. Da sich die Prozesse gegenseitig teilweise beeinflussen oder einander In- oder Output liefern, wurde dies mit Strich-Punkt-Linien gestaltet. Einige der Prozesse enthalten Teilprozesse. Diese sind allerdings aus Platzgründen nicht immer vollständig in der Gesamtübersicht gelistet. Die Teilprozesse sind lediglich zur Orientierung aufgeführt oder zum Zeigen der Querverbindung und Beeinflussung anderer Prozesse. Die detaillierten Auflistungen aller Teilprozesse werden in **Kapitel 7.3 bis Kapitel 7.5** bereitgestellt.

Auch wenn die Entwicklungsphase nicht direkt zum Zulassungsprozess gehört, ist sie dennoch wichtig für die Qualifizierung. Der Ausgangspunkt ist ein Entwicklungsvorhaben bei nicht vorhandener Material- und Prozessspezifikation. Es wird von einer neuen Technologie, neuem Material, etc. ausgegangen. Das bedeutet, diese müssen vor der eigentlichen Bauteilqualifizierung erst entwickelt und qualifiziert werden. Entwicklung bedeutet in diesem Kontext nicht, dass das Material oder die Maschine erst konstruiert, gebaut usw. werden muss, sondern dass die

vorläufigen Spezifikationen entwickelt werden müssen. Es wäre nicht zielführend ohne Erfahrung, Wissen und Erkenntnisse in eine Qualifizierung zu gehen. Die Entwicklungsphase ist beispielweise dafür da, die Auswirkungen einer Veränderung der Prozessparameter herauszufinden. Genauer wird dies in Kapitel 7.3 behandelt. Der Output der Material-, Maschinen- und Prozessentwicklung ist demnach eine vorläufige Spezifikation, mit welcher der Prozess zunächst „eingefroren“ wird. Das Sperren aller Prozessparameter ist sehr wichtig für die Qualifizierung, denn diese muss unter konstanten Bedingungen durchgeführt werden, um die Reproduzierbarkeit des Prozesses bewerten zu können. Es müssen gleiche Ausgangsbedingungen gewährleistet werden.

Die Bauteilentwicklung durchläuft in der Entwicklungsphase einen separaten Pfad. Dies hat den Hintergrund, dass bisher lediglich die groben Funktionsanforderungen an das Bauteil bekannt sind. Dies wird in der Konzeptentwicklung berücksichtigt. Es sind weder genaue Materialkennwerte für eine Dimensionierung noch geometrische Möglichkeiten des Prozesses bekannt, die Einfluss auf das Bauteildesign haben. Hieraus folgt ebenfalls die Notwendigkeit einer vorgelagerten Entwicklungsphase, denn während der Ausreifung des Prozesses werden bereits vorläufige Materialkennwerte ermittelt, die für eine Vordimensionierung genutzt werden können. An dieser Stelle ist auch eine Machbarkeitsanalyse denkbar, die evaluiert, ob das ausgedachte Konzept des Bauteils mit dem Prozess umsetzbar ist. Ansonsten wird erst bei erfolgreicher Qualifizierung des Prozesses eine Detailkonstruktion mit entsprechender Ausdimensionierung möglich, da die dafür benötigten Materialkennwerte erst dort verifiziert werden.

In der Qualifizierungsphase wird die Entwicklung des Prozesses, samt der vorläufigen Prozessspezifikation und Materialkennwerte, verifiziert. Entwicklungs- und Qualifizierungsphase sind sich hinsichtlich der durchzuführenden Tests sehr ähnlich. Jedoch steigt der Umfang deutlich, was in Kapitel 7.4 ausgeführt wird. Um an dieser Stelle bereits Missverständnisse zu vermeiden, wird deutlich gemacht, dass es bei der Materialentwicklung und -qualifizierung immer nur um die Betrachtung des Ausgangsmaterials geht. Eine Materialqualifizierung als solches kann es aufgrund der generativen Fertigungsmethode nicht geben. Das gedruckte Material wird als Teil der Prozessqualifizierung verifiziert. Der letzte Schritt, der in der Zuständigkeit der Herstell- und Entwicklungsbetriebe liegt, ist die Bauteilqualifizierung. Diese folgt der Material- und Prozessqualifizierung. Hier müssen unter anderem Bauteiltests durchgeführt werden. Mit diesen sollen die entwickelten Design Values verifiziert werden.

Noch während der eigentlichen Zulassung müssen die Qualitätssicherungsmaßnahmen, wie z.B. Tests der Fertigungsbegleitproben und durchzuführende Inspektionen, definiert werden. Diese unterscheiden sich nicht großartig von den Tests aus der Qualifizierungsphase. Es muss festgelegt werden, wie die Konformität jedes Bauteils zu dem Type Design validiert wird. Nach Musterzulassung folgt daraus die fertigungsbegleitende Validierungsphase. Diese ist in **Abbildung 7.2** nicht abgebildet, wird aber in **Kapitel 7.5** gezeigt.

Während der bisher genannten Phasen und Prozesse gibt es einen stetigen Austausch zwischen Betrieb und Behörde. Dies fängt bei der Antragsstellung an hört bei der Erteilung der Musterzulassung auf. Hier sei erwähnt, dass der Involvierungsgrad der Behörde von Fall zu Fall stark schwankt. Im Falle einer erstmaligen Nutzung der additiven Fertigung ist jedoch davon auszugehen, dass die Behörde sich frühzeitig und vielseitig in die Qualifizierung einbringt. Daher ist auch der im Hauptfluss gewählte Zeitpunkt zur Antragstellung nicht fest. Auf die Darstellung der

Interaktion zwischen Behörde und Antragsteller wird in den folgenden, detaillierten Prozessschritten weitestgehend verzichtet. Diese diene hier lediglich der Einordnung in das Gesamtbild.

Abschließend ist zum Ablauf zu sagen, dass dieser in der Gesamtübersicht nicht nur für AM zutreffen würde. Lediglich die der Bauteilqualifizierung vorgelagerte Entwicklung und Qualifizierung eigener Spezifikationen sind dahingehend spezifisch. Allerdings muss jede neue Fertigungstechnologie einen solchen Prozess durchlaufen, bis dieser sich etabliert hat. Erst in der Detailbeschreibung der Teilprozesse werden die AM-spezifischen Prozessschritte- und Anforderungen deutlich.

### 7.3 Entwicklungsphase

Die Entwicklungsphase hat das Ziel, eine vorläufige Spezifikation zu erarbeiten. Die Maschine, das Material und der Prozess müssen ins kleinste Detail verstanden werden. Auf diese Phase wird nur kurz eingegangen, denn der Zulassungsprozess spielt sich hauptsächlich während der Verifizierungsphase ab. Die Notwendigkeit einer vorgelagerten Entwicklungsphase folgt daraus, dass ohne detailliertes Verständnis über die Prozessparameter keine adäquate Qualifizierung durchgeführt werden kann. Der zu Grunde liegende Prozess ist dafür noch nicht genug ausgereift. Im Wesentlichen ähneln sich daher Entwicklungs- und Qualifizierungsphase sehr, denn die Schritte aus der Entwicklung werden in der Qualifizierung wiederholt. Es werden hier ebenfalls Prüflinge gefertigt, Tests durchgeführt und Fertigungsergebnisse inspiziert. Deshalb kann die Entwicklungsphase auch als eine Art firmeninterne „Vorqualifizierung“ gesehen werden. Es ist jedoch äußerst wichtig, noch keine Material- und Prozessqualifizierung während der Entwicklungsphase des Prozesses durchzuführen. Die Qualifizierung des Materials und Prozesses muss in einem gesonderten Schritt stattfinden, die auf die Entwicklungsphase von Material und Prozess folgt, an dessen Ende der Prozess „eingefroren“ wird. Dies bedeutet, dass der Prozess und die Prozessparameter ab diesem Zeitpunkt nicht mehr verändert werden.

**Abbildung 7.3** zeigt einen möglichen Ablauf einer Entwicklungsphase im Kontext eines AM Zulassungsprozesses. Diese detaillierte Ansicht fügt sich genau wie alle kommenden Abbildungen in die Gesamtübersicht ein. Dabei deuten die Teilprozesse, hellblau dargestellt, wichtige Meilensteine der jeweiligen Entwicklungsphase an. Ausgehend von der Material- und Maschinenentwicklung wird bei der der Prozessentwicklung ein iterativer Prozess aufgebaut. Dieser ist notwendig, um die Auswirkungen der Veränderungen zu beobachten und dementsprechend den Prozess anzupassen. Mit fortschreitender Prozessreife ist es möglich, bereits erste Konzeptbauteile zu drucken, um diese Informationen in die Konzeptentwicklung einfließen zu lassen. Das Ziel ist nach wie vor, eine Bauteilzulassung zu erreichen. Sobald der Prozess hinreichend ausgereift ist, sollten sämtliche Prozessparameter dokumentiert und „eingefroren“ werden. Diese werden in der vorläufigen Prozessspezifikation festgehalten. Zudem fließen die vorläufigen Materialkennwerte aus der Entwicklungsphase in die Vordimensionierung ein.

Es sollen hier ausdrücklich keine expliziten Prozessparameter genannt werden, die in der Entwicklungsphase betrachtet werden. Auch wenn sich dieser Zulassungsprozess auf metallische PBF-Bauteile beschränkt, können diese hier nicht identifiziert werden, denn die Unterschiede von Maschine zu Maschine und Ausgangsmaterial zu Ausgangsmaterial sind signifikant. Die



### 7.4 Verifizierungsphase

In dieser Phase spielt sich der Kern des Zulassungsprozesses ab. Die entwickelte, vorläufige Spezifikation muss dabei verifiziert werden. Die Konformität zu den in **Tabelle 3.2** aufgeführten bauteilunspezifischen Bauvorschriften gilt es, mit den im *Certification Plan* festgelegten Methoden nachzuweisen. Zusammenfassend kann man sagen, dass in der Verifizierungsphase alle möglichen Variationsquellen in der Fertigung berücksichtigt werden müssen, um zu zeigen, dass diese durch die in der Entwicklung getroffenen Maßnahmen zu einem reproduzierbaren und verlässlichen Prozess führen. Der Ablauf ist in **Abbildung 7.4** zu sehen.

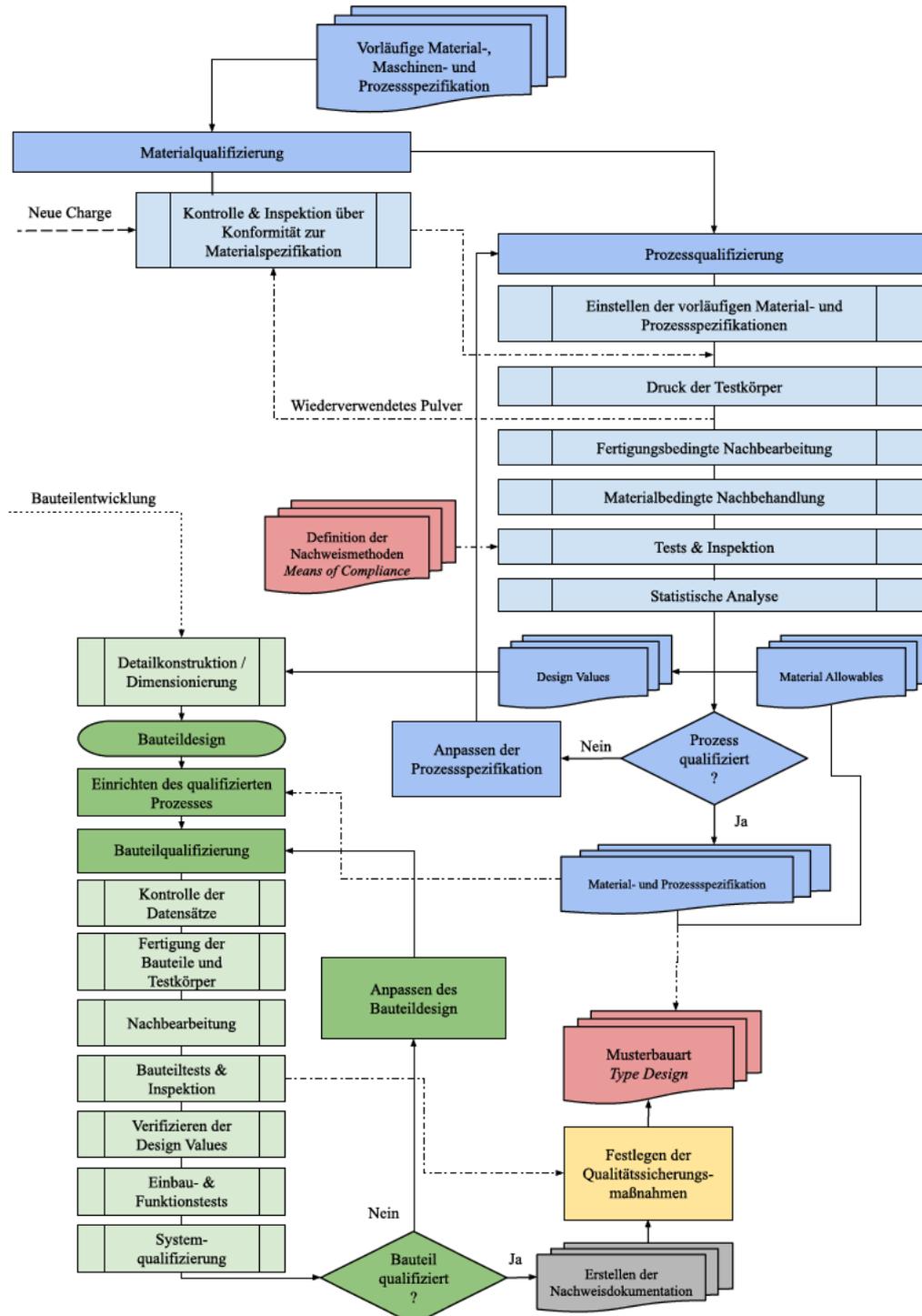
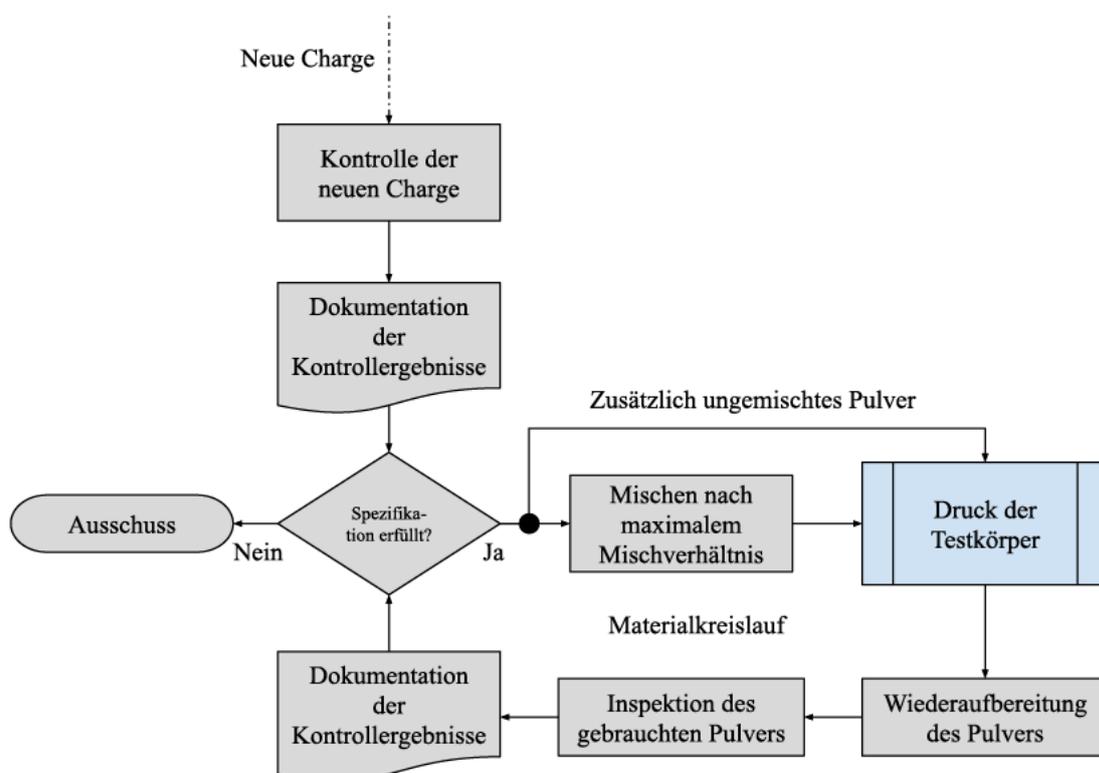


Abbildung 7.4 Ablauf der Verifizierungsphase des AM Zulassungsprozesses

### 7.4.1 Materialqualifizierung

Die Materialqualifizierung beschränkt sich hier, wie auch schon bei der Entwicklung, auf das Ausgangsmaterial, also auf das Metallpulver. Es ist festzustellen, dass das Pulver stetig der vorläufigen Spezifikation entspricht, um gleiche Ausgangsbedingungen für die Prozessqualifizierung zu wahren. Das Pulver ist eine große Quelle für Variation und hat dementsprechend große Auswirkungen auf den Prozess. Das Maß an nötiger Kontrolle wird sogar durch eine mögliche Wiederverwendung des Pulvers noch vergrößert. Die Wiederverwendung ist in Anbetracht der hohen Fertigungskosten von AM unumgänglich bei der Etablierung einer Serienproduktion. Je nach Ausnutzung des Bauraums wäre eine große Menge von nicht aufgeschmolzenem Pulver ein ähnlich hoher Materialausschuss wie beispielsweise bei subtraktiven Verfahren zu erwarten. Dies würde einen großen Vorteil von AM torpedieren. Deshalb wird in diesem Prozess eine Wiederverwendung des Pulvers berücksichtigt.

Das Verfahren wurde in **Abbildung 7.5** anhand eines Flussdiagramms dargestellt. Es folgen dazu erläuternde Worte. Für den Druck der Testkörper werden zwei Quellen bezogen. Neue Chargen, die nach erfolgreicher Überprüfung der Konformität zur Fertigung freigegeben werden, und ein gewisser Anteil von wiederverwendetem Pulver. Die genaue erlaubte Zusammensetzung der Mischcharge muss in der Entwicklungsphase bestimmt und in der vorläufigen Materialspezifikation genannt werden. Ebenso sind dort die Toleranzen der Pulverkenngößen festzulegen. Doch bevor das Pulver wieder in den Kreislauf eingespeist werden kann, bedarf es einer gründlichen Aufbereitung. Die hierfür nötigen Prozesse, wie z.B. das Heraussieben von aufgeschmolzenen



**Abbildung 7.5** Qualifizierungsablauf eines pulverförmigen Ausgangsmaterials mit Berücksichtigung der Wiederverwendung

Klumpchen, müssen ebenfalls definiert werden. Die Kontrollergebnisse, sowohl des neuen als auch des wiederverwandten Pulvers, müssen stetig dokumentiert werden, damit die Rückverfolgbarkeit gewährleistet werden kann. Im Falle von Fertigungsabweichungen können die Kontrollergebnisse Aufschluss über die Ursache geben. Erfüllt das Pulver nach der Wiederaufbereitung nicht die Anforderungen der Spezifikationen, wird es zum Ausschuss. Neben den Mischchargen sollten zusätzlich ungemischte Chargen zur Fertigung der Testkörper verwendet werden. Dadurch können unentdeckte Einflussgrößen des Pulvers in der Prozessqualifizierung berücksichtigt werden.

Die Qualifizierung des Ausgangsmaterials hängt damit sehr stark von der Kontrolle und Inspektion der neuen Chargen bzw. des gebrauchten Pulvers ab. Die zu kontrollierenden Eigenschaften müssen definiert werden. Zudem bedarf es Toleranzbänder, innerhalb derer das Pulver abweichen darf. Einige mögliche zu inspizierende Eigenschaften werden hier aufgeführt:

- Partikelgrößen
- Partikelverteilung
- Morphologie
- Chemische Zusammensetzung
- Reinheit
- Fließverhalten
- Streufähigkeit
- Klopf- und Schüttdichte

Weitere, nicht direkt zum Prozess gehörende, aber trotzdem zu überwachende Aspekte decken die Handhabung des Pulvers ab. Dazu gehört hauptsächlich die Logistik, also Lagerung und Transport. Zwischen den Prozessschritten wird das Pulver entweder in die Maschine oder aus ihr heraus transportiert. Hier muss stetig auf die Vermeidung von Kontamination geachtet werden. Ein Behälter mit Pulver, der beispielsweise offen in der Fertigungshalle steht, läuft Gefahr, mit Fremdmaterial in Kontakt zu kommen. Geschieht dies z.B. nach der Kontrolle auf dem Weg zur Maschine, so kann dies nicht mehr detektiert werden und führt zu Fehlern beim Druckprozess. Die Lagerung muss mit vorgegebenen Umgebungsbedingungen ebenfalls spezifiziert werden.

#### **7.4.2 Prozessqualifizierung**

Mit dem zum Teil qualifizierten Ausgangsmaterial und der vorläufigen Spezifikation erfolgt zunächst die Prozessqualifizierung. Diese ist eine Kombination aus Material- und Maschinenqualifizierung mit zusätzlicher Qualifizierung der Nachbehandlung. Die Prozessqualifizierung beinhaltet demnach alle Prozessschritte, die zur Fertigung des Bauteils (hier Prüfkörper) durchlaufen werden. Die drei Hauptschritte umfassen die Fertigung der Prüfkörper, die anschließenden Tests und Inspektionen sowie die statistische Auswertung der quantitativen Testergebnisse. Jeder Schritt wird einer eigenen Qualifizierung unterzogen und anhand der Prüfkörper in einer kollektiven Prozessbetrachtung verifiziert. Die besondere Herausforderung bei AM ist die Komplexität der Zusammenhänge zwischen In- und Output, denn dazwischen befinden sich eine Vielzahl von Prozessparametern, deren Auswirkungen es in der Entwicklungsphase zu ergründen galt. Diese getroffenen Maßnahmen müssen in dieser Phase verifiziert werden. Eine große

Schwierigkeit dabei ist die Tatsache, dass die schiere Menge an möglichen Kombinationen aus Prozessparametern es unmöglich macht, Auswirkungen dieser isoliert zu betrachten. Es könnte immer nur so vorgegangen werden, dass die Veränderung einer Auswirkung im Kontext aller anderen Parameter bewertet wird, da sich die Parameter untereinander in einer höchst komplizierten Art und Weise beeinflussen. Die gesamte Prozessqualifizierung muss deshalb stetig unter identischen Bedingungen stattfinden und die Parameter müssen vor der Prozessqualifizierung „eingefroren“ werden. Werden die Prozessparameter verändert, oder hat ein Ereignis Einfluss auf den Prozess, so muss die Prozessqualifizierung unter Umständen wiederholt werden. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass eine Prozessqualifizierung immer nur für eine bestimmte Material-Maschinen-Kombination gilt.

#### 7.4.2.1 Fertigung der Testkörper

Die Fertigung der Testkörper umfasst das Einrichten der in den Spezifikationen eingefrorenen Einstellung, den Druck der Testkörper, die fertigungsbedingte Nachbearbeitung und eine mögliche Nachbehandlung. Der Ablauf der Testkörperfertigung ist in **Abbildung 7.6** zu sehen. Ausgehend von der in Kapitel 7.3 beschriebenen Unterscheidung zwischen neuem Pulver und Mischpulver wird der Druckvorgang mit dem Ausgangsmaterial versorgt. Dies muss unterschieden werden, damit der Einfluss einer Pulvermischung in den Testkörper einfließt. Auf der linken Seite,

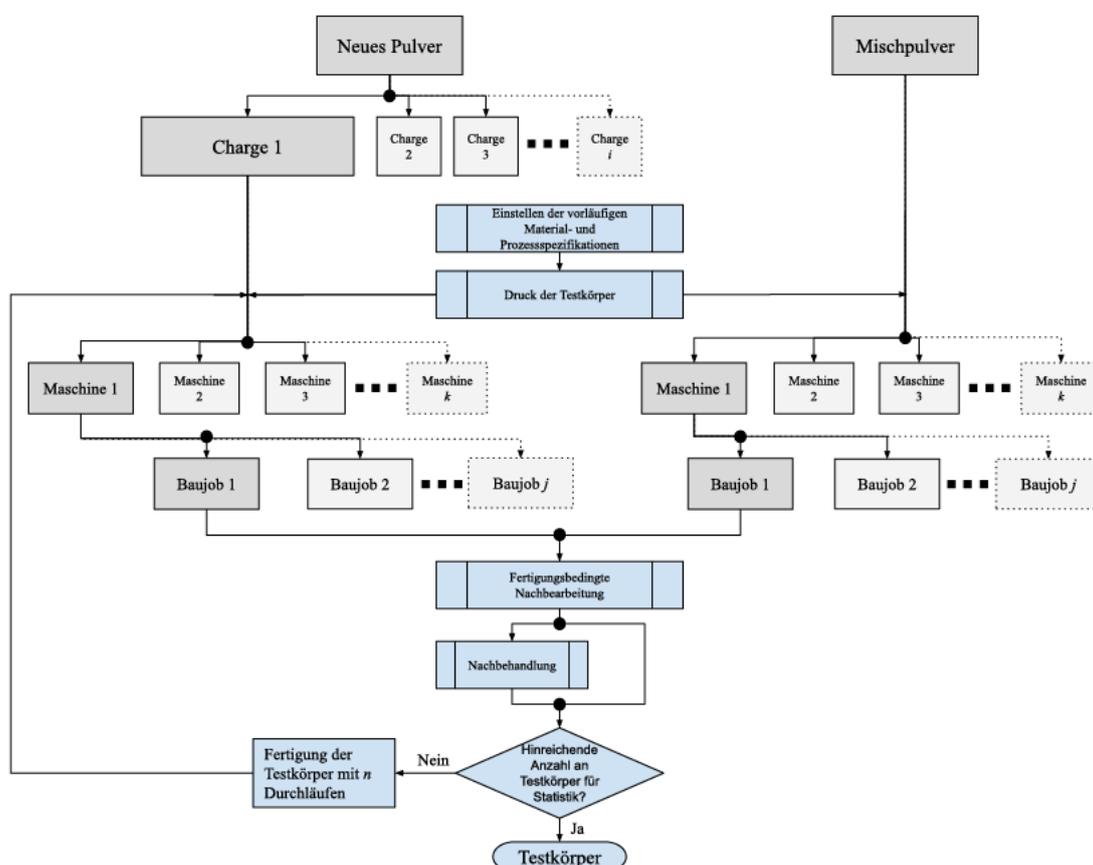


Abbildung 7.6 Ablauf der Testkörperfertigung mit verschiedenen Pulverchargen, Maschinen und Baujobs

dem Pfad des neuen Pulvers, muss zusätzlich in verschiedene Chargen unterschieden werden. Es werden mindestens 3 verschiedene Chargen vorgeschlagen. Damit sollen die Herstellungsunterschiede des Pulvers, die in der vorläufigen Materialspezifikation berücksichtigt wurden, prozessbasiert verifiziert werden. Damit ist die Prozessqualifizierung ein Teil der Qualifizierung des Ausgangsmaterials, da nur hier die Fertigungsunterschiede deutlich gemacht werden können, während in der vorgelagerten Materialqualifizierung nur das Pulver als solches untersucht werden konnte. Wie bei allen weiteren Ebenen sind aber auch mehr Chargen, Maschinen oder Baujobs möglich, um die statistische Signifikanz der Materialkennwerte erreichen zu können und alle möglichen Quellen für Variationen ausreichend abzudecken (angedeutet mit den Parametern  $i$ ,  $k$ ,  $j$ ). Dies ist auch der Grund bei der Unterteilung der Maschinen. Es müssen mindestens drei Maschinen für den Druck der Testkörper zum Einsatz kommen. Jeder dieser drei Maschinen wird wiederum mit mind. vier verschiedenen Pulverquellen versorgt (mind. drei Mal neues Pulver und einmal Mischpulver). Die Maschinen sollten möglichst auch an verschiedenen Standorten innerhalb oder außerhalb der eigentlichen Fertigungsstätte positioniert werden. So werden äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur oder Erschütterungen erfasst, die den Fertigungsprozess beeinflussen. In der Abbildung wurde immer nur ein Pfad gezeichnet. Die anderen Pfade existieren jedoch trotzdem und sind nur der Übersichtlichkeit halber weggelassen wurden. Daraufhin folgt eine weitere Unterteilung in verschiedene Baujobs, in denen die Ausrichtung und Positionierung der Testkörper oder die Art der Testkörper verändert wird. Mit den verschiedenen Ausrichtungen soll eine mögliche Anisotropie im Material berücksichtigt werden. Dies kann bei einem PBF-Verfahren auf zwei verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen die durch die Schichtaufbauichtung verursachte Anisotropie bei Aufbau von Schicht auf Schicht. Zum anderen die durch Schieberichtung des Pulverauftrags verursachte Anisotropie, die das Pulver vor dem Aufschmelzen richtungsabhängig unterschiedlich ausrichtet. Ein Vorschlag für einen Baujob, wird nachfolgend gegeben. Zu diesem Zeitpunkt sind mindestens 24 Baujobs ausgeführt wurden, die jeweils mehrere Testkörper enthalten. Daraufhin müssen diese noch in eine Nachbearbeitung gehen. Diese besteht aus einer fertigungsbedingten Nachbearbeitung und einer, wenn für den Prozess vorgesehen, weiteren Nachbehandlung, wie beispielsweise HIP. Die fertigungsbedingte Nachbearbeitung beinhaltet unter anderem das Entfernen des überschüssigen Pulvers, der Testkörper von der Bauplattform oder der Stützstruktur. Dieser Schritt muss zwangsläufig für jeden Testkörper durchgeführt werden. Anders sieht es bei der weiteren Nachbehandlung aus. Je nach verwendetem Verfahren können hier nur einige der Testkörper nachbehandelt werden, während der andere Teil unbehandelt bleibt. Der bis hierhin beschriebene Ablauf stellt lediglich einen Durchlauf dar. Die Testkörperfertigung muss genauso  $n$ -mal durchlaufen werden, bis eine ausreichende Anzahl jeder Kombination aus Ausgangsmaterial, Maschine und Prozess für eine statistisch signifikante Aussage gefertigt wurde. Mit den in **Abbildung 7.6** genannten Mindestanzahlen von Chargen, Maschinen, Baujobs (mit acht mechanischen Prüfkörpern) und Durchläufen ergeben sich am Ende mindestens

$$(1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 8 + 1 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 8) \cdot n = 192 \cdot n$$

Mechanische Prüfkörper. Wie schon erwähnt, ist es denkbar die Anzahl der Chargen, Maschinen oder Baujobs weiter zu erhöhen, um eine bessere statistische Aussagekraft zu erhalten. Bei beliebiger Anzahl an  $i$  Chargen,  $k$  Maschinen,  $j$  Baujobs und  $n$  Durchläufen ergibt sie die Anzahl der mechanischen Testkörper zu

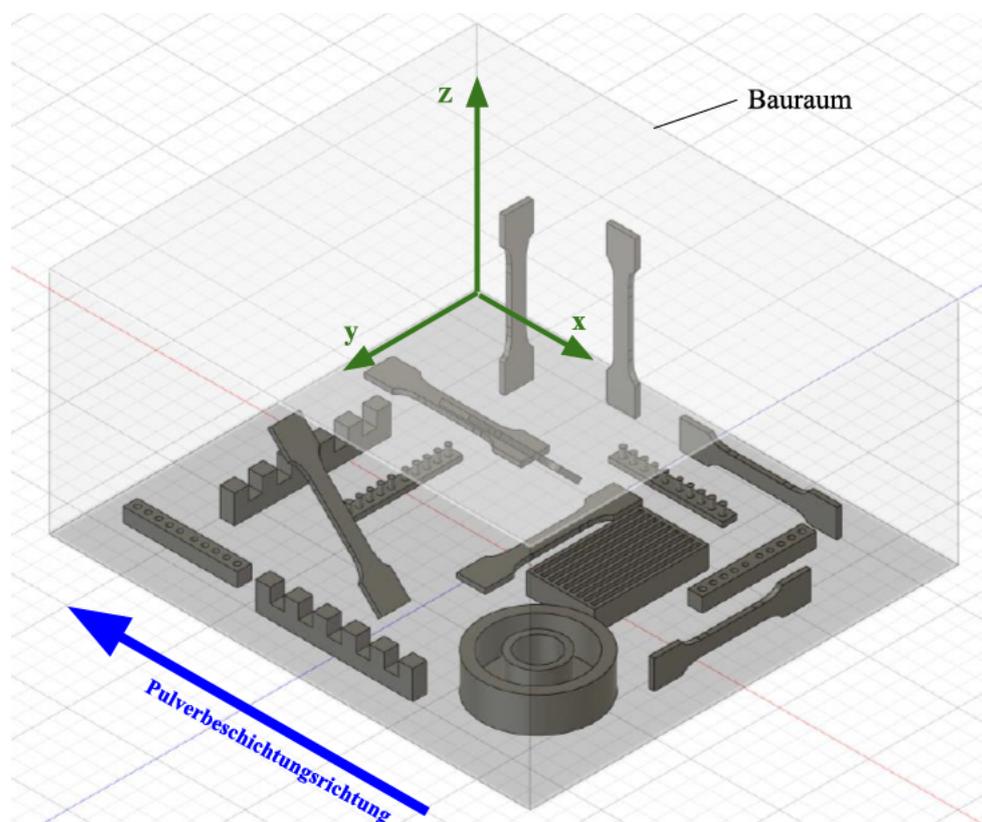
$$8 \cdot k \cdot j \cdot n \cdot (1 + i).$$

Bei der Fertigung der Testkörper sollte entsprechend der in Kapitel 7.4.2.2 genannten Testmethoden in geometrische und mechanische Prüfkörper unterschieden werden. Der additive Fertigungsprozess muss sich entgegen anderer Fertigungstechnologien, wie beispielsweise subtraktive Verfahren, eindringlicheren Prüfungen hinsichtlich der Maßhaltigkeit unterziehen. Für diese Testkörper wird sich auf die Norm ISO/ASTM52902 [46] bezogen, welche Testkörper für eine geometrische Prüfung definiert (siehe Kapitel 4.2.2). Die Testkörper für eine mechanische Prüfung sollten nach DIN 50125 [16] angefertigt werden.

Wie schon in Erfahrung gebracht wurde, spielt die Positionierung und Ausrichtung im Bauraum eine große Rolle. Diese Einflüsse und Varianzen werden im Baujob berücksichtigt. In **Abbildung 7.6** werden mindestens 2 verschiedene Baujobs vorgeschlagen. Ein Vorschlag für ein Baujobanordnung wird in **Abbildung 7.7** gezeigt. Dabei sollten folgenden Punkte, die einen Einfluss haben, immer beachtet werden:

- Positionierung
- Ausrichtung
- Anzahl der Testkörper
- Abstand zueinander

Der Vorschlag für einen Baujob enthält 4 Zugproben, die in X-, Y-, Z- und Z45-Richtung ausgerichtet sind. Diese Ausrichtungen decken alle drei möglichen Koordinatenrichtungen hinsichtlich



**Abbildung 7.7** Vorschlag für einen Baujob zur Fertigung von geometrischen und mechanischen Prüfkörpern für die Prozessqualifizierung mit Berücksichtigung der Pulverbeschichtungsrichtung

der Schichtaufbaurichtung ab und liefern zusätzlich Aussagen über die 45°-Richtung. Dieses Vorgehen ist analog zu dem in der Faserverbundtechnologie. Darüber hinaus wurde diese Ausrichtung nochmals um 90° gedreht, um die Pulverbeschichtungsrichtung zu berücksichtigen, was zu acht Zugproben in Summe führt. Es können ebenso Rundstäbe für die mechanischen Testkörper gefertigt werden. Die geometrischen Testkörper sind in Anlehnung an die ISO/ASTM 52902 dargestellt worden, sollen in der Abbildung aber nur Platzhalter sein. Bei der Positionierung wurde zudem darauf geachtet, dass der Bauraum so gut wie möglich abgedeckt wird, um lokale Unterschiede zu detektieren. Dadurch kommt es teilweise zu sehr engen Abständen zwischen den Testkörpern. Diese Tatsache kann dazu führen, dass im Bauraum unterschiedliche thermische Gegebenheiten vorherrschen. Liegen zwei Bauteile sehr nah nebeneinander, so wird die Abkühlkurve durch ständiges Aufschmelzen umliegender Bereiche abgeflacht, was am Ende zu einem anderen Gefüge führt. Aus diesem Grund kann es nötig sein, zusätzliche Baujobs zu definieren, die eine gegenseitige thermische Beeinflussung ausschließt, indem die Testkörper weiter auseinander angeordnet werden.

Die mechanischen Testkörper können für die Ermittlung der *Material allowables* verwendet werden. Für die Ermittlung der *Design Values* sind diese kaum nutzbar. Die *Design Values* müssen zusätzlich geometrische Gegebenheiten berücksichtigen. Dafür reicht es nicht aus, auf genormte Zugproben zurückzugreifen. Es müssen demnach zusätzlich Testkörper gefertigt werden, die geometrische Details beinhalten und mechanischen Tests unterzogen werden können. Während die Zugproben sich auf der Testpyramide ganz unten befinden, sind diese Art von Testkörpern eine Stufe darüber einzuordnen. Aufgrund der großen konstruktiven, geometrischen Freiheit, die die additive Fertigung mit sich bringt, kann der Umfang der zu testenden geometrischen Details sehr groß werden. Es können dabei Testkörper entwickelt werden, die folgende geometrische Merkmale beinhalten (übernommen aus [59]):

- Dünnwandige Bereiche
- Komplexe Geometrie
- Löcher
- Überhänge (mit vers. Winkeln)
- Bridging
- Kontaktflächen zur Bauplattform
- Schnittpunkte von Stegen
- Flächen zwischen Bauteil und Stützstruktur

#### 7.4.2.2 Tests & Inspektion

Im nächsten Schritt der Prozessqualifizierung muss die Nachweisführung in Form von Tests & Inspektionen der Prüfkörper durchgeführt werden. Die Nachweisführung für AM-Prozesse muss nach dem MoC 4 (*Laboratory tests*) erfolgen. Keine Analyse oder Simulation kann die Variabilität des Prozesses abbilden, deshalb werden aufwendige Prüfungen durchgeführt. **Abbildung 7.8** stellt eine Übersicht der zu testenden Attribute der Prüfkörper sowie der Methoden zusammen. Die Attribute werden zunächst in material- und geometriebasierte Aussagen aufgeteilt. Beim Material müssen zum einen die mechanischen Eigenschaften überprüft werden. Dies beinhaltet die



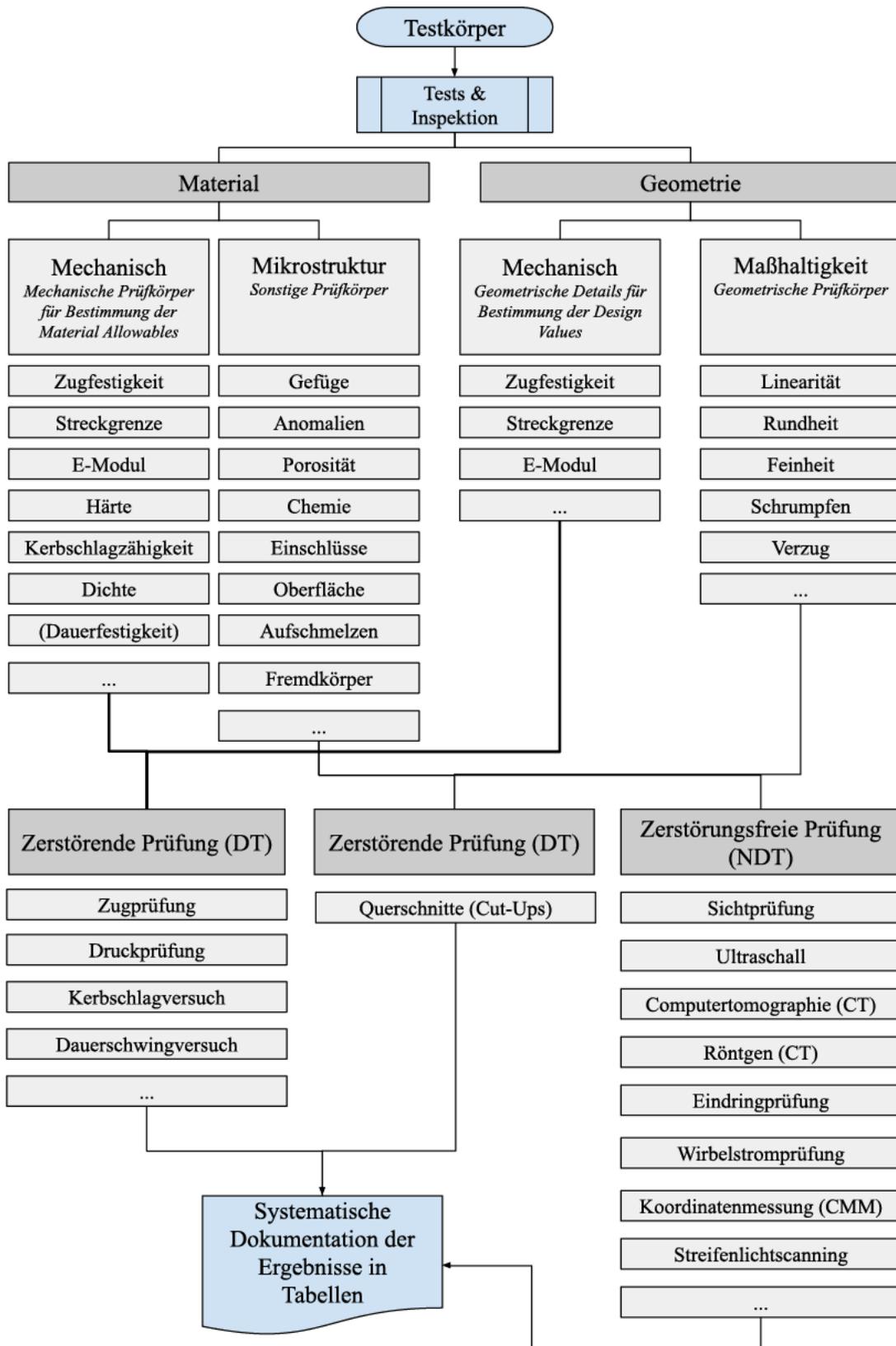


Abbildung 7.8 Testattribute der Prüfkörper und die dabei zu verwendenden Test- und Inspektionsmethoden

### 7.4.3 Bauteilqualifizierung

Die Qualifizierung eines Bauteils setzt zunächst ein finales Bauteildesign voraus. Die Detailkonstruktion und Ausdimensionierung des Bauteils kann bereits parallel zur Prozessqualifizierung stattfinden, sofern schon zu einem frühen Zeitpunkt genügend Materialkennwerte (insbesondere die *Design Values*) bekannt sind, denn auf diese muss zurückgegriffen werden (siehe **Abbildung 7.4**).

Mit dem Start der Bauteilqualifizierung befindet man sich in einer ähnlichen Ausgangssituation wie solche Entwicklungs- bzw. Qualifizierungsvorhaben, die auf bekannte Fertigungstechnologien und/oder auf von der Behörde anerkannte Spezifikationen zurückgreifen. Der bis hierhin bereits benötigte Entwicklungs- und Qualifizierungsaufwand verdeutlicht die angesprochene Zulassungshürde bei AM.

Für den Fall, dass gar keine Bauteilzulassung angestrebt wird, sondern, wie bei Stratasys und NCAMP, nur Spezifikationen für die Umsetzung von Bauteilzulassungen entwickelt werden, wäre der Zulassungsprozess nun am Ende. Allerdings kann man in diesem Fall nicht von einer Zulassung sprechen, weil diese für Spezifikationen nicht erteilt werden kann. Im besten Fall erkennen die Behörden die Nutzung der in der Spezifikation ausgewiesenen Einstellungen, Verfahren und Materialkennwerte für eine Zulassung als AMC an. Sollte dies der Fall sein, muss ungeachtet dessen trotzdem eine verkürzte Prozessqualifizierung durchgeführt werden, die die Konformität zu den Spezifikationen bauteilunabhängig nachweist. Eine beispielhafte Bauteilzulassung wird in Kapitel 8.2 durchgeführt und macht dieses Vorgehen deutlich.



Sollte die Bauteilqualifizierung und -fertigung auf denselben Maschinen stattfinden, die an denselben Standorten wie bei der Prozessqualifizierung stehen, so muss die eben erwähnte verkürzte Prozessqualifizierung selbstverständlich nicht erledigt werden. Allerdings muss vor Beginn der Bauteilqualifizierung sichergestellt werden, dass die in der qualifizierten Prozessspezifikation definierten Bedingungen allesamt zutreffen. Es soll an dieser Stelle nochmals daran erinnert werden, dass eine Qualifizierung nur für einen bestimmten Parametersatz gilt. Daraus folgt die abermalige Notwendigkeit der Überprüfung. Dies wird insbesondere dann äußerst wichtig, wenn zwischen der Prozess- und Bauteilqualifizierung viel Zeit liegt und die Maschine lange Stillstand hatte oder zwischendurch andere Druckaufträge mit anderen Parametern oder gar anderen technischen Komponenten durchgeführt wurden.



Da die additive Fertigung Bauteile automatisch anhand digitaler Daten fertigt, ist dies ein in der Bauteilqualifizierung zu berücksichtigender Aspekt. Dazu gehören nicht nur die CAD-Dateien mit dem Bauteildesign, sondern auch die Konvertierung in das Flächenmodell (STL-Dateien) sowie die anschließenden Schichtdaten aus dem *Slicer*-Programm mit den Maschinenanweisungen. Es sollte sichergestellt werden, dass die Umwandlung dieser Dateiformate keine unvorhergesehenen Informationsverluste der Geometriedaten verursacht. Doch nicht nur die Bauteilgeometrie sollte hinsichtlich Software und Daten beachtet werden. 3D-Drucker kommen obligatorisch mit einer Firmware, die den Drucker ansteuert. Sollte es zu einem unumgänglichen Software-Update der Firmware oder des maschineneigenen *Slicer*-Programms kommen, so muss sichergestellt werden, dass diese keine Auswirkungen auf die in der Spezifikation definierten Prozessparameter hat.

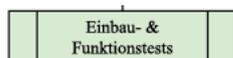


Bei der Fertigung der Bauteile sollten ähnliche Methoden wie bei der Prozessqualifizierung verwendet werden. Der Fokus ändert sich jedoch. Während es bei der Prozessqualifizierung noch um die Nachweisführung eines stabilen Prozesses ging, geht es hier um den Nachweis der Prozesseignung für die Fertigung des Bauteils und natürlich um die Verifizierung des Bauteils selbst. Die Testmethoden und Vorgehensweisen werden später aufgegriffen. Die Ähnlichkeit bei der Fertigung besteht in der Abdeckung der unkontrollierbaren Prozessvarianzen. Trotz eines qualifizierten Prozesses kann es besonders bei AM in der Fertigung des Bauteils zu Abweichungen kommen. Hinzu kommt die Tatsache, dass am finalen Endprodukt, also genau dem Bauteil, welches am Ende ins Flugzeug eingebaut wird, keine zerstörende Prüfung durchgeführt werden kann. Dies ist zwar unabhängig von der Fertigungstechnologie der Fall, allerdings hat dies bei AM besonders große Auswirkungen, da das finale Endprodukt in einem Prozess, z.B. mit einer bestimmten Positionierung und Ausrichtung im Bauraum, nur genau einmal gedruckt werden kann. Natürlich kann der Baujob wiederholt werden, in dem ein Zwillingsbauteil mit derselben Positionierung und Ausrichtung gedruckt wird, jedoch ist dies dann wieder ein anderer Baujob. Das bedeutet beide Bedingungen können nicht gleichzeitig erfüllt werden. Deshalb läuft es in der Serienproduktion, also im Anschluss der Zulassung in der Validierungsphase, auf die parallele Fertigung mehrerer Bauteile und Prüfkörper hinaus, die im selben Baujob mitgefertigt werden und anschließend zerstörend geprüft werden. Dann werden die Ergebnisse der zerstörenden Prüfung der „Opferbauteile“ mit einer bestimmten statistischen Signifikanz auf das in das Flugzeug einzubauende Bauteil übertragen. Inwiefern dieser Schluss zulässig ist, muss in der Bauteilqualifizierung geklärt werden. Dafür muss in diesem Schritt eine Definition des Baujobs vorgenommen werden. Diese muss die genaue Anzahl aller Bauteile und Testkörper sowie deren Ausrichtung und Positionierung im Bauraum enthalten, wobei die Ausrichtung des Bauteils durch die richtungsabhängigen Materialkennwerte gesteuert werden muss und schon in der Dimensionierung festgelegt werden sollte. Ein Problem kann sein, dass die Größe des Bauteils keine weiteren „Opferbauteile“ im Bauraum zulässt. In diesem Fall müssen andere Methoden erdacht werden, die hier nicht weiter ausgeführt werden. Zum Fertigungsprozess gehört die Nachbehandlung, bestehend aus fertigungsbedingter Nachbearbeitung und Nachbehandlung zur Veränderung der Materialeigenschaften. Es ist denkbar, eines der Opferbauteile nicht nachzubehandeln, um mögliche Varianzen in diesem Prozessschritt zu erfassen. Werden alle Bauteile nachbehandelt und es werden Mängel festgestellt, könnte dies einen Rückschluss auf die Ursache verhindern.

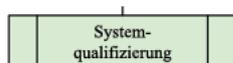


Die Bauteiltests & Inspektionen werden, wie in der Prozessqualifizierung, in zerstörende und zerstörungsfreie Prüfung unterschieden. Während der Bauteilqualifizierung werden die Bauteile und Prüfkörper allesamt zerstörend und zerstörungsfrei geprüft. Die zerstörende Prüfung zielt darauf ab, die *Design Values* zu verifizieren sowie die Schwankungen der mechanischen und mikrostrukturellen Attribute unter den Bauteilen zu erfassen, um damit den Schluss von „Opferbauteilen“ auf die Einbauteile zu verifizieren. Die zerstörungsfreie Prüfung zielt auf dieselben Attribute ab, wie schon in der Prozessqualifizierung (siehe **Abbildung 7.8**). Die Maßhaltigkeit kann hier, genau wie in der Validierungsphase, ohne Probleme zerstörungsfrei an allen Bauteilen durchgeführt werden. In diesem Fall würde es sogar ausreichen, die Maßhaltigkeit nur an den einzubauenden Bauteilen zu

überprüfen. Alle in dieser Phase durchgeführten Tests sind als MoC 4 (*Laboratory Tests*) einzuordnen, da diese an Prüfständen in Laboren durchgeführt werden. Eine mögliche Nachweisführung mittels MoC 8 (Simulation), wie z.B. die Berechnung der Bauteilspannungen mittels FEM, wird an dieser Stelle nicht in Betracht gezogen. Mit einer Berücksichtigung der richtungsabhängigen Materialwerte, wie in der Faserverbundtechnologie üblich, die in das FE-Programm eingespeist werden könnten, wäre die Umsetzung durchaus denkbar. Dieser Prozess geht jedoch von einer Ausgangslage ohne vorhandene Material- und Prozessspezifikationen aus, was eine initiale Betrachtung durch Simulation unrealistisch macht. Mit wachsender Erfahrung und Erkenntnissen sowie einem zugelassenen FE-Programm wäre dies vielleicht realisierbar.



Nachdem das Bauteil bis hierhin erfolgreich isoliert den Qualifizierungsprozess durchlaufen hat, müssen im nächsten Schritt Tests im eingebauten Zustand durchgeführt werden. Diese Tests sind als *Equipment Qualification* (MoC 9) einzuordnen und zielen darauf, das ordnungsgemäße Funktionieren des Bauteils im Kontext des Flugzeugs zu verifizieren. Dafür ist es nicht zwangsläufig nötig, das Bauteil in das Flugzeug selbst einzubauen und mit Flugtests die Lasten zu erzeugen. Hierfür gibt es eigene Testzentren, die entsprechende Aufbauten besitzen, um diese Tests adäquat durchzuführen. Diese Tests müssen bei Weitem nicht in dem Umfang wie die Bauteil- oder Prüfkörpertests durchgeführt werden. Hier wird auf die Testpyramide verwiesen. In diesem Prozessschritt wurden keine speziellen Vorgehensweisen für AM identifiziert.



Zum Schluss bleibt noch die sogenannte Systemqualifizierung, die, ähnlich wie der vorherige Schritt, eine Betrachtung im Kontext des Flugzeugs vorsieht. Hierbei geht es jedoch nicht um eine physische Prüfung o.Ä., sondern um eine rein theoretische Betrachtung zur Ausfallwahrscheinlichkeit des Bauteils sowie die daraus entstehenden Folgen. Da sich dieser Prozess auf unkritische Bauteile beschränken soll, wird hier pauschal angenommen, dass ein Ausfall des Bauteils keinen Einfluss auf die Sicherheit des Flugzeugs hat oder maximal keinen signifikanten Einfluss hat.

Falls einige Aspekte bzgl. der Bauteilqualifizierung noch nicht klar sind, wird auf Kapitel 8 verwiesen, in dem die Bauteilzulassung isoliert betrachtet und anhand eines Beispiels erläutert wird.

## 7.5 Validierungsphase

Mit erfolgreichem Abschluss der Bauteilqualifizierung, Einreichen der Nachweisdokumentation, Erstellen des *Type Design* und der abschließenden Ausstellung der Musterzulassung durch die Behörde ist der Zulassungsprozess abgeschlossen. Damit jedes gefertigte Bauteil zur Musterbauart konform gefertigt wird, muss zusätzlich ein *Quality Plan* erstellt werden, welcher die qualitätssichernden Maßnahmen festlegt. Diese Maßnahmen umfassen die der Bauteil- und Prozessqualifizierung in einem deutlich geringeren Umfang.

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, werden bei der Fertigung eines Bauteils parallel weitere „Opferbauteile“ gedruckt, die zerstörend geprüft werden. Anhand der Testergebnisse der zerstörten Bauteile wird dann auf die Konformität des einen Bauteils geschlossen. Die zusätzlich zu druckenden Prüfkörper sollten für spätere Tests aufgehoben werden. Sie geben die

Möglichkeit, lange nach dem Fertigungsprozess Informationen zu diesem speziellen Baujob zu erhalten. Außerdem sollten alle in der Verifizierungsphase angewandten zerstörungsfreien Inspektionsmethoden am finalen Bauteil angewendet werden (siehe **Abbildung 7.8**). Auf Bauteilebene muss ebenso die vorgesehene Funktionalität jedes finalen Bauteils validiert werden, sofern dieses Bauteil eine zusätzliche Funktion erfüllen muss. Weitere Aspekte müssen im Quality Plan berücksichtigt werden:

- Die Prozessparameter müssen stetig überwacht und eingehalten werden
- Festlegen von Abbruchbedingungen für eine erneute Prozessqualifizierung
- Durchführen regelmäßiger Kalibrierungen
- Bedienung durch qualifiziertes Personal

---

## 8 Anwendung als Bauteilzulassung

In diesem Kapitel soll der zuvor erarbeitete generische AM Zulassungsprozess zunächst in eine isolierte Bauteilzulassung bei bereits vorhandenen und von der Behörde anerkannten Material-, Maschinen- und Prozessspezifikationen angepasst werden, bevor dieser bei einer Beispielzulassung eines Flugzeugstrukturbauteils angewendet wird.

In den einleitenden Worten zu dieser Arbeit wurde die Problematik der aktuellen AM Situation in der Luftfahrt erläutert. Es sind kaum öffentlich zugängliche Spezifikationen oder Standardisierungen für AM vorhanden. Das bedeutet, diese müssen für ein Entwicklungsvorhaben eigenständig entwickelt werden. Das Vorgehen wurde bei der Zulassung mit integrierter Entwicklung einer Spezifikation in Kapitel 7 gezeigt. Für den Fall vorhandener Spezifikationen vereinfacht sich der Zulassungsprozess enorm. Die aufwendige Entwicklungsarbeit und Qualifizierung von Material sowie Prozess nehmen viel Zeit und Geld in Anspruch. Diese Schritte können fast komplett übersprungen werden. In Kapitel 5.3 wurde der NCAMP/Stratasys Zulassungsprozess vorgestellt. Dieser Prozess ist ein exzellentes Beispiel sowohl für funktionierende Prozessstandardisierung als auch das Bereitstellen von Material- und Prozessspezifikationen. Mithilfe einer standardisierten Arbeitsanweisung zur Ermittlung von Spezifikationen (NCAMP-Prozess) hat Stratasys einen FDM-Drucker in Kombination mit einem Polymer erfolgreich spezifiziert, was sich unter anderem Airbus zu Nutze gemacht hat, um Kunststoffbauteile für den Airbus A350 zu drucken und zuzulassen. Auch wenn es sich hierbei um eine kommerzielle Spezifikation handelt, da diese nur auf Produkte von Stratasys anzuwenden ist, zeigt dieses Praxisbeispiel einen Weg in eine Zukunft mit vorhandenen AM-Spezifikationen, wie es bei herkömmlichen Fertigungstechnologien üblich ist. Nichtsdestotrotz stellt AM auch die Bauteilzulassung vor einige neue Herausforderungen. Vor allem für Konstrukteure von AM-Bauteilen ist es aufgrund fehlender Erfahrungen schwierig, die zulassungsrelevanten Aspekte in das Bauteildesign einfließen zu lassen. Dabei stellt sich der Konstrukteur die Frage, inwiefern bestimmte Geometrien vom Prozess realisiert werden können und welche Auswirkungen dies für die mechanischen Eigenschaften hat. Aus diesem Grund soll der AM Bauteilzulassungsprozess aus der Sicht eines Konstrukteurs analysiert werden.

### 8.1 Angepasster Bauteilzulassungsprozess

Der isolierte Bauteilzulassungsprozess unterscheidet sich im Qualifizierungsaufwand wesentlich. Vergleicht man **Abbildung 7.2** und **Abbildung 8.1**, fällt auf, dass der blaue Anteil bei der Bauteilzulassung deutlich weniger geworden ist. Hier ist lediglich eine verkürzte Konformitätsqualifizierung notwendig. Mit deutlich weniger Prüfkörpern, Tests & Inspektionen ist die Spezifikation und damit ein stabiler Prozess nachzuweisen. Die Bauteilqualifizierung hat sich nicht verändert, weshalb diese hier nicht weiter ausgeführt wird.

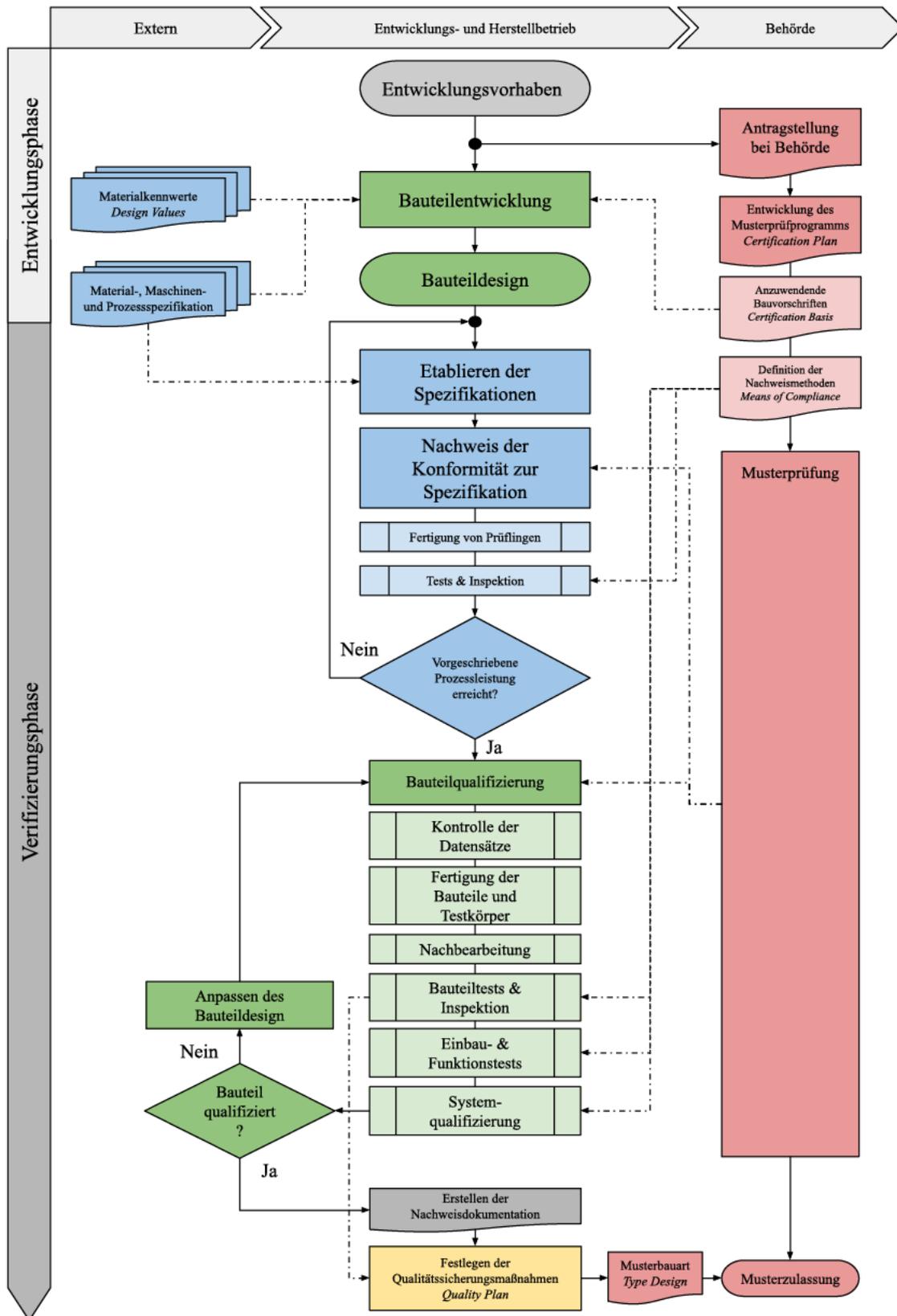


Abbildung 8.1 Ablauf eines AM Bauteilzulassungsprozesses bei vorhandenen Spezifikationen

## 8.2 Beispielzulassung eines Flugzeugstrukturbauteils

Dieses Beispiel dient zur kurzen Verdeutlichung der wichtigen Aspekte einer AM-Bauteilzulassung anhand einiger bauteilspezifischer Herausforderungen. Die meisten Punkte werden nur kurz erwähnt oder gar nicht erst behandelt, weshalb der hier beschriebene Vorgang keine vollständige reale Bauteilzulassung darstellt. Es wird sich dennoch weitestgehend an den in **Abbildung 8.1** beschriebenen Ablauf gehalten.

### 8.2.1 Bauteilinformationen

Der in **Abbildung 8.2** zu sehende Halter (*Bracket*) hat die Aufgabe, ein Galley-Monument an der Primärstruktur des Flugzeugs zu befestigen. Es handelt sich hierbei um ein metallisches Flugzeugstrukturbauteil. Das Bracket wird mit vier Schrauben an der Oberseite des Galley-Monuments verschraubt und mit einem Bolzen beispielsweise am Spant festgehalten. Das Bracket stellt dabei lediglich sicher, dass das Galley-Monument an Ort und Stelle bleibt und beispielsweise während des Fluges nicht umkippt. Da das Galley-Monument ohnehin schon an dem Kabinenboden befestigt ist, muss das Bracket weder hohe statische noch dynamische Lasten ertragen, da die Galley nicht etwa daran aufgehängt wird. Damit ist dieses Bauteil nicht Fatigue gefährdet, weshalb es sich für die additive Fertigung unkritisch eignet. Trotz der geringen Betriebslasten hat das Bracket eine sehr wichtige mechanische Aufgabe. Für den Crashfall muss sichergestellt werden, dass das Bauteil nicht versagt, sodass ein z.B. umgekipptes Galley-Monument nicht die Türen oder Gänge versperrt. Die Erfüllung dieser Aufgabe ist nicht unwesentlich, denn die

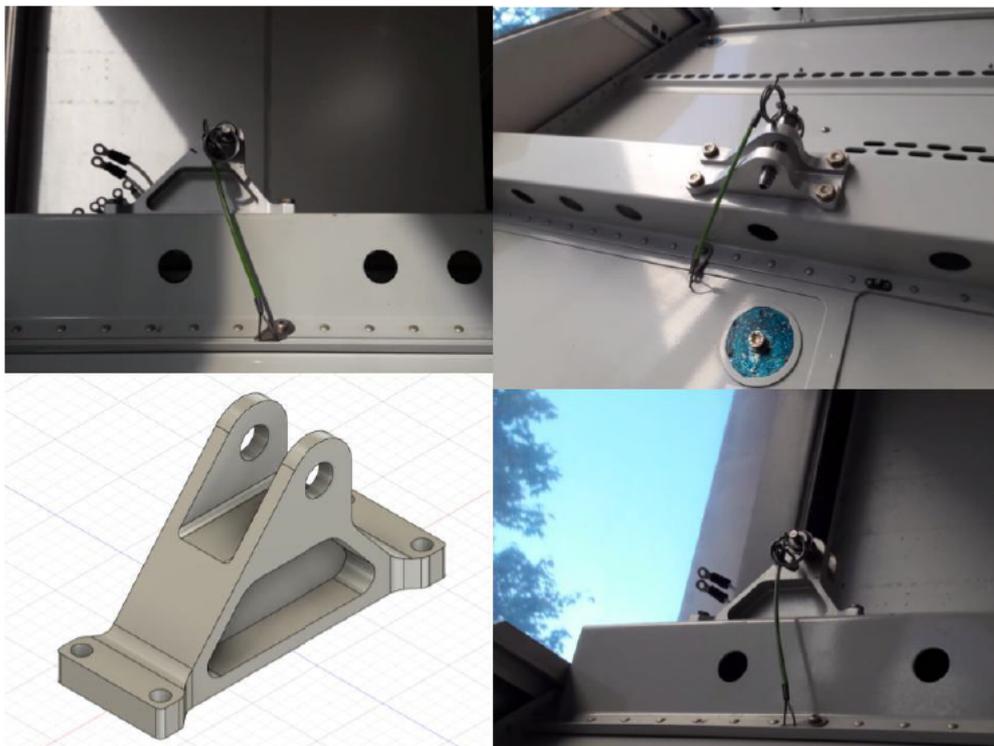


Abbildung 8.2 Galley-Monument-Bracket

auszuhaltenden Crashlasten bei den sogenannten *Emergency Landing Conditions* (ELC) sind relativ hoch, wie später gezeigt wird.

Die Aufgabe ist es demnach, dieses Bauteil für eine additiv Fertigung neu zu designen und zuzulassen. Auch wenn das Bauteildesign unter anderem von den Zulassungsaspekten definiert wird, soll in diesem Fall die Annahme eines bereits vorgegebenen Bauteildesigns getroffen werden. An der Geometrie des Brackets erkennt man, dass dies ein klassisches Frästeil ist, es wurde also subtraktiv gefertigt. Für ein solches Reverse-Engineering Projekt mit AM, wäre es verschenktes Potential, diese Geometrie einfach zu kopieren und additiv zu fertigen. In den meisten Fällen wird eine Topologieoptimierung durchgeführt, die die geometrischen Freiheiten von AM komplett ausschöpft. Wie das Endergebnis einer solchen Topologieoptimierung aussehen kann, zeigt **Abbildung 8.3**. Dieses Bauteil ist ebenfalls ein Bracket und wurde im Rahmen einer Konzeptstudie von Airbus für den *A350 XWB* entwickelt [76]. Nach diesem Schema sollte die Bauteiloptimierung des Galley-Monument-Brackets geschehen. Für diesen Fall wird jedoch die ursprüngliche Geometrie angenommen, die mit einem PBF-Verfahren aus einem beliebigen Metall gefertigt wird. Dabei soll die Fertigung auf einem Drucker stattfinden. Zusätzlich soll das Material mit HIP nachbehandelt werden.

Vorweg ist zu erwähnen, dass dieser Bauteilzulassungsprozess ein Vorschlag für einen möglichen Weg ist. Die Vorgehensweise ist weder bindend, noch wurde diese so erfolgreich durchgeführt. Es sind andere Vorgehensweisen bei der Nachweisführung möglich.

## 8.2.2 Vorqualifizierungsphase

Aufgrund des vorgegebenen Bauteildesigns wird die Entwicklungsphase des Bauteils übersprungen. Es sollte jedoch erinnert werden, dass hier bereits wichtige Prozesse stattfinden. Die Konstrukteure haben das Bauteildesign anhand bestehender *Design Values* und Spezifikationen entworfen. Diese müssen daher Angaben zu den richtungsabhängigen Materialwerten beinhalten, die auch Aufschluss über mögliche Einschränkungen bei bestimmten geometrischen Details geben. Zudem muss daraus klar werden, welche geometrischen Leistungen der Prozess erbringt. So können beispielweise maximale Überhangswinkel, die ohne Stützstruktur gedruckt werden, verwendet werden. Je nach Gegebenheit kann es deshalb dazu kommen, dass das Bauteil nicht wie in **Abbildung 8.2** (unten links) auf der Auflagefläche gedruckt wird, sondern mit einem Winkel zur Bauplattform. Die Sichtweise eines Konstrukteurs bzgl. Design und Zulassung wird in Kapitel 8.3 kurz behandelt.



Nachdem das Entwicklungsvorhaben also klar definiert ist, kann die Antragsstellung bei der Behörde erfolgen. Dies sollte im Rahmen eines *Minor Change* passieren, da diese Änderung keinen wesentlichen Einfluss auf die Masse oder Massenverteilung des Flugzeugs hat. Auch wenn ein mit AM gefertigtes Bauteil meist mit einer deutlichen Gewichtseinsparung daherkommt, ist die Änderung im Vergleich zur Gesamtmasse des Flugzeugs marginal und kann in diesem Kontext vernachlässigt werden. Im Allgemeinen wird angenommen, dass diese Änderungen die Lufttüchtigkeit des Flugzeugs nicht berührt.



Abbildung 8.3 Konzeptdesign eines topologieoptimierten bionischen Brackets von Airbus [76]



Im Anschluss daran muss der *Certification Plan* mit der Behörde abgestimmt werden. Dieser beinhaltet zum einen die *Certification Basis* und die *Means of Compliance*. Die CB, also die anzuwendenden Bauvorschriften, müssen schon in die Bauteilentwicklung einfließen. An dieser Stelle werden sie als schon definiert vorausgesetzt und einmal aufgeführt. Es wird der Einbau in ein *Large Aeroplane* geplant, weshalb die CS-25 die anzuwendende Bauvorschrift ist. Zu den ELC schreibt die CS 25.561 grundlegend folgendes vor:

„*The aeroplane, although it may be damaged in emergency landing conditions on land or water, must be designed as prescribed in this paragraph to protect each occupant under those conditions.*“ [17]

Wenn Insassen durch Versagen von Strukturen ernsthaften Verletzungen ausgesetzt sein könnten, sind die in **Tabelle 8.1** aufgeführten richtungsabhängigen Lastvielfachen nach CS 25.561 (b)(3) von der Struktur auszuhalten [17]. Zusätzlich müssen die Lasten bei großen Massen nach CS 25.561(c)(1)(iii) mit einem Sicherheitsfaktor von  $1,33$  versehen werden [17]. Die dadurch entstehenden Lastvielfache sind ebenfalls in **Tabelle 8.1** zu finden. Zusätzlich wird in CS 25.561 (d) vorgeschrieben, dass bis zu den in (b)(3) aufgeführten Lasten, keine Verformung an großen

**Tabelle 8.1** Vorgeschriebene Lastvielfache bei Emergency Landing Conditions nach CS 25.561 [17]

Richtung	Verformung	<i>Upward</i>	<i>Forward</i>	<i>Sideward</i>	<i>Downward</i>	<i>Rearward</i>
Lastvielfaches nach 25.561 (b)(3)	nicht zugelassen	3,0 g	9,0 g	3,0 g	6,0 g	1,5 g
Lastvielfaches nach 25.561 (c)(1)(iii)	zugelassen, kein Versagen	4,0 g	12,0 g	4,0 g	8,0 g	2,0 g

Massen und deren Halterungen zugelassen werden darf, wenn ein Versagen die schnelle Evakuierung der Insassen behindern könnte [17].

Es ist zu erwähnen, dass dies nicht alle für dieses Bauteil anzuwendenden Bauvorschriften sind. Die statischen Lasten z.B. müssen trotzdem nachgewiesen werden, sollen hier aber nicht aufgeführt werden. Außerdem gelten zusätzlich alle in **Tabelle 3.2** genannten Bauvorschriften.

Für die Nachweisführung sollte außerdem in die AMC zu dieser Bauvorschrift geschaut werden. Relevant ist in diesem Fall lediglich der Eintrag zum AMC 25.561 (d):

*„For the local attachments of seats and items of mass it should be shown by analysis and/or tests that under the specified load conditions, the intended retaining function in each direction is still available.“* [17]

Dies besagt, dass die EASA einen Nachweis in Form von Tests oder Analysen verlangt, die beweisen, dass die Struktur die Lastvielfache nach CS 25.561 (b)(3) ohne Verformung erträgt. Dies kann so direkt in die Definition der Nachweisführung übernommen werden. Weitere mögliche Punkte aus diesem Dokument sind in **Tabelle 8.2** zusammengetragen

Es sei hier nochmals erwähnt, dass die statischen Betriebslasten in dieser Betrachtung vernachlässigt werden und sich beispielhaft auf die ELC bezogen wird sowie selbstverständlich auf die AM-spezifischen Material- und Prozessnachweise.

Nachweis der  
Konformität zur  
Spezifikation

Während der Abstimmungsphase kann die Fertigungsstätte schon mit der Etablierung der nach Material- und Prozessspezifikationen geforderten Bedingungen beginnen. Darauf folgt ein obligatorischer Nachweis über die Konformität zu den Spezifikationen, die im Rahmen der Abstimmung über die Nachweismethoden quantitativ bemessen wird. Die Nachweise beinhalten die Fertigung und Tests der Prüfkörper, wie sie in der Prozessqualifizierung in Kapitel 7.4 beschrieben wurde. Allerdings sind die Anzahl der Durchläufe  $n$  viel geringer, weil in diesem Fall keine derartige statistische Signifikanz der Materialwerte nachgewiesen werden muss. Es reicht aus zu zeigen, dass die Maschine diese Werte ebenfalls erreicht.

**Tabelle 8.2** Definition der Nachweisführung des Beispielbauteils

Bauvorschrift	Nachweisführung	Beschreibung
CS 25.603 <i>Materials</i>	AMC 25.603 (b)	Materialspezifikation und Konformitätsnachweis
CS 25.605 <i>Fabrication Methods</i>	/	Prozessspezifikation und Konformitätsnachweis
CS.25.613 <i>Material strenght properties and Material Design Values</i>	AMC 25.613 4.5 / 4.6	Werkstoffhandbücher und Konformitätsnachweis
CS 25.619 <i>Special Factors</i>	/	Zusätzlicher fertigungsbedingter AM Sicherheitsfaktor wird in Testlasten berücksichtigt
CS 25.625 <i>Fitting Factors</i>	/	Zusätzlicher Sicherheitsfaktor für Strukturverbindungen wird in Testlasten berücksichtigt
CS 25.561 <i>Emergency Landing Conditions - General</i>	AMC 25.561 (d)	Labortests (MoC 3) Equipment Tests (MoC 9)

In diesem Fall wird das Bauteil lediglich auf einer Maschine gedruckt, was zusätzlich die Anzahl der Prüfkörper verringert. Es sollen hier insgesamt fünf Durchläufe auf einem Drucker mit drei verschiedenen, nach Spezifikation bezogenen, Pulverchargen und einer Pulvermischung durchgeführt werden. Der Baujob wird wie in **Abbildung 7.7** aufgebaut, um sowohl mechanische als auch geometrische Attribute messen zu können. Dieser Baujob enthält acht Zugproben, von denen jeweils vier in unterschiedliche Schichtaufbauorientierungen und 4 in die beiden Pulverbeschichtungsrichtungen gedruckt werden. Damit ergibt sich die Anzahl der Zugproben zu

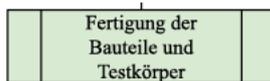
$$8 \cdot k \cdot j \cdot n \cdot (1 + i) = 8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 5 \cdot (1 + 3) = 160.$$

Daraus ergeben sich 20 Zugproben für jede Schichtbau- bzw. Pulverbeschichtungsrichtung. Hinzu kommen die geometrischen Prüfkörper. Im Anschluss daran wird der Großteil der Prüfkörper der vorgesehenen Nachbehandlung mit HIP unterzogen. Damit wird zusätzlich die Konformität zu der Nachbehandlung evaluiert.

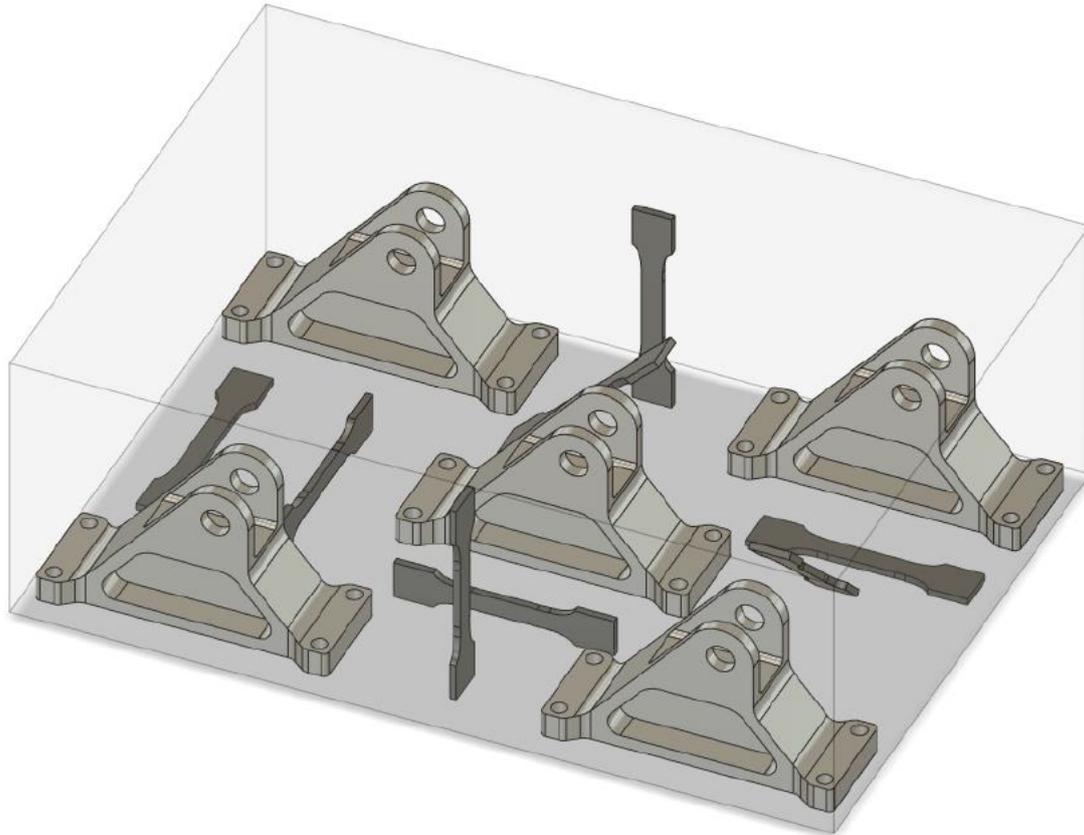
Können die Tests die in der Spezifikation angegebene Prozessleistung reproduzieren, so ist diese Maschine für die Fertigung von Bauteilen qualifiziert. Dieser Schritt muss nicht zwangsläufig nach der Antragsstellung stattfinden. Es reicht aus, wenn diese Nachweise im Rahmen der in der Bauteilqualifizierung zu erbringenden Nachweisdokumentation enthalten sind. In jeden Fall muss der Behörde dieser Schritt nachgewiesen werden.

### 8.2.3 Bauteilqualifizierung

Die an dem Beispielbauteil erläuterte Bauteilqualifizierung soll lediglich die Aspekte ansprechen, die in der allgemeinen Bauteilqualifizierung aus **Kapitel 7.4.3** nicht genannt wurden, sich unterscheiden oder einer besonderen Betrachtung gewürdigt werden sollen.



Die Fertigung der Bauteile für die Bauteilqualifizierung sollte stets mit der im späteren Fertigungsprozess angestrebten Baujobanordnung gedruckt werden. Dies beinhaltet Positionierung, Ausrichtung und Anzahl der Bauteile sowie Prüfkörper. Es wäre nicht ausreichend, lediglich ein Bauteil aus dem Fertigungsbauplan in der Qualifizierung zu drucken, sogar wenn dieses an derselben Position und mit derselben Ausrichtung gedruckt wird. Grund hierfür ist die gegenseitige thermische Beeinflussung umliegender Bauteile und Prüfkörper. **Abbildung 8.4** zeigt eine Beispielanordnung eines Baujobs und verdeutlicht dies. An einigen Stellen kommen sich die Bauteile sehr nah, was dazu führen wird, dass der Laser durch das Schmelzen umliegender Bereiche, die Temperatur im schon gedruckten Bereich beeinflussen wird. Dies kann, aufgrund anderer Abkühlkurven, zu unterschiedlichen Gefügen führen, was grundsätzlich toleriert wird, solange dies in der Qualifizierung genauso berücksichtigt wird, wie es am Ende in der Fertigung umgesetzt wird. Dieses Phänomen könnte umgangen werden, wenn die Bauteile sehr weit auseinander positioniert werden. Das würde allerdings zwei große Nachteile zu Folge haben. Zum einen können dadurch deutlich weniger Bauteile pro Baujob gefertigt werden, was zu höheren Fertigungskosten führt. Zum anderen führt der geringere Anteil an „Opferbauteilen“, die zerstörend geprüft werden, zu einer unzuverlässigeren statistisch basierten Aussage über das Einbaubauteil.



**Abbildung 8.4** Beispiel für eine Baujobanordnung in der Bauteilqualifizierung

Der Baujob in **Abbildung 8.4** enthält fünf Bauteile und acht Prüfkörper. Die Prüfkörper haben die bekannten Ausrichtungen. Es wurde zudem darauf geachtet, dass der Bauraum gleichmäßig ausgenutzt wird. Dadurch wird gleichzeitig gewährleistet, dass die Bauteile den größtmöglichen Abstand zueinander haben. Die Ausrichtung der Bauteile sollte dabei vom Konstrukteur im Bauteildesign vorbestimmt werden, denn diese bestimmt darüber, in welche Richtung die größte Festigkeit erreicht wird. Genauer wird dies in **Kapitel 8.3** erklärt.

Für die anschließenden Bauteiltests werden die Bauteile an einem geeigneten Prüfstand den Lasten aus **Tabelle 8.1** ausgesetzt. Dabei kann es nötig sein, zusätzlich die Sicherheitsfaktoren aus den Bauvorschriften aus **Tabelle 8.2** aufzuschlagen. Hier bedarf es besonders bei den *Special Factors* einer Abstimmung zwischen Antragsteller und Behörde, ob diese Bauvorschrift angewendet werden muss. Dies würde einen zusätzlichen AM Sicherheitsfaktor bedeuten, der ebenfalls auf die Lasten aufgeschlagen werden müsste. Die Bauteiltests haben ansonsten keine besonderen Anforderungen an die Fertigungsmethoden. Es wird hier nur nachgewiesen, dass die gewählte Geometrie, in Kombination mit dem Material, den vorgeschriebenen Lasten standhält. Dafür würde theoretisch schon ein Bauteil zum Testen ausreichen.

Allerdings müssen auch am Bauteil die Prozess- und Materialvarianzen berücksichtigt werden. Obwohl die Material- und Prozessspezifikation, die Materialkennwerte in Form der *Design Values* und die Konformitätsqualifizierung im Rahmen der isolierten Bauteilzulassung bereits die Material- und Prozessstabilität bewiesen haben, können trotzdem bauteilspezifische Varianzen

aufzutreten. Deshalb läuft es bei einer AM-Serienproduktion auf die Fertigung zusätzlicher „Opferbauteile“ hinaus, die zerstörend geprüft werden und deren Ergebnisse auf die anderen in dem Baujob gefertigten Bauteile projiziert werden. Damit werden die Einbaubauteile anhand der „Opferbauteile“ für geeignet oder ungeeignet befunden. Dabei stellt sich lediglich die Frage, wie viele der insgesamt pro Baujob gefertigten Bauteile zerstörend geprüft werden müssen, um mit Sicherheit darauf schließen zu können, dass die anderen Bauteile die gleichen Eigenschaften aufweisen. Die Vorgehensweise zur Ermittlung beginnt in der Bauteilqualifizierung und ist anhand des Beispielbauteils in **Abbildung 8.5** durchgeführt worden. Beginnend bei der Bauteilqualifizierung werden alle fünf Bauteile, die in dem definierten Baujob gedruckt werden, zerstörend geprüft. Gemessen und dokumentiert wird die Bruchkraft für alle nachzuweisenden Richtungen. Dabei sollte sich schon eine kritische Richtung herauskristallisieren, die dann in der Validierungsphase nachgeprüft wird. Zusätzlich werden die Prüfkörper im Zugversuch untersucht, um zusätzlich Aufschluss über die Materialkennwerte zu bekommen. Dieser Vorgang wird während der Qualifizierung mehrmals wiederholt, um eine geeignete Menge an Testergebnissen zu erhalten. Daraus kann eine Standardabweichung errechnet werden, die je nach Prozess, Material und Bauteil größer oder kleiner ausfällt. In **Abbildung 8.5** sind dafür zwei Normalverteilungen mit kleiner und großer Standardabweichung symbolhaft dargestellt. Ganz allgemein soll gelten, je kleiner die Standardabweichung bei den Qualifizierungsbauteilen sind, desto weniger „Opferbauteile“ werden in der Serienfertigung benötigt. Das dafür zu verwendende mathematische Modell, beispielsweise in Form einer Binomialverteilung mit Nullhypotesentest, ist kompliziert und nicht Inhalt dieser Arbeit. In diesem Beispiel wurden willkürlich zwei oder drei „Opferbauteile“ angenommen. Sofern diese Bauteile den nachzuweisenden Lasten standhalten, können die restlichen Bauteile für einen Einbau ins Flugzeug freigegeben werden. Auch wenn die zerstörungsfreie Prüfung in der Abbildung nicht aufgeführt wird, sollte diese an jedem einzubauenden Bauteil durchgeführt werden.

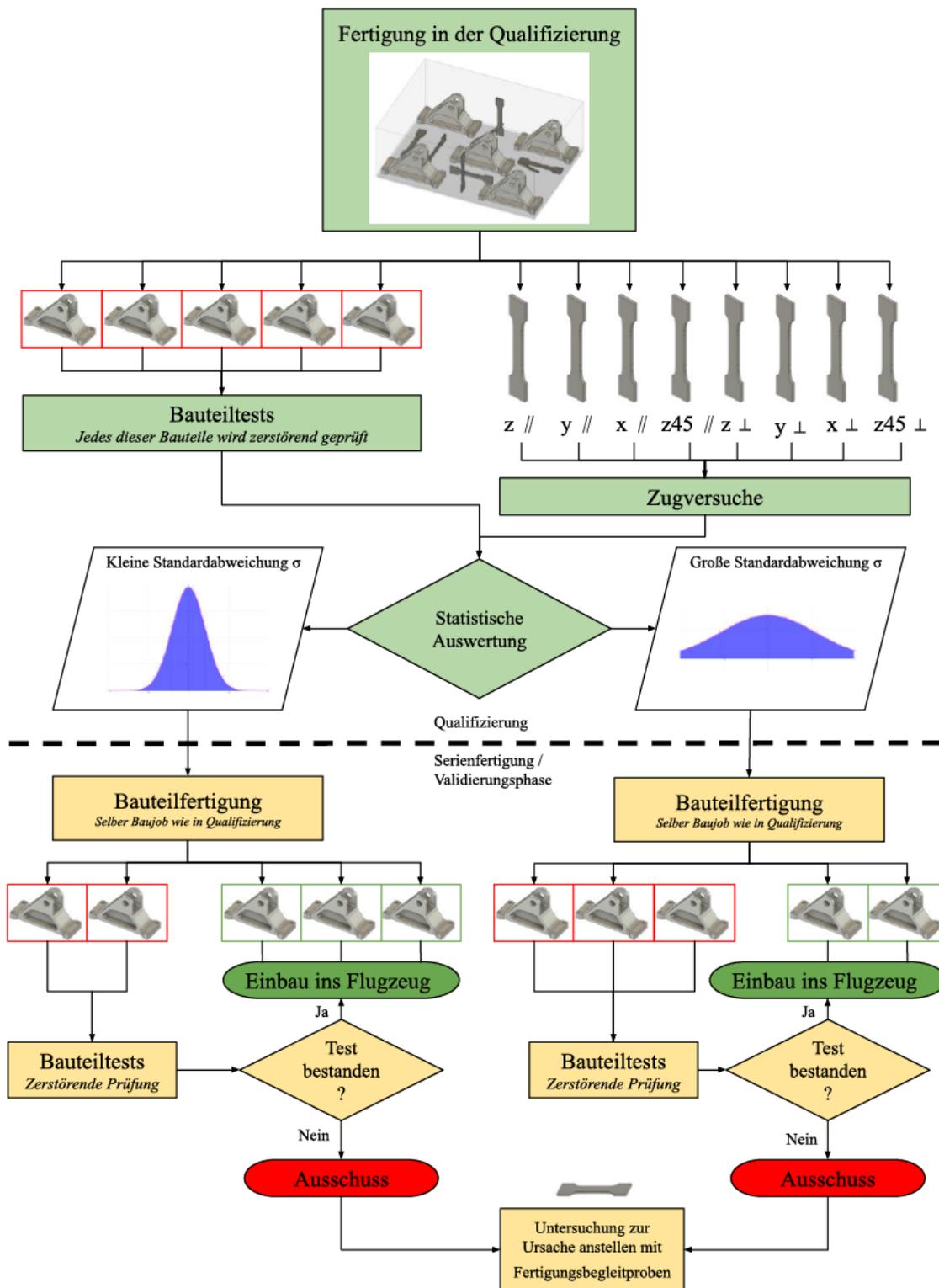
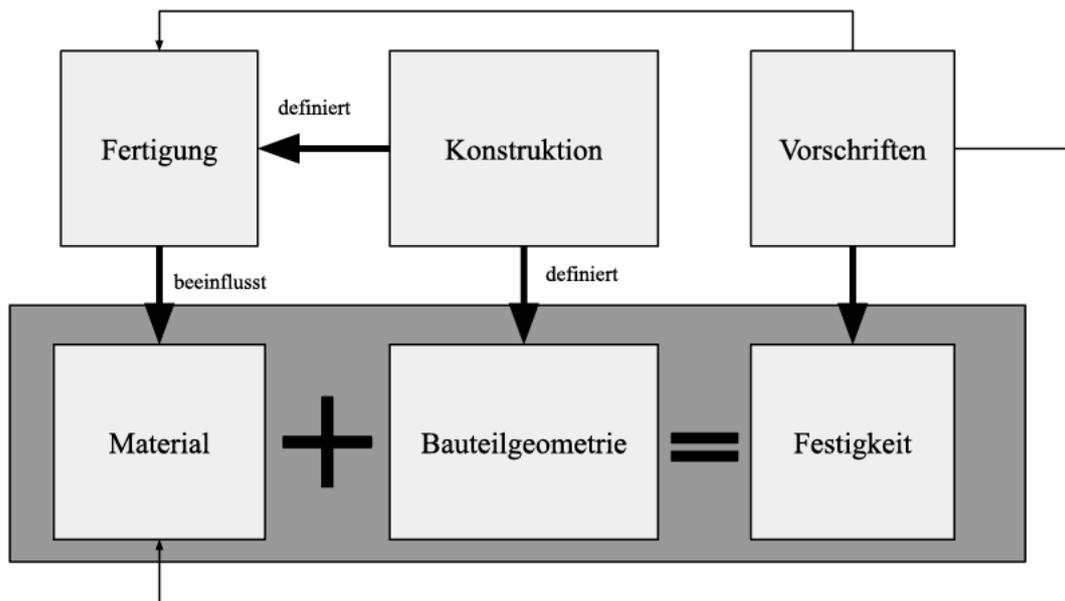


Abbildung 8.5 Vorgehen bei der Bestimmung der Anzahl der Opferbauteile im Fertigungsprozess der Beispielzulassung

### 8.3 Konstruktion von AM-Bauteilen

Die Bauteilzulassung hat einige zulassungsrelevante Aspekte offenbart, die der Konstrukteur bereits in einem frühen Stadium der Bauteilentwicklung festlegen muss. Im Allgemeinen kann man sagen, dass bei AM die Konstruktion, Fertigung und Zulassung viel enger zusammenarbeiten müssen, um ein geeignetes Produkt zu erhalten. Herkömmliche Fertigungsmethoden definieren zumeist die Grenzen der Bauteilentwicklung. Dadurch sind Guss- oder Frästeile beispielsweise meist ohne Wissen über die verwendete Fertigungstechnologie identifizierbar. Bei AM gibt es solche Grenzen kaum. Während das Design bei herkömmlichen Fertigungsmethoden stets ein optimales Mittel zwischen Fertigbarkeit und Funktionserfüllung berücksichtigen muss, kann sich bei der additiven Fertigung fast ausschließlich auf die optimale Funktionserfüllung konzentriert werden. Optimal bedeutet, beispielsweise beim bionischen Bracket von Airbus (siehe **Abbildung 8.3**), die Lastaufnahme bei geringstmöglichem Gewicht. Zusammengefasst bedeutet dies, bei AM bestimmt unter anderem die Konstruktion die Fertigung (siehe **Abbildung 8.6**). Anders als bei herkömmlichen Fertigungsmethoden, wo der Konstrukteur meistens lediglich durch eine diskrete Wahl des Materials die Festigkeit materialseitig beeinflussen kann, ist es bei AM möglich durch die Definition der Fertigung Materialkennwerte kontinuierlich zu beeinflussen. Zusammenfassend heißt das, der Konstrukteur besitzt durch die Definition der Bauteilgeometrie und der Fertigung mehr Verantwortung aber auch mehr Möglichkeiten. Der Konstrukteur muss sich schon bei der Entwicklung im Klaren sein, wie die Fertigung für sein Bauteil konfiguriert wird und nicht wie das Bauteil fertigbar zu konstruieren ist. Dafür benötigt es einige Informationen über den Prozess, die der Konstrukteur idealerweise einer Spezifikation entnimmt. Darauf aufbauend müssen die in **Tabelle 8.3** angegebenen Entscheidungen vom Konstrukteur gefällt werden.



**Abbildung 8.6** Zusammenhänge zwischen Konstruktion und Fertigung bei AM

**Tabelle 8.3** Auflistung der vom Konstrukteur bereits in der AM Bauteilentwicklung festzulegenden Fertigungsparameter

Benötigte Informationen über Prozess	Definition von Baujob, Prozess und Bauteil
<ul style="list-style-type: none"><li>• Materialkennwerte in Abhängigkeit der...<ul style="list-style-type: none"><li>→ Raumrichtungen</li><li>→ Pulverbeschichtungsrichtung</li></ul></li><li>• <i>Design Values</i></li><li>• Bauraummaße</li><li>• Thermische Beeinflussung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bauteilgeometrie</li><li>• Stützstrukturen</li><li>• Anzahl der Bauteile</li><li>• Abstände</li><li>• Ausrichtung</li><li>• Positionierung</li><li>• Nachbehandlung</li></ul>

## 9 Fazit

Eine der größten Erkenntnisse des erarbeiteten Zulassungsprozesses für metallische additiv gefertigte Flugzeugstrukturbauteile ist die Anwendung der von herkömmlichen Fertigungstechnologien bekannten Methoden. Viel weniger als im Vorfeld erwartet, bedarf es keiner besonderer Vorgehensweisen für die Zulassung. Dabei kommt es eher auf geschickte Kombination der vielen bekannten Lösungen anderer Fertigungstechnologien an. Im Laufe der Bearbeitung hat sich dabei das in **Abbildung 9.1** gezeigte Bild über die Sichtweise der Probleme der additiven Fertigung ergeben. Im Grunde kann man viele zulassungsrelevanten Probleme der additiven Fertigung von herkömmlichen Fertigungstechnologien ableiten.

Beim **Gießen** etwa erfolgt die Materialverfestigung, ähnlich wie bei AM, in der finalen Form des Bauteils. Das bedeutet die Geometrie des Bauteils hat einen materialseitigen Einfluss auf die Festigkeit. Wie in **Abbildung 8.6**, ergibt sich die Festigkeit immer aus dem Material und der Bauteilgeometrie. Der Einfluss der Geometrie ist trivial, jedoch beeinflusst beim Gießen oder AM zusätzlich die Wahl der lokalen Materialstärken und Anordnungen die Abkühlkurve. Diese thermische Beeinflussung hat Veränderungen des Materialgefüges zur Folge und muss hinsichtlich der Zulassung beachtet werden. Bei AM muss dies in den *Design Values* berücksichtigt werden, die geometriebasierte Materialkennwerte bestimmen. Hier gibt es auch eine Parallele zu herkömmlichen metallischen Bauteilen. In Werkstoffhandbüchern, wie das MMPDS oder HSB, sind geometriebasierte Materialkennwerte, beispielweise in Abhängigkeit der Blechdicke, üblich. Ein weiteres Beispiel hierfür stellen Frästeile dar, die aus einem vollen Materialblock gefräst werden, welcher bei der Fertigung aufgrund der Massivität im Kern langsamer auskühlt als am Rand des Blocks. Fertigungsbedingte geometriebasierte Materialkennwerte sind demnach nicht nur beim Gießen und AM nötig. Die beim Gießen von den Bauvorschriften auferlegten Sicherheitsfaktoren, sind Hinweise auf einen möglichen zukünftigen Weg für spezielle AM-Bauvorschriften. Auf diese Erfahrungen kann bei AM zurückgegriffen werden. Gießen und AM vereint zudem die häufig auftretenden Materialanomalien in Form von Einschlüssen, Lunkern, Poren oder allgemeinen Oberflächenbeschaffenheiten. Die dafür erprobten NDT Methoden können direkt bei AM angewandt werden.

Was das Gießen hinsichtlich AM nicht abdecken kann, ist der Schmelzprozess des Materials. Zwar müssen beide Fertigungsmethoden das Ausgangsmaterial aufschmelzen, um es in die gewünschte Form zu bringen, jedoch geschieht dies beim Gießen unabhängig vom Bauteil in einer Schmelze, während der Schmelzprozess bei AM unmittelbar am Bauteil stattfindet. Diese Eigenschaft hat AM mit dem **Schweißen** gemeinsam, welches als thermischer Fügeprozess lokale Bereiche direkt am Bauteil aufschmilzt und dadurch zusammengefügt. Die zuvor angesprochenen geometriebasierten Abkühlkurven durch die lokale Materialverfestigung am Bauteil, werden bei

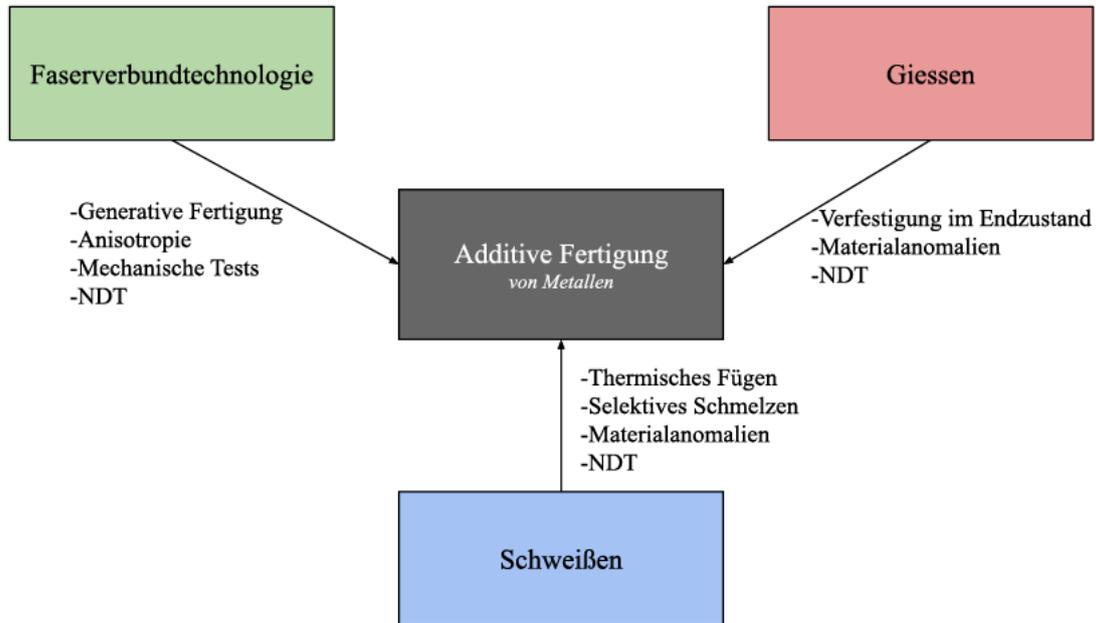


Abbildung 9.1 Zulassungsrelevante Einflüsse anderer Fertigungstechnologien auf die additive Fertigung

Berücksichtigung des bei AM stattfindenden thermischen Fügeprozesses, um diesen Unsicherheitsfaktor erweitert. Bei den entsprechenden Verfahren schmilzt der Laser mit großer Hitze Pulver auf, um es lokal zu verfestigen. Das dadurch bei AM entstehende Problem folgt aus der oftmals parallel stattfinden Fertigung von mehreren Bauteilen in einem Baujob. Das heißt, bei AM reicht es ausdrücklich nicht mehr aus, das Bauteil isoliert zu betrachten. Es muss immer der Baujob in die thermische Vergangenheit des Bauteils einbezogen werden. Beim Schweißen werden ähnliche Betrachtungen angeführt, denn hier verursacht das lokale Aufschmelzen ebenfalls eine ungewollte Wärmebehandlung der umliegenden Bereiche der Schweißnaht. Im Maschinenbau ist es daher üblich, dass in geschweißten Bauteilen veränderte Gefüge in den Materialkennwerten zu berücksichtigen. Bei AM gestaltet sich dies aufgrund der Individualität eines jeden Baujobs und zu vieler gegenseitiger Einflüsse schwierig. Um dies trotzdem in der Qualifizierung zu berücksichtigen, muss die in der Fertigung angestrebte Anordnung des Baujobs verwendet werden. Dass AM Überschneidungen mit dem Schweißen aufweist, wird dadurch bewiesen, dass die *American Welding Society* (AWS) Spezifikationen für AM entwirft (siehe Kapitel 4.1). Ebenfalls ähnlich sind, wie beim Gießen, die Materialanomalien. Ein häufig auftretender Effekt ist beispielsweise der Einschluss von mikroskopisch kleinen Glasblasen, die das Material porös werden lassen. Auch hier können die bewährten NDT Methoden des Schweißens zur Detektion dieser Anomalien verwendet werden.

Die im Vorfeld dieser Arbeit vermuteten Synergien zwischen AM und der FVT haben sich teilweise bestätigt. Die sich durch die Verfahrenstechnik von AM und FVT überschneidende generative Fertigung der Bauteile in Form von einem schichtweisen Aufbau hat einige zulassungsrelevante Ähnlichkeiten zur Folge. Ähnlich wie bei AM hat der Konstrukteur bei FVT die Möglichkeit, die Materialeigenschaften durch die Fertigung aktiv zu beeinflussen. Dies geschieht bei FVT durch die Wahl der Faserrichtungen der verschiedenen Schichten. Bei AM wird dies durch die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum und durch die Geometrie selbst möglich. Beide

Technologien haben eine beabsichtigte oder auch unbeabsichtigte Anisotropie zur Folge. Unabhängig von der Intention des Konstrukteurs muss die Anisotropie im Rahmen der Zulassung in richtungsabhängigen Materialkennwerten berücksichtigt werden. Doch nicht nur bei der FVT ist dies gängige Praxis. Auch wenn die Anisotropie bei herkömmlichen Fertigungsmethoden, beispielsweise von gewalzten Blechen, deutlich schwächer ausgeprägt ist als bei AM und FVT, werden diese in den Materialkennwerten berücksichtigt. HSB und MMPDS berücksichtigen dies mit Werten parallel und senkrecht zur Walzrichtung. Diese Vorgehensweise ist demnach nicht neu und unterstützt die These zur Nutzung altbewährter Methoden bei der Zulassung von additiv gefertigten Bauteilen. Hierfür wird auf die ausführlich erklärte Prüfkörperfertigung hingewiesen. Die Art und Weise der Prüfkörperausrichtung wurde das erste Mal im Rahmen der Vorstellung des NCAMP/Stratasys-Prozesses aufgegriffen und für den eigenen Zulassungsprozess übernommen (siehe **Abbildung 5.13**). Zur Erinnerung: Der NCAMP-Prozess wurde ursprünglich für die Entwicklung von Materialkennwerten von Faserverbundwerkstoffen entworfen und von Stratasys für AM „zweckentfremdet“. Eine Möglichkeit der Übertragung von Prozessen der FVT auf AM ist demnach grundsätzlich möglich. Dabei sollte sich allerdings – zumindest bei metallischen Werkstoffen - bei der Adaptierung auf ein PBF-Verfahren auf die Anisotropie beschränkt werden. Dies beinhaltet die Vorgehensweisen bei der Fertigung und den Tests der Prüfkörper. Nimmt man nun noch die bei der FVT üblichen NDT Methoden dazu, erhält man vier Aspekte, die von der Zulassung der FVT auf AM übertragen werden können.

Zusammenfassend bietet FVT demnach die Möglichkeit, einige ausgewählte bewährte Verfahren, die hier genannt wurden, auf AM zu adaptieren. Damit unterscheidet sich die FVT allerdings nicht von den anderen herkömmlichen Fertigungstechnologien, denn diese haben ebenfalls bewährte Methoden, die teilweise uneingeschränkt auf AM übertragbar sind. Besonders das Gießen stellte sich während der Recherche als eine deutlich geeignetere Quelle für eine Verfahrensadaptation heraus. Im Vorfeld dieser Arbeit wurde jedoch fälschlicherweise ein größerer Zusammenhang zwischen AM und FVT vermutet, weshalb der Schwerpunkt dahingehend zunächst gesetzt, dann während der Bearbeitung aber wieder teilweise verworfen wurde. Abschließend kann also entsprechend **Abbildung 9.1** festgehalten werden, dass die Zulassung additiv gefertigter Metallbauteile auf Methoden mehrerer herkömmlicher Fertigungsmethoden zurückgreifen kann, ohne sich auf eine beschränken zu müssen. AM kann demnach, bezogen auf die Zulassung, als eine Kombination ausgewählter Aspekte der Faserverbundtechnologie, des Gießens und des Schweißens angesehen werden.

Nichtsdestotrotz hat AM Eigenheiten, die von keiner anderen Fertigungstechnologie geteilt werden. Dazu zählt die enorm hohe Prozessinstabilität, die in einem bisher nicht bekannten Maß auftritt. In der Einleitung wurde dahingehend von nicht vorhandenem Determinismus gesprochen. Es wurde versucht, diese Varianz in jedem Prozessschritt zu berücksichtigen, sodass am Ende ein konformes Bauteil gefertigt und zugelassen wird. Die dafür aufgeführten Methoden sind teilweise sehr aufwendig und kostspielig. Es müssen beispielsweise viele Bauteile zerstörend geprüft werden, um die Konformität anderer Bauteile zu verifizieren. Auch wenn dies eine sichere Methode für die Einhaltung der Konformität ist, dürfte sie hinsichtlich der hohen Kosten praxisfern sein. In Zukunft muss daher Ziel sein, diesen Aufwand mithilfe von besseren Methoden zu minimieren. Eine Möglichkeit zur Minimierung sind AM-Simulationsprogramme oder angepasste FEM-Berechnungen.

Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Zulassungsprozess beruht auf Informationen aus dreierlei verschiedenen Quellentypen. Dies sind, wie schon in der Einleitung beschrieben, die Vorschriften, Standardisierung und praktizierten Zulassungsprozesse. Die Vorschriften und Standardisieren sind in dem meisten Fällen öffentlich zugänglich, während Informationen über praktizierte Zulassungsprozesse von den Unternehmen der Luftfahrtindustrie weitestgehend zurückgehalten werden. Der Grund hierfür ist ein wettbewerblicher Vorteil, den sich die Unternehmen durch die Zurückhaltung des firmenexklusiven Wissens versprechen. Dies führt zwangsläufig zu einer Fragmentierung der vorhandenen Erkenntnisse im „Pool“ der Luftfahrtindustrie. Viele Unternehmen arbeiten parallel an denselben Fragestellungen. Die Konsequenzen daraus sind unterschiedliche Ansätze bei der Problembewältigung. Unterschiede in der Verfahrenstechnik oder Bauteil-anwendung können soeben Grund für verschiedene Ansätze sein. Jedoch hat sich herausgestellt, dass die grundsätzliche Vorgehensweise eines Zulassungsprozesses, um die es primär in dieser Arbeit ging, nicht großartig von der verwendeten Verfahrenstechnik oder dem Material abhängt. All diesen Verfahren liegt hinsichtlich der Zulassung das Problem der Prozessinstabilität zu Grunde. Dies folgt aus der grundsätzlichen Natur eines generativen Fertigungsverfahrens mit dem sukzessiven Auftragen von Material. Die Differenzen der praktizierten Zulassungsprozesse ergaben sich demnach nicht einzig aus den unterschiedlichen Ausgangslagen, sondern aus den unterschiedlichen Herangehensweisen sowie den maschinen- und prozessspezifischen Prozessparametern. Möglich machen das die Zulassungsvorschriften, in denen weder explizite Bauvorschriften noch Nachweisverfahren für Fertigungsmethoden vorgegeben werden. Jedes Unternehmen kann eigene Verfahren zur Nachweisführung anwenden. Das Problem der Informationsfragmentierung aus der Luftfahrtindustrie spiegelte sich demnach auch in der Recherche und Erstellung dieser Arbeit wider. Es bedeutet nicht unbedingt, dass nicht genügend Informationen recherchierbar waren, sondern dass die recherchierbaren Informationen meist nur in kleinem Umfang zu dem jeweiligen Kontext verfügbar waren. Daraus folgte eine große Menge an kleinen Informationsfragmenten aus aller Art von Zulassungsprozessen. In den Kontext von **Abbildung 1.2** eingeordnet, kann man bildlich gesprochen sagen, dass die Puzzleteile sehr klein und fragmentiert waren und ein geeignetes Zusammensetzen dadurch erschwert war. Um in dieser Anschauung zu bleiben, könnte man daher sagen, dass sich bei der Ausarbeitung des Zulassungsprozesses auf die großen Puzzleteile konzentriert wurde. Die in Kapitel 5 vorgestellten Prozesse wiesen allesamt eine hohe Informationsdichte auf und ließen dadurch plausible Schlüsse innerhalb des eigenen Kontextes zu, die dann wiederum für den eigenen Zulassungsprozess verwendet werden konnten. Der daraus entstehende Nachteil ist das geringe Spektrum an Informationsquellen. Deshalb ist der hieraus entwickelte Zulassungsprozess keineswegs allumfassend. Neben dem in **Kapitel 7.1** genannten Anwendungsbereich muss demnach zusätzlich erwähnt werden, dass die Anwendung sich auf die Bereiche des Prozesses beschränken sollte, die genauer ausgearbeitet wurden. Dazu gehört speziell die Vorgehensweise bei der systematischen Fertigung von Prüfkörpern und Bauteilen zur Berücksichtigung möglicher Störquellen. Dies kann der Prozess sehr gut abbilden. Eine große Schwäche des Prozesses sind jedoch die fehlenden Konkretisierungen der Prozessparameter. Global wurden diese in Form von Anforderungen an das Ausgangsmaterial, an die Maschine und an den Prozess aufgeführt. Jedoch wird nicht ersichtlich, welche Quantität diese haben müssen. Zwar wurden einiger dieser Parameter in den Standardisierungen und praktizierten Zulassungsprozessen erwähnt, jedoch nicht quantifiziert. Für die Unternehmen sind dies die zu wahrenden Informationen, die nicht rausgegeben werden.

---

Wie schon angedeutet, kann der entwickelte Zulassungsprozess bei Weitem nicht alle Aspekte eines AM Zulassungsprozesses abbilden. Dafür ist dieses Themengebiet schlicht zu umfangreich und der Umfang dieser Arbeit zu knapp. Auch wenn das Ziel und Endergebnis ein AM Zulassungsprozess ist, kann diese Arbeit auch als einführender Überblick in die momentane Situation der additiven Fertigung in der Luftfahrt gesehen werden. Es wurde deutlich gemacht, wie die drei großen Parteien, bestehend aus Industrie, Luftfahrtbehörden und Standardisierungsorganisationen, der Etablierung der additiven Fertigung in der Luftfahrt zuarbeiten. Retrospektiv wurde insbesondere durch die Industrie im vergangenen Jahrzehnt viel Pionierarbeit geleistet. Die Luftfahrtbehörden und Standardisierungsorganisationen können dieses Tempo bis heute nicht mitgehen. Zusammen mit der Geheimhaltungspolitik der Industrieunternehmen führt dies zu einem Ungleichgewicht, das in großem Aufwand und hohen Kosten mündet. Ausblickend bedarf es demnach dringend Spezifikationen, die zum einen von Standardisierungsorganisationen kommen, aber auch solche, die bereits bestehen und von der Industrie zur Verfügung gestellt werden. Im Gleichschritt werden zukünftig klare Maßnahmen der Luftfahrtbehörden benötigt. Dies könnte beispielsweise in der Einführung von AM-Sicherheitsfaktoren in den Bauvorschriften geschehen. Angesichts der besonderen Herausforderungen dieser Fertigungstechnologie und der breiteren Anwendungen in den letzten Jahren wäre dies die logische Konsequenz. Zusätzlich dazu wären klar definierte AMC denkbar, die vor allem kleinere Entwicklungsbüros hinsichtlich der Zulassung lenken und leiten.

---

## Literatur

- [1] ETMM, *A world first: additively manufactured titanium components now onboard the Airbus A350 XWB*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.etmm-online.com/a-world-first-additively-manufactured-titanium-components-now-onboard-the-airbus-a350-xwb-a-486310/>. Zugriff am: 28. August 2020.
- [2] General Electric, *New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [3] *Convention on International Civil Aviation done at Chicago on the 7th Day of December 1944*, 1944.
- [4] Premium Aerotech, *Additive Manufacturing im Flugzeugbau: "Material der Zukunft: Flugzeugstrukturen heute und morgen"*. Hamburg.
- [5] *Glossary of Terms*, ECSS-S-ST-00-01C, 2012.
- [6] Organisation Conjointe de Coopération en matière d'Armement, *WHAT IS OCCAR?* [Online]. Verfügbar unter: <http://www.occar.int/about-us>. Zugriff am: 19. August 2020.
- [7] Organisation Conjointe de Coopération en matière d'Armement, *A400M – A TACTICAL AND STRATEGIC AIRLIFTER*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.occar.int/programmes/a400m>. Zugriff am: 19. August 2020.
- [8] Organisation Conjointe de Coopération en matière d'Armement, *OCCAR Management Procedure (OMP 13): Airworthiness*. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.occar.int/sites/default/files/downloads/OMP\\_13\\_issue1\\_internet\\_20150609.pdf](http://www.occar.int/sites/default/files/downloads/OMP_13_issue1_internet_20150609.pdf). Zugriff am: 19. August 2020.
- [9] *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*, DIN 8580, 2020.
- [10] *Fertigungsverfahren Spanen*, DIN 8589-3, 2003.
- [11] U. Huber, *Faserverbund- und Sandwichtechnologie: Skript zur Vorlesung im SS 2013*. Hamburg.
- [12] *Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe*, DIN 1910-100, 2008.
- [13] A. Gebhardt, J. Kessler und L. Thurn, *3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*, 2. Aufl. Aachen: Hanser, 2016.
- [14] U. Berger, A. Hartmann und D. Schmid, *3D-Druck: Additive Fertigungsverfahren*, 2. Aufl. Europa Lehrmittel, 2017.
- [15] A. Gebhardt, *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, 5. Aufl. Aachen: Hanser, 2016.
- [16] *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*, DIN 50125, 2016.

- 
- [17] *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes: CS-25*.
- [18] A. P. Mouritz, *Introduction to aerospace materials*, 1. Aufl. Woodhead Publishing, 2012.
- [19] M. Seibel, M. Wagner und H. J. Flüh, *Unterlagen zur Vorlesung Strukturkonstruktion 2: Eine Vorlesung zur Gestaltung und Auslegung von Flugzeugzellen*. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg. Hamburg, 2018.
- [20] D. Evrard und F. Alonso, *FAST (Flight Airworthiness Support Technology): Special edition A350 XWB*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/fast/FAST\\_specialA350.pdf](https://www.airbus.com/content/dam/corporate-topics/publications/fast/FAST_specialA350.pdf). Zugriff am: 8. Juli 2020.
- [21] J. Hale, *Boeing 787 from the Ground Up*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr\\_4\\_06/AERO\\_Q406\\_article4.pdf](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/AERO_Q406_article4.pdf).
- [22] *Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mmpds.org>. Zugriff am: 8. Juli 2020.
- [23] *Memorandum: Policy Statement on use of Metallic Materials Properties Development and Standardization (MPPDS) Handbook*, 2006. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.mmpds.org/wp-content/uploads/2015/04/mmpds\\_2015\\_ffa\\_policy\\_statement.pdf](https://www.mmpds.org/wp-content/uploads/2015/04/mmpds_2015_ffa_policy_statement.pdf)
- [24] International Civil Aviation Organisation, *About ICAO*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>. Zugriff am: 23. August 2020.
- [25] European Aviation Safety Agency, *Bilateral agreements*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/document-library/bilateral-agreements>. Zugriff am: 23. August 2020.
- [26] M. Hinsch, *Industrielles Luftfahrtmanagement: Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe*, 4. Aufl. Hamburg: Springer, 2019.
- [27] International Civil Aviation Organisation, *The Convention on International Civil Aviation: Annexes 1 to 18*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.icao.int/safety/airnavigation/NationalityMarks/annexes\\_booklet\\_en.pdf](https://www.icao.int/safety/airnavigation/NationalityMarks/annexes_booklet_en.pdf). Zugriff am: 23. August 2020.
- [28] *Airworthiness of Aircraft. Annex 8 to the Convention on International Civil Aviation: ICAO Annex 8*.
- [29] Europäische Union, *Verordnungen, Richtlinien und sonstige Rechtsakte*. [Online]. Verfügbar unter: [https://europa.eu/european-union/eu-law/legal-acts\\_de](https://europa.eu/european-union/eu-law/legal-acts_de). Zugriff am: 23. August 2020.
- [30] *Verordnung (EU) 2018/1139*, 2018.
- [31] European Aviation Safety Agency, *What is the status of 'Implementing Rules', 'Acceptable Means of Compliance' (AMC), 'Certification Specifications' (CS), 'Alternative Means of Compliance' (AltMOC), 'Guidance Material' (GM), 'Special Conditions' and 'Frequently Asked Questions' (FAQ)?: FAQ n.19117*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/faq/19117>. Zugriff am: 23. August 2020.
- [32] *Easy Access Rules for Airworthiness and Environmental Certification (Regulation (EU) No 748/2012): Part-21*, 2020.

- 
- [33] European Aviation Safety Agency, *Supplemental Type-Certificate Data Sheet for AIRBUS A320/A321 Passenger to Freighter Conversion*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/A321P2F%20STCDS%20Issue%202\\_dated%2014-July-2020.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/A321P2F%20STCDS%20Issue%202_dated%2014-July-2020.pdf). Zugriff am: 24. August 2020.
- [34] Martin Hinsch, *Industrielles Luftfahrtmanagement: Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe*, 4. Aufl. Hamburg: Springer Vieweg, 2019.
- [35] Michael Gorelik, *Structural Integrity Considerations for Additive Manufacturing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/WORKSHOP%20Additive%20Manufacturing%20-%20Presentations.zip>. Zugriff am: 22. August 2020.
- [36] *Certification Memorandum Additive Manufacturing: CM-S-008*, 2017.
- [37] Robert Grant, *FAA Status on Additive Manufacturing: Presented to: 2016 EASA Additive Manufacturing Workshop*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/WORKSHOP%20Additive%20Manufacturing%20-%20Presentations.zip>. Zugriff am: 21. August 2020.
- [38] European Aviation Safety Agency, *2019 EASA-FAA Workshop on Additive Manufacturing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/events/2019-easa-faa-workshop-additive-manufacturing>. Zugriff am: 21. August 2020.
- [39] Michael Gorelik, *Regulatory Considerations for AM Qualification and Status of FAA AM Roadmap*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nrc.gov/docs/ML1733/ML17338A886.pdf>. Zugriff am: 21. August 2020.
- [40] Michael Gorelik, *Summary of the 1st Joint FAA - EASA Workshop on Q&C of AM Components*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/download/Events/Presentations%20-%202019%20EASA-FAA%20Workshop%20on%20Additive%20Manufacturing.zip>. Zugriff am: 21. August 2020.
- [41] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN - kurz erklärt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/basiswissen>. Zugriff am: 3. August 2020.
- [42] M. Hinsch, *Qualitätsmanagement in der Luftfahrtindustrie: DIN EN 9100:2018 - Einführung und Anwendung in der betrieblichen Praxis*, 4. Aufl. Hamburg: Springer, 2019.
- [43] Europäische Union, *Europäische Normen*. [Online]. Verfügbar unter: [https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/standards/standards-in-europe/index\\_de.htm](https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/standards/standards-in-europe/index_de.htm). Zugriff am: 10. August 2020.
- [44] International Organization for Standardization, *About us*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/about-us.html>.
- [45] *Additive Fertigung – Anforderungen an qualitätsgesicherte Prozesse für additive Fertigungszentren*, DIN SPEC 17071, 2019.
- [46] *Additive Fertigung – Testkörper – Allgemeine Leitlinie für die Bewertung der geometrischen Leistung additiver Fertigungssysteme (AM-Systeme)*, ISO/ASTM 52902, 2020.
- [47] *Additive Fertigung – Grundlagen – Standardpraxis der Positionierung, Koordinaten und Ausrichtung des Bauteils*, ISO/ASTM 52921, 2019.

- 
- [48] *Additive Fertigung – Prozessanforderungen und Qualifizierung – Verwendung des pulverbettbasierten Schmelzens von Metallen bei kritischen Anwendungen*, ISO/ASTM 52904, 2020.
- [49] General Electric, *Disrupt ... or be disrupted: Why 3D printing is changing the world of industrial design and manufacturing*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.pressreleasefinder.com/prdocs/2019/GE\\_Additive\\_Overview\\_May2019.pdf](https://www.pressreleasefinder.com/prdocs/2019/GE_Additive_Overview_May2019.pdf). Zugriff am: 16. August 2020.
- [50] General Electric, *Additive Manufacturing: Aviation and aerospace industry*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/industries/aviation-aerospace>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [51] Katelyn Arnold, *GE Announces Additive Manufacturing Breakthrough in Commercial Aviation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.additivemanufacturing.media/news/ge-announces-additive-manufacturing-breakthrough-in-commercial-aviation>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [52] [additivemanufacturing.com](http://additivemanufacturing.com), *GE Aviation's First Additive Manufactured Part Takes Off on a GE90 Engine*. [Online]. Verfügbar unter: <http://additivemanufacturing.com/2015/04/16/ge-aviations-first-additive-manufactured-part-takes-off-on-a-ge90-engine/>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [53] Debroah Whitis, *Additive Manufacturing Material Implementation at GE*.
- [54] Amy Kover, *Transformation In 3D: How A Walnut-Sized Part Changed The Way GE Aviation Builds Jet Engines*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ge.com/news/reports/transformation-3d-walnut-sized-part-changed-way-ge-aviation-builds-jet-engines>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [55] General Electric, *EASA - FAA AM Workshop*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/download/Events/Presentations%20-%202019%20EASA-FAA%20Workshop%20on%20Additive%20Manufacturing.zip>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [56] Jeff Conner, *High Volume Production with Additive Manufacturing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/WORKSHOP%20Additive%20Manufacturing%20-%20Presentations.zip>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [57] Steve Huck, *Navigating the DOA to POA Transition with Additive Manufacturing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/PRESENTATIONS.zip>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [58] Gregg Morris, *GE Aviation – Additive Road to Production*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fda.gov/media/116904/download>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [59] Aerospace Industries Association, *Recommended Guidance for Certification of AM Component*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aia-aerospace.org/wp-content/uploads/2020/02/AIA-Additive-Manufacturing-Best-Practices-Report-Final-Feb2020.pdf>. Zugriff am: 17. August 2020.
- [60] Aerospace Industries Association, *About us*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.aia-aerospace.org/about-aia/>. Zugriff am: 18. August 2020.
- [61] *NCAMP Standard Operating Procedures (SOP)*, NSP 100.

- 
- [62] *Memorandum: Acceptance of Composite Specifications and Design Values Developed using the NCAMP Process: AIR100-2010-120-003*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: [https://rgl.faa.gov/Regulatory\\_and\\_Guidance\\_Library/rgPolicy.nsf/0/a0270c9f1bf8eaa1862577a8004d62ba/\\$FILE/AIR100-2010-120-003.pdf](https://rgl.faa.gov/Regulatory_and_Guidance_Library/rgPolicy.nsf/0/a0270c9f1bf8eaa1862577a8004d62ba/$FILE/AIR100-2010-120-003.pdf)
- [63] *Certification Memorandum: Composite Materials and Shared Databases, Acceptance of Composite Specifications and Design Values Developed using the NCAMP Process: CM-S-004*, 2014. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/certification-memoranda-import-'final'%20EASA%20CM-S-004%20Issue%2001\\_Composite%20Materials%20%20Shared%20Databases\\_PUBL.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/certification-memoranda-import-'final'%20EASA%20CM-S-004%20Issue%2001_Composite%20Materials%20%20Shared%20Databases_PUBL.pdf)
- [64] Stratasys, *A Path to Certification: Qualifying the first polymer additive manufacturing material for aerospace*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.stratasys.com.cn/-/media/files/white-papers-new/wp\\_fdm\\_pathtocertification\\_0817a-web.pdf](https://www.stratasys.com.cn/-/media/files/white-papers-new/wp_fdm_pathtocertification_0817a-web.pdf). Zugriff am: 21. Juli 2020.
- [65] National Institute for Aviation Research, *National Center for Advanced Materials Performance*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Research/ncamp.php>. Zugriff am: 22. August 2020.
- [66] Stratasys, *About us*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stratasys.com/corporate/about-us>. Zugriff am: 22. August 2020.
- [67] Stratasys, *Certified ULTEM 9085 Resin*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mds\\_fdm\\_ultem9085cert\\_0618b.pdf](https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mds_fdm_ultem9085cert_0618b.pdf). Zugriff am: 22. August 2020.
- [68] Stratasys, *Certified Additive Manufacturing for Aircraft Interiors*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.stratasys.com/-/media/files/solution-guide/certified-additive-manufacturing-for-aircraft-interiors.pdf>. Zugriff am: 22. August 2020.
- [69] Albers, *Our Mission: At rp+m, our mission is to combine our extensive expertise in additive manufacturing with a best-in-class production environment to provide customers with the with the optimal solution for their manufacturing needs*.
- [70] Flugrevue, *Gedruckte Serienbauteile für Airbus A350: STRATASYS DIRECT MANUFACTURING*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.flugrevue.de/stratasys-direct-manufacturing-gedruckte-serienbauteile-fuer-airbus-a350/>. Zugriff am: 22. August 2020.
- [71] Stratasys, *Aerospace Additive Manufacturing: Goal: Leverage proven AM to improve Aerospace Productivity and Delivery*.
- [72] 3DXTech, *PEI Pellets (9085)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3dxtech.com/plastic-pellets-and-colorants/pei-pellets-9085/>. Zugriff am: 23. August 2020.
- [73] Stratasys, *WHITEPAPER: Genauigkeitsstudie der Fortus 900mc*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stratasys.com/de/resources/search/white-papers/fortus-900mc>. Zugriff am: 23. August 2020.
- [74] Joint Advanced Materials & Structures Center of Excellence, *Polymer-Based Additive Manufacturing Guidance for Aircraft Design and Certification*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Documents/jams-presentations/20-Andrulonis-Additive-Manufacturing.pdf>. Zugriff am: 23. August 2020.

- 
- [75] National Center for Advanced Materials Properties, *Stratasys Certified ULTEM 9085 Fortus 900mc Additively Manufactured Polymer Material Qualification Statistical Analysis Report*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wichita.edu/research/NIAR/Documents/NCP-RP-2018-007-Rev-NC-ULTEM-9085-Stat-Analysis-Report-April-16-2019.pdf>. Zugriff am: 23. August 2020.
- [76] Tomas Kellner, *3D-Printed 'Bionic' Parts Could Revolutionize Aerospace Design*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ge.com/news/reports/3d-printed-bionic-parts-revolutionize-aerospace-design>. Zugriff am: 29. August 2020.



## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Witt

Vorname: Tim

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit  bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Zulassung von additiv gefertigten Flugzeugstrukturbauteilen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

01.09.2020

Datum

[Signature]  
Unterschrift im Original