

## Zusammenfassung Projekt „XYZ“ (max. 10 Seiten)

<b>Ausführlicher Projekttitel:</b>	Anwendung von Funktionsintegration und Leichtbau mit Additiver Fertigung im Musikinstrumentenbau
<b>Kurztitel/Akronym:</b>	FULMUS
<b>Projektlaufzeit:</b>	01.05.2023 bis 31.08.2025

<b>Projektbeteiligte Einrichtungen</b>	<b>Ansprechpartner</b>
Technische Universität Bergakademie Freiberg	Prof. Dr.-Ing. H. Zeidler / Dr.-Ing. Rezo Aliyev / Dr.-Ing. S. Krinke / M. Krinke

### Inhaltsverzeichnis

0	Abstract .....	2
1	Projektziele .....	3
2	Projektablauf .....	4
2.1	Arbeitspaket 1 – Konstruktion, Werkstoffuntersuchung und additive Fertigung .....	4
2.1.1	Konstruktive Umgestaltung .....	4
2.1.2	Werkstoffauswahl.....	5
2.1.3	Additive Fertigung mittels Pulverbett-Laserauftragsverfahren Metall (PBF-LB/M).....	6
2.2	Arbeitspaket 2 – Entwicklung einer optimierten Oberflächenbearbeitung .....	7
2.2.1	Spezielles Strahlverfahren (Twister der BMF GmbH) .....	8
2.2.2	Plasmaelektrolytisches Polieren (PeP) .....	10
2.3	Arbeitspaket 3 – Mechanische Nachbearbeitung, Montage und Spieltests.....	12
2.4	Arbeitspaket 4 – Herleitung einer Gestaltungsrichtlinie .....	13
3	Projektergebnisse .....	15
4	Potentielle Nutzung der Projektergebnisse .....	17

## 0 Abstract

Das Verbundvorhaben FULMUS verfolgte das Ziel, eine vollständige, industriell nutzbare Prozesskette zur additiven Fertigung komplexer Baugruppen eines Metallblasinstruments zu entwickeln, zu evaluieren und hinsichtlich akustischer, funktionaler und ästhetischer Eigenschaften zu validieren. Aufbauend auf Erkenntnissen aus dem Vorgängerprojekt AMUSE wurde eine hochkomplexe Baugruppe – die obere und untere Maschine einer Schalmey (Abbildung 1) – ausgewählt, konstruktiv umgestaltet und mittels Laserstrahl-schmelzen im Metallpulverbett (DIN EN ISO 59200 – PBF-LB/M) gefertigt. Ergänzend wurde eine optimierte Prozesskette zur Oberflächenbearbeitung entwickelt, bestehend aus einem speziell abgestimmten Strahlverfahren und dem plasmaelektrolytischen Polieren (PeP).



Abbildung 1: Schalmey der Firma Voigt, eingerahmt: obere und untere Maschine

Das Projekt konnte nachweisen, dass eine ehemals aus rund 30 Teilen bestehende komplexe Baugruppe erfolgreich zu einem einzigen, additiv gefertigten Funktionsbauteil zusammengeführt werden kann. Die akustischen, vibro-mechanischen und klanglichen Eigenschaften wurden umfassend untersucht und liegen innerhalb der üblichen Toleranzen konventionell gefertigter Instrumente. Teilweise wurden sogar Vorteile hinsichtlich Dichtigkeit, Stabilität und Dämpfungsverhalten identifiziert.

Die Ergebnisse eröffnen dem Musikinstrumentenbau neue Möglichkeiten, spezifische Baugruppen wirtschaftlicher, unabhängiger und mit höherer konstruktiver Freiheit herzu-stellen (Abbildung 2). Zugleich adressiert das Projekt strukturelle Herausforderungen der Branche, darunter Fachkräftemangel, Lieferabhängigkeiten und steigende Anforderungen an nachhaltige, technologisch anspruchsvolle Fertigungsmethoden.

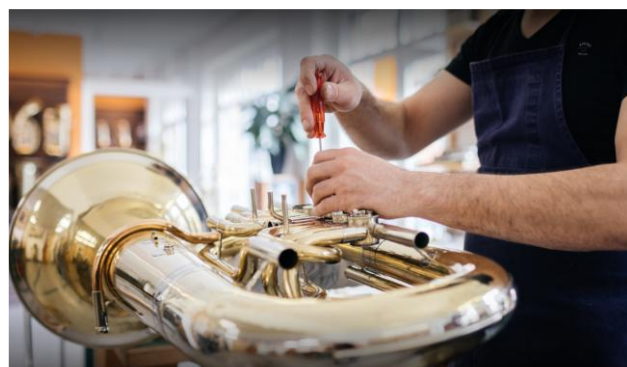


Abbildung 1: Feinmechanische Endmontage eines Horns  
(Quelle: Voigt)

# 1 Projektziele

*Die wesentlichen Ziele des Projekts waren:*

- 1. Erarbeiten von konstruktiven und technologischen Anforderungen für die Funktionsintegration und den Leichtbau im Musikinstrumentenbau -Auswahl und vollständige Integration einer realen Baugruppe.*
- 2. Entwicklung einer vollständig integrierten Prozesskette zur Konstruktion, Fertigung und Nachbearbeitung einer komplexen Baugruppe eines Metallblasinstruments.*
- 3. Optimierung der Bauteilgeometrie im Hinblick auf das gewählte additive Fertigungsverfahren nach DIN EN ISO 59200 - PBF-LB/M.*
- 4. Entwicklung neuer Oberflächenbearbeitungsmethoden zur Erreichung der erforderlichen optischen, haptischen und funktionalen Eigenschaften.*
- 5. Erprobung wirtschaftlicher und technologischer Verwertbarkeit für den industriellen Einsatz im Musikinstrumentenbau.*
- 6. Entwicklung einer Gestaltungsrichtlinie für die erfolgreiche Implementierung von Funktionsintegration und Leichtbau in der Praxis*

*Diese Ziele wurden in enger Zusammenarbeit der beteiligten Partner aus Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen umgesetzt.*

## 2 Projektablauf

### 2.1 Arbeitspaket 1 – Konstruktion, Werkstoffuntersuchung und additive Fertigung

#### 2.1.1 Konstruktive Umgestaltung

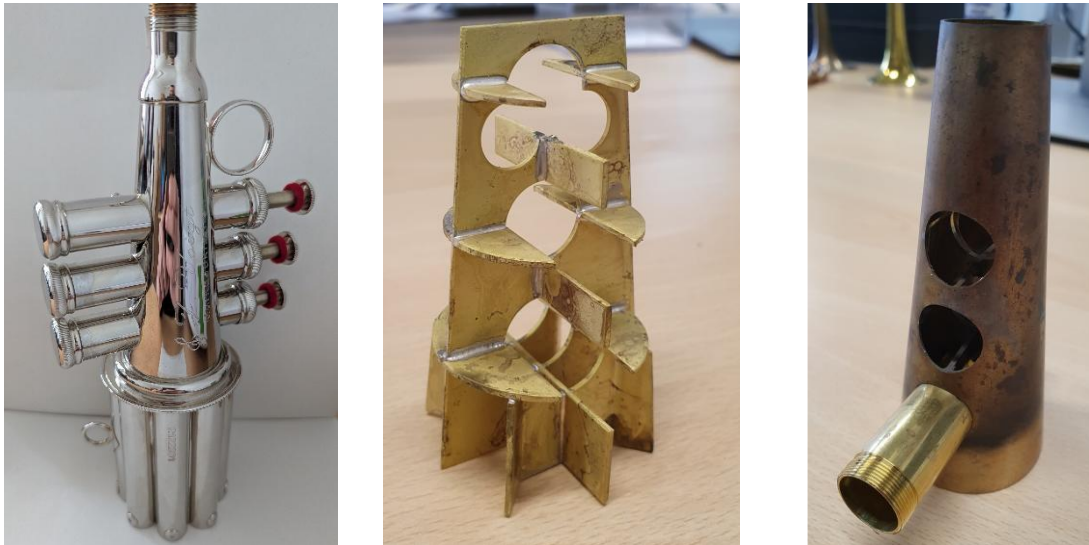


Abbildung 3: Untere-/obere Maschine und Einzelteile des Luftstromverteilers

Die Potenziale der additiven Fertigung im Musikinstrumentenbau wurden im Forschungsprojekt AMUSE systematisch untersucht und der Mehrwert für einen erweiterten industriellen Einsatz aufgezeigt. Zur Erforschung der im Projekt angestrebten Ziele der Funktions-integration wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Voigt ein Musikinstrumentenbauteil ausgewählt, das ursprünglich aus rund 30 Einzelkomponenten bestand. Diese Baugruppe wurde fertigungsgerecht zu einem einzigen, additiv herstellbaren Bauteil konsolidiert (Abb. 4).

Im Rahmen der konstruktiven Auslegung wurden folgende konstruktive und technologische Restriktionen berücksichtigt:

- Überhangwinkel und stützstrukturelevante Geometrien
- Kavitätenbildung sowie Entpulver- und Reinigungsmöglichkeiten
- Integration von Strömungskanälen
- Lokale Verstärkungen und Materialreduktionen im Sinne des Leichtbaus
- Wirtschaftliche Ausnutzung des Bauraums

Mehrere iterative Entwicklungs- und Optimierungsschritte führten schließlich zu einer finalen Geometrie (Abb. 5), die strömungsoptimiert, gewichtseffizient und vollständig mittels additiver Fertigung herstellbar ist. Die Bauteilabmessungen, die für die Auslegung des additiven Fertigungsprozesses entscheidend sind, betragen  $80 \times 80 \times 180 \text{ mm}^3$ .

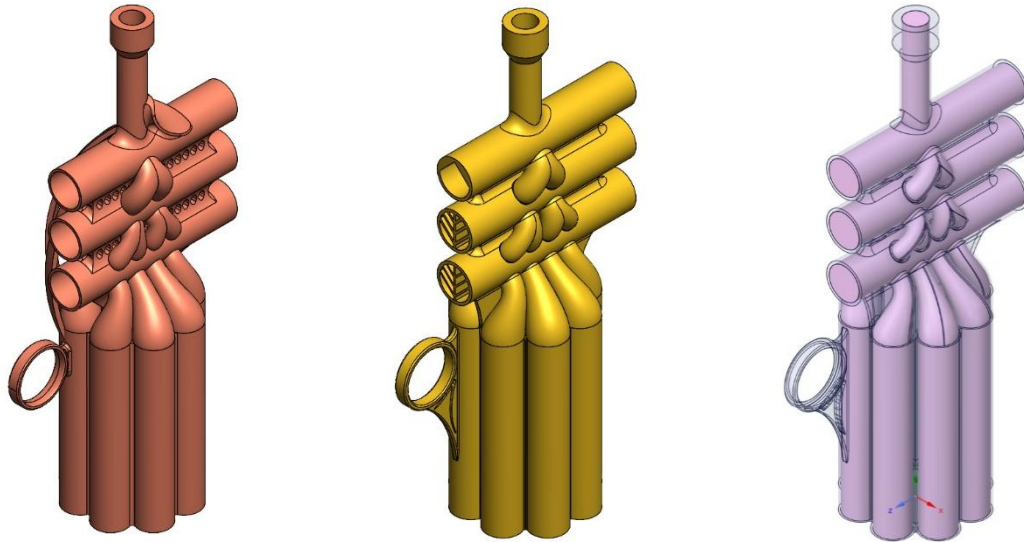


Abbildung 4: Vorletzte Iterationsstufe (links), letzte Iterationsstufe (mitte), Darstellung d. inneren Strömungskanäle (rechts)

## 2.1.2 Werkstoffauswahl

Initial wurde Kupfer untersucht, da es dem traditionell eingesetzten Material im Instrumentenbau nahekommt. Allerdings zeigten sich erhebliche Herausforderungen:

- hohe Reflektivität beim Laserprozess
- erhöhte Prozessinstabilität
- erschwerte Oberflächenbearbeitung
- unzureichende Reproduzierbarkeit

Aufgrund dieser Erkenntnisse ist neben Kupfer der für das additive Fertigungsverfahren Laserstrahlschmelzen im Pulverbett qualifizierte Werkstoff 316L untersucht worden. Vor-teile waren:

- validierten Fertigungsparametern
- sehr guten Erfahrungen im PeP-Prozess
- ausreichender Korrosionsbeständigkeit
- guter akustischer Neutralität



Abbildung 5: Bauteil in Kupfer (links) und Bauteil in 316L (rechts)

### 2.1.3 Additive Fertigung mittels Pulverbett-Laserauftragsverfahren Metall (PBF-LB/M)

Das Pulverbett-Laserauftragsverfahren Metall (PBF-LB/M) gemäß DIN EN ISO 59200 bezeichnet ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein Metallpulver schichtweise aufgetragen und selektiv durch einen Laserstrahl verschmolzen wird, um ein dreidimensionales Bauteil zu erzeugen. Die Schichten des Pulvers werden auf einem Bauraum aufgetragen und nacheinander durch den Laser aufgeschmolzen.

Auf der EOS M 290 wird dieses Verfahren mit einem hochpräzisen, gepulsten Laser durchgeführt, der das Pulvermaterial schmilzt und eine dichte, homogene Metallstruktur erzeugt. Die EOS M 290 ermöglicht hierbei eine Schichtdicke von typischerweise 20–40  $\mu\text{m}$  und eine hohe Wiederholgenauigkeit sowie Bauteilqualität entsprechend industriellen Standards. Die Größe des verfügbaren Bauraums beträgt 250 mm x 250 mm x 300 mm (L x B x H).

Besonders berücksichtigt wurden:

- Laserleistung und Scanstrategie
- Schichtdicken (Wirtschaftlichkeit)
- Stützstrukturen und deren Abtrennung
- Ausrichtung des Bauteils im Bauraum

Für das additiv gefertigte Bauteil der Schalmei wurde im Projekt FULMUS eine senkrechte Baurichtung als optimale Orientierung für das Verfahren PBF-LB/M festgelegt. Diese Ausrichtung minimiert geometrische Überhänge weitgehend oder vollständig und ermöglicht dadurch eine deutliche Reduzierung bzw. Eliminierung konventioneller Stützstrukturen. Gleichzeitig gewährleistet die vertikale Baurichtung eine stützfreie Herstellung integrierter Kavitäten, die später nicht mechanisch nachbearbeitet werden können, sowie eine effiziente Pulverentfernung.

Ein weiterer zentraler Aspekt der Auslegung war die systematische Reduktion des Bauteilvolumens. Für das PBF-LB/M-Verfahren ist die Minimierung des aufzubauenden Volumens von besonderem Interesse, da sich hierdurch die Bauzeit reduziert. Die Bauzeit stellt wiederum den dominierenden Kostenfaktor dar, da sie im Wesentlichen durch die Maschinenabschreibung bestimmt wird und damit den größten Einfluss auf die Stückkosten besitzt. Durch volumenoptimierte Geometrien und die gewählte senkrechte Baurichtung konnten sowohl die Fertigungsdauer als auch die wirtschaftlichen Kennwerte deutlich verbessert werden (Abbildung 6, links).

Herausfordernd waren insbesondere die quer zur Baurichtung liegenden Ventilführungen, deren geforderte Form- und Lagetoleranzen ohne Supportstrukturen nicht zuverlässig erreicht werden konnten. Für diese Funktionsbereiche wurden daher gezielt Varianten von sogenannten tree-supports eingesetzt (Abbildung 6, rechts), die den lokalen Aufbau stabilisierten und gleichzeitig geringe Kontaktflächen aufwiesen. Die Ventilführungen wurden nach dem Bauprozess mechanisch bearbeitet und geschliffen, um die erforderliche Oberflächenqualität und Passgenauigkeit für den späteren Ventillauf sicherzustellen.

Durch die Kombination aus senkrechter Baurichtung, Supportminimierung und Volumenreduktion konnte der PBF-LB/M-Prozess für die Schalmei-Bauteile hinsichtlich Fertigungs-stabilität, Bauteilqualität, Bauzeit und Stückkosten signifikant optimiert werden.



Abbildung 6: Senkrechte Baurichtung (links), Varianten von „tree-supports“ (rechts)

## 2.2 Arbeitspaket 2 – Entwicklung einer optimierten Oberflächenbearbeitung

Die Oberflächenbeschaffenheit spielt im Musikinstrumentenbau eine zentrale Rolle – so-wohl für die Haptik und Optik als auch für die Strömungs- und Klangeigenschaften. Diese Eigenschaften entstehen entlang einer Prozesskette, die mehrstufig aufgebaut ist (Abbildung 7).

Die charakteristisch hohe Rauheit von additiv gefertigten Bauteilen verlangt eine Nachbearbeitung mittels verschiedener Verfahren, um die gestellten Anforderungen an die Beschaffenheit der Funktionsflächen zu erfüllen [6,7]. Die Erfahrungen bestätigen, dass die erforderliche Oberflächenqualität nicht immer in einem Prozessschritt erzielt werden kann. Öfter werden für ein gutes Endergebnis der Einsatz mehrerer Verfahren, wie Partikelstrahlen, Gleitschleifen oder Polieren, notwendig [6]. Der Umfang der Nachbearbeitung hängt dabei nicht nur von der Qualität der

gefertigten Flächen, sondern auch von dem ausgewählten Verfahren und Wechselbeziehung zwischen diesen Verfahren ab. Einsatz mehrerer Prozessschritte in der Nachbearbeitung fordert die Abstimmung einzelner Schritte, um damit die Formierung der Endqualität mit wenigem Aufwand zu erreichen. Je nach der Fertigungsaufgabe können unter Kombination der Verfahren zur Nachbearbeitung verschiedene Prozessketten realisiert werden.

Die effektiv gestaltete Nachbearbeitung ermöglicht die Vorteile des Laserstrahlschmelzens basierend auf die wenige gestalterische Restriktionen sinnvoll ausnutzen. Mit einer breiteren Wissensbasis zur Nachbearbeitung kann die Planung der gesamten Prozesskette positiv beeinflusst werden.

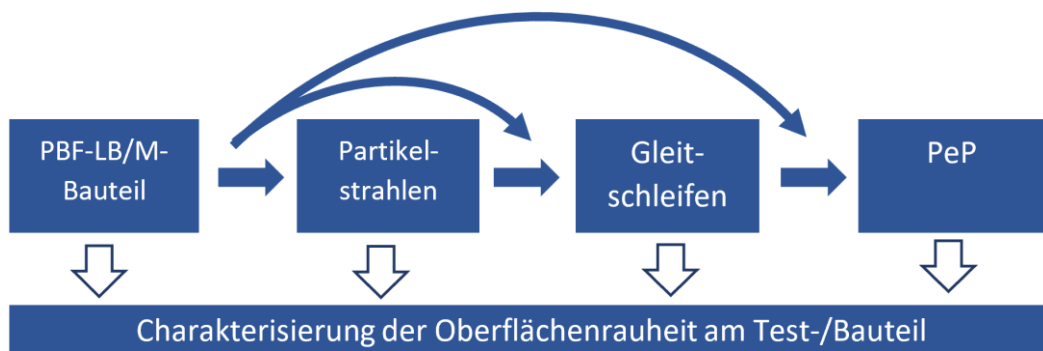


Abbildung 7: Prozesskette zur additiven Fertigung von Musikinstrumententeilen

Basierend auf analytischem Wissen wurden Prozesse für die Nachbearbeitung von Musikinstrumententeilen entwickelt. Die entwickelte Prozesskette umfasst:

### 2.2.1 Spezielles Strahlverfahren (Twister der BMF GmbH)

Das von der BMF GmbH entwickelte Strahlverfahren „Twister“ (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) ist ein automatisiertes Schleuderrad-Strahlsystem, das auf einer kombinierten Rotations- und Umlaufkinematik basiert. Zentrales Element der Anlage ist ein rotierendes Schleuderrad, das das Strahlmittel ohne Verwendung von Druckluft beschleunigt und gleichmäßig in den Arbeitsraum einträgt. Die zu bearbeitende Werkstücke werden auf mehreren Trägern positioniert, die sich sowohl um ihre eigene Achse drehen als auch auf einer definierten Umlaufbahn um das Schleuderrad bewegt werden. Durch diese Überlagerung der Bewegungen entsteht eine homogene Strahlmittelverteilung, die eine gleichmäßige Bearbeitung sämtlicher Bauteilgeometrien – einschließlich schwer zugänglicher Unterseiten – sicherstellt.



Abbildung 8: Funktionsprinzip Strahlverfahren „Twister“, 1: Schleuderrad, 2: Werkstücke, 3: Werk-stückträger (Quelle: BMF GmbH)

Das Verfahren ermöglicht reproduzierbare, energieeffiziente und personalarme Oberflächenbearbeitungsprozesse. Im Vergleich zu konventionellen, druckluftbasierten Strahlverfahren reduziert die Schleuderradtechnik den Energiebedarf signifikant und erlaubt eine hohe Prozessstabilität bei gleichzeitig verkürzten Bearbeitungszeiten. Der Twister eignet sich insbesondere für Serien- und Kleinserienprozesse an metallischen und polymeren Kleinteilen sowie für Anwendungen, bei denen eine definierte, optisch und funktional einheitliche Oberflächenqualität gefordert ist.

Durch die automatisierte Bestückung und definierte Bewegungsführung bietet das Verfahren eine hohe Reproduzierbarkeit der erzielbaren Oberflächenparameter. Zudem ist es gut in bestehende Produktions- und Nachbearbeitungsketten integrierbar, etwa im Kontext der additiven Fertigung oder der feinmechanischen Serienproduktion.

- Ziel: Homogenisierung, Verringerung der Rautiefe von  $R_z \sim 20 \mu\text{m}$  auf  $\sim 7 \mu\text{m}$  (Abbildung 9)
- Verbesserung der optischen Erscheinung
- Vorbereitung für PeP



Abbildung 9: Bauteil vor dem Strahlen (links) und nach dem Strahlen mit Strahlmittel FINAL nach 15 Min Strahldauer (rechts)

## 2.2.2 Plasmaelektrolytisches Polieren (PeP)

Beim plasmaelektrolytischen Polieren handelt es sich um ein elektrochemisch-thermisches Verfahren zur hochqualitativen Oberflächenbearbeitung metallischer Werkstoffe. Das Werkstück wird als Anode in ein geeignetes Elektrolyt eingebracht und unter hoher Gleichspannung betrieben. Hierdurch bildet sich an der Werkstückoberfläche ein dünner Dampf- bzw. Gasfilm, in dem lokal begrenzte Mikroentladungen auftreten. Diese führen zu einer kontrollierten anodischen Materialabtragung sowie zu kurzzeitigen Schmelz- und Glättungsprozessen in der obersten Materialschicht.

Das Verfahren ermöglicht die signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit und die Erzeugung homogener, korrosionsbeständiger und ästhetisch hochwertiger Oberflächen. PeP eignet sich insbesondere für schwer zu polierende Metalle wie nichtrostende Stähle, Titan oder Nickelbasislegierungen und bietet Vorteile bei komplexen Bauteilgeometrien, da die Bearbeitung ohne mechanischen Kontakt erfolgt.

In Zusammenarbeit mit dem Beckmann-Institut wurde ein verfahrensoptimiertes PeP-Prozessfenster entwickelt (Abbildung 10).



**Abbildung 10: Bauteil in Halterung für PeP-Prozess**

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- deutliche Glättung kritischer Strömungskanäle
- reproduzierbare Oberflächenqualität ( $<1\mu\text{m}$ )
- Reduzierung von Strömungswiderständen
- gleichmäßige Materialabtragung ( $1\mu\text{m}/\text{min}$ )
- annähernde Herstellung der gewünschten Optik/Haptik (Abbildung 11)

Durch den PeP-Prozess konnte die Oberflächenrauheit signifikant reduziert werden. Die konfokalmikroskopischen Messungen (Mahr) vor und nach der Behandlung belegen die Wirksamkeit der entwickelten Prozesskette (Abbildung 12).



Abbildung 11: Bauteil nach 5 Min PeP (links), Bauteil nach 45 Min PeP (rechts)

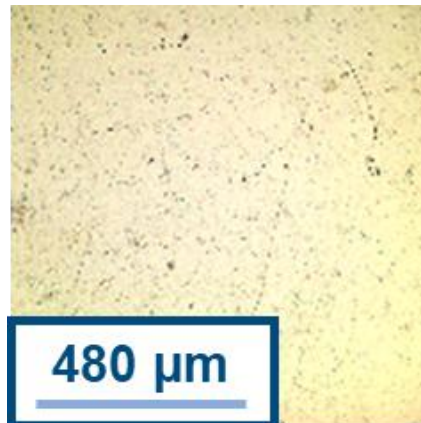
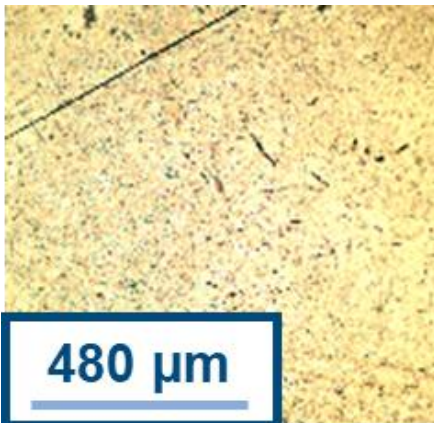


Abbildung 12: Oberflächenrauheit (Sa) vor PeP (links) und nach PeP (rechts )

### 2.3 Arbeitspaket 3 – Mechanische Nachbearbeitung, Montage und Spieltests

Nach dem PeP-Prozess wurden konventionelle Schnittstellen in der Produktionswerkstatt der Fa. Voigt mittels konventionellen Fertigungsverfahren, wie Bohren und Fräsen angebracht, darunter:

- Gewinde
- funktionskritische Übergänge
- Montageflächen zu weiteren Bauteilen

Anschließend erfolgte:

- vollständige Montage der Schalmei

- Stimmen des Instruments
- Durchführung erster Anspieltests durch erfahrene Instrumentenbauer durch Fa. Voigt

Die praktischen Tests zeigten:

- keine Nachteile im Spielverhalten
- stabile Dichtheit durch gleichmäßige Wandstärken
- angenehme Haptik
- leicht verändertes, aber akzeptiertes Schwingungsverhalten

## 2.4 Arbeitspaket 4 – Herleitung einer Gestaltungsrichtlinie

Die Untersuchungen zeigten, dass die additive Fertigung im Musikinstrumentenbau neue gestalterische und funktionale Freiheitsgrade zur Bauteilintegration eröffnet, erfordert je-doch eine konsequente Anpassung der Bauteilgestaltung an die prozessspezifischen Randbedingungen, die in eine Gestaltungsrichtlinie überführt werden.

Grundsätzlich ist die Gestaltung additiv gefertigter Musikinstrumentenbauteile auf eine hohe Funktionsintegration auszurichten. Baugruppen mit mehreren Einzelkomponenten sollen, sofern funktional sinnvoll, zu integralen Bauteilen konsolidiert werden, um Montageaufwand, Toleranzketten und gesamten Fertigungsaufwand zu reduzieren. Die im Rahmen des Projekts betrachtete Baugruppe bestand aus 30 zu integrierenden Bauteilen. Grundsätzlich steigt der Vorteil der additiven Fertigung gegenüber der konventionellen Fertigung mit zunehmender Bauteilkomplexität. Das bedeutet je mehr Bauteile zusammen-gefasst werden können, desto besser. Allerdings ist das Hinzufügen weiterer Bauteile nur sinnvoll, solange die Grenzen des Prozesses v.a. hinsichtlich Bauraumgröße und Überhangwinkel nicht überschritten werden. Um eine optimale und sinnvolle Ausnutzung der Möglichkeiten der additiven Fertigung zu gewährleisten, sollte die Anzahl der zu konsolidierenden Bauteile größer als 5 sein. Gleichzeitig ist die akustische Funktion des Bauteils – insbesondere Schwingungsverhalten, Resonanzeigenschaften und Strömungsführung – frühzeitig in den Entwurfsprozess einzubeziehen.

Aus fertigungstechnischer Sicht sind Überhangwinkel, stützstrukturelevante Geometrien und Bauteilorientierung im Bauraum maßgeblich zu berücksichtigen. Allgemein gilt für das Laserstrahlschmelzen von Metallen im Pulverbett, dass ein Überhangwinkel von 45° nicht unterschritten werden sollte. Geometrien sind so auszulegen, dass der Bedarf an Stützstrukturen minimiert wird, da diese sowohl die Oberflächenqualität als auch die Nachbearbeitung beeinflussen können. Geschlossene Kavitäten sind nur dann zulässig, wenn eine sichere Entpulverung gewährleistet ist. Entsprechende Öffnungen oder integrierte Kanäle sind konstruktiv vorzusehen. In diesem Zusammenhang sollten Kanaldurchmesser den Wert von 1,0 mm nicht unterschreiten und die Kanalgeometrie sollte einen stetigen Verlauf aufweisen. Weiterhin ist im Vorfeld auf die Lage von innenliegenden Kanälen während des Bauprozesses zu achten. Bei horizontaler Ausrichtung darf der Innendurchmesser den Wert 6,0 mm nicht überschreiten, da sonst Stützstrukturen erforderlich werden, die im Nachhinein nicht erreichbar und somit nur sehr schwierig und mit hohem Aufwand entfernbar sind.

Die additive Fertigung ermöglicht die gezielte Integration von Strömungskanälen und inneren Funktionsstrukturen, die zur akustischen Optimierung beitragen können. Diese sind strömungs- und schwingungstechnisch zu gestalten, um unerwünschte Turbulenzen, Dämpfungseffekte oder Resonanzverschiebungen zu vermeiden. Gleichzeitig können lokale Wandstärkenanpassungen zur

gezielten Beeinflussung der Steifigkeit, Masseverteilung und akustischen Charakteristik genutzt werden. Aufgrund der anwendungsspezifisch hohen Anforderung an die Dichte des Bauteils sollte die Mindestwandstärke 0,6 mm nicht unterschreiten.

Leichtbauaspekte sind durch materialeffiziente Strukturen, wie lastpfadgerechte Wandstärken oder innenliegende Gitter- bzw. Hohlstrukturen, zu berücksichtigen, ohne die akustische Funktion negativ zu beeinflussen. Dabei ist stets ein ausgewogenes Verhältnis zwischen mechanischer Stabilität, Schwingungsverhalten und Fertigbarkeit sicherzustellen.

Abschließend ist die Gestaltung auf eine wirtschaftliche Bauraumausnutzung und eine hohe Reproduzierbarkeit auszurichten. Die Einhaltung prozesssicherer Geometriegrenzen sowie die Berücksichtigung nachgelagerter Prozessschritte, insbesondere der Oberflächenbearbeitung, sind integraler Bestandteil der Gestaltungsrichtlinie. Nur durch eine ganzheitliche Betrachtung von Akustik, Funktion, Fertigung und Nachbearbeitung kann das Potenzial der additiven Fertigung im Musikinstrumentenbau vollständig ausgeschöpft werden.

Das Flussdiagramm in der Abbildung 13 veranschaulicht die methodische Vorgehensweise zur Bauteilintegration im Musikinstrumentenbau und die systematische Synthese akustischer Anforderungen, konstruktiver Integration, fertigungstechnischer Machbarkeit sowie ökonomischer Gesichtspunkte.

### 3 Projektergebnisse

Das Projekt erfüllte die definierten wissenschaftlich-technischen Zielsetzungen in vollem Umfang. Die Konsolidierung von ursprünglich 30 Einzelkomponenten zu einem integralen Bauteil konnte erfolgreich umgesetzt werden und stellt einen wesentlichen Beitrag zur Funktionsintegration und zur Reduktion der Bauteilkomplexität dar. Die ermittelten stabilen Prozessparameter für die additive Fertigung mit dem Werkstoff 316L belegen die prozess-sichere Umsetzbarkeit des Ansatzes. Zudem wurde eine durchgängige und industriell anwendbare Prozesskette zur Oberflächenbearbeitung etabliert, die den funktionalen Anforderungen im Musikinstrumentenbau gerecht wird.

Der experimentelle Vergleich mit konventionell gefertigten Instrumenten zeigte, dass die akustischen Eigenschaften der additiv gefertigten Bauteile mindestens gleichwertig sind. Darüber hinaus konnten in ausgewählten mechanischen und funktionalen Kennwerten Verbesserungen gegenüber konventionellen Lösungen nachgewiesen werden, was auf das hohe Optimierungspotenzial additiver Fertigungsverfahren hinweist.

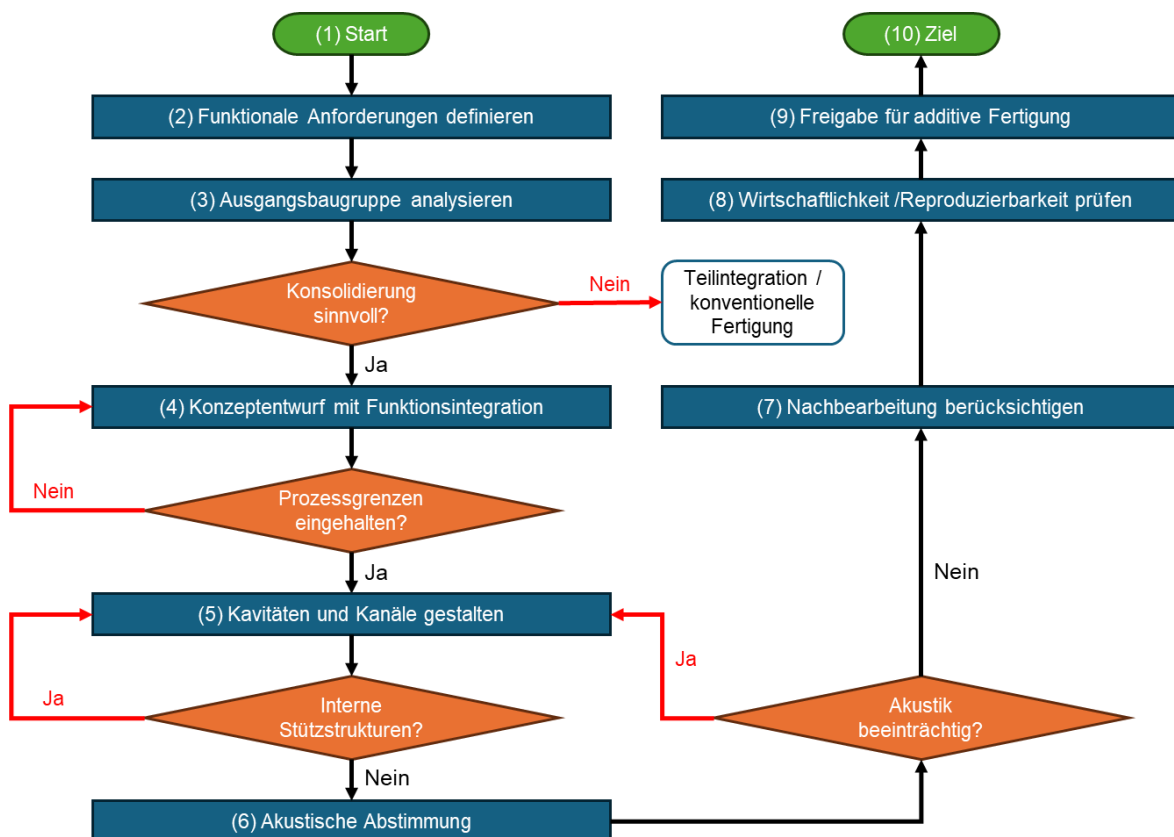


Abbildung 13: Die wesentlichen Schritte der konstruktiven Bauteilintegration für Musikinstrumente

In der Gesamtbewertung zeichnen sich die entwickelten Lösungen insbesondere durch ihre vollständige Integrationsfähigkeit in reale Produktionsumgebungen, eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sowie eine grundsätzliche Skalierbarkeit für industrielle Anwendungen aus. Diese Ergebnisse unterstreichen die Eignung der additiven Fertigung als wettbewerbsfähige Alternative zu konventionellen Herstellungsverfahren im Musikinstrumentenbau.

Das Verbundvorhaben FULMUS hat gezeigt, dass der Musikinstrumentenbau erheblich von einer durchgängigen AM-Prozesskette profitieren kann. Insbesondere:

- komplexe Baugruppen können funktional optimiert und wirtschaftlich gefertigt werden
- akustische Eigenschaften bleiben vollständig erhalten
- Oberflächenqualität und Haptik sind beherrschbar, bedürfen allerdings noch weiterer Forschung zur Optimierung und Validierung
- Abhängigkeiten von Zulieferern können reduziert werden

FULMUS gilt somit als wegweisender Ansatz zur Modernisierung eines traditionellen Handwerks und kann als Blaupause für weitere Industrien dienen, in denen Kleinserien, hohe Qualität und komplexe Strukturen zusammentreffen.

## 4 Potentielle Nutzung der Projektergebnisse

Das Projekt schafft die Grundlage für:

- neue Anwendungen additiver Fertigung im Musikinstrumentenbau
- geringere Abhängigkeiten von Zuliefermärkten außerhalb Europas
- Sicherung regionaler Arbeitsplätze
- Erhöhung der technologischen Attraktivität der Branche für junge Fachkräfte
- nachhaltige und ressourceneffizientere Fertigung

Die entwickelten Prozesse können künftig auf weitere Instrumentenbaugruppen übertragen werden.