

Zusammenfassung Projekt „AMUSE“

Ausführlicher Projekttitle:	„WIR! – I-Ma-Tech – Additive Fertigung im Musikinstrumentenbau; TP 3: Entwicklung von Fertigungstechnologien“
Kurztitel/Akronym:	AMUSE
Projektlaufzeit:	01.02.2021 bis 31.12.2022

Projektbeteiligte Einrichtungen	Ansprechpartner
Berdani Feinste Bestandteile GmbH (kurz: Berdani)	Herr Daniel Hiller
Jürgen Voigt, Meisterwerkstatt für Metallblasinstrumente, Inh. Kerstin Voigt (kurz: Voigt)	Frau Kerstin Voigt
Technische Universität Bergakademie Freiberg (kurz: TUBAF)	Herr Dr. Rezo Aliyev, Herr Dr. Stefan Krinke

Inhaltsverzeichnis

0	Abstract	3
1	Projektziele	4
2	Projektablauf	5
2.1	Auswahlkriterien potentieller Bauteile	5
2.2	Verfahrensauswahl.....	5
2.3	Musterbauteile Voigt.....	7
2.4	Konstruktive Umsetzung und Wirtschaftlichkeit.....	8
2.5	Weiterentwicklung und Anpassung	10
2.6	Musterbauteile Berdani	11
2.7	Konstruktive Umsetzung	11
2.8	Postprozess.....	12

2.8.1	Auswahl geeigneter Verfahren.....	12
2.8.2	Strahlen	13
2.8.3	Plasmaelektrolytisches Polieren.....	14
3	Projektergebnisse.....	15
3.1	Bauteilerprobung Voigt.....	15
3.2	Bauteilerprobung Berdani	15
3.3	Wirtschaftliche und Technologische Gegenüberstellung der Postprozessverfahren	16
4	Potentielle Nutzung der Projektergebnisse	17
4.1	Mögliche Weiterführung.....	17
4.2	Probleme, Optimierungen und Potentiale	17

0 Abstract

Mit dem Vorhaben AMUSE ist das ehrgeizige Ziel der Integration der Additiven Fertigung in den Musikinstrumenten verfolgt worden. Herausforderung dabei ist, geeignete Verfahren sowie Instrumententeile zu ermitteln. Mit den Partnern Berdani Feinste Bestandteile GmbH und Jürgen Voigt Meisterwerkstatt für Metallblasinstrumente stehen sich zwei divergierende Instrumententypen hinsichtlich der Halbzeuge sowie der Fertigungsschritte gegenüber. Entsprechend der unterschiedlichen Anforderungsprofile sind verschiedene Herangehensweisen zu etablieren. Für Bauteile mit mechanischer Beanspruchung bedarf es zuvor diese zu ermitteln, damit sinnvolle Konstruktionsentwicklungen und Verfahren abgeleitet werden können.

Aus ersten Erfahrungen des Partners Berdani im Bereich der additiven Fertigung (engl: Additive Manufacturing (AM); weiter im Text vereinfacht als 3D-Druck bezeichnet) wurde das Potential zur Integration dieses Fertigungsprozesses verdeutlicht. Motivation ist die Unabhängigkeit von Zukaufteilen bei chinesischen Monopolanbietern wegen schwankender Qualität bei gleichzeitig hohen Abnahmestückzahlen sowie Lieferengpässen. Weiterer großer Aspekt ist der stetig steigende Personalmangel an geeigneten Facharbeitern, Berufseinsteigern oder Lehrlingen im vogtländischen Raum. Die Schaffung einer von Personal und Zulieferer unabhängigen Fertigung gewinnt am Standort der Partner zunehmend an Bedeutung.

Mittels Variantenvergleichs konnte schnell das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzverfahren (PBF – Powder Bed Fusion) für beide Partner zur Erzeugung endkonturnaher metallischer Bauteile identifiziert werden. Die jedoch unterschiedlichen Anforderungen ans Bauteil entsprechend statischer Belastung bei Voigt, dynamischer und statischer Belastung bei Berdani erfordern grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen. Auch die Bauteilvielfalt und -komplexität beim Partner Voigt erlaubt eine breitere Auswahl potentieller Bauteile für die additive Fertigung.

Nach erfolgreicher Auswahl einer Musterbaugruppe bei Voigt konnten die Vorteile des 3D-Drucks verdeutlicht werden. Das Fertigen der aus 25 Einzelteilen bestehenden komplexen Baugruppe als ein Bauteil reduziert die Anzahl benötigter Maschinen bis zur Erzeugung ohne End- bzw. Nachbearbeitung auf eins. Weiter werden keine Facharbeiter während des additiven Fertigungsprozesses benötigt. Allerdings ist geschultes Personal für die Bedienung des CAD/CAM-Systems erforderlich. Weiterer Vorteil ist die Möglichkeit der mannlosen Produktion über Nacht, was die Fertigungszeiten der AM-Baumethode reduziert. Die wirtschaftliche Gegenüberstellung zeigt, dass der Materialeinsatz teurer, die Personalkosten aber deutlich geringer sind. Eine geeignete Endbearbeitung ermöglicht eine ähnliche Bauteilgestalt der additiven entsprechend der konventionell gefertigten Baugruppen.

Die erzielten Ergebnisse beim Partner Berdani sind geringer und zeigen zwar das Potential der Integration des 3D-Drucks, allerdings fehlen Anforderungsprofile sowie die Akzeptanz potentieller Kunden, additiv gefertigte Elemente am Streichinstrument zuzulassen. Die Ansätze zeigen, dass die haltungsunterstützenden Anbauteile ebenso für den 3D-Druck in Frage kommen wie die metallischen Spannelemente. Großer Vorteil ist das Ersetzen der Anbauteile wie Schulter- und Kinnhalter aus bedenklichen tropischen Holzsorten mit gedruckten Kunststoff- oder -perspektivisch- Holzteilen.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die additive Fertigung für den Musikinstrumentenbau integrierbar ist und sich somit Fertigungsprozesse vereinfachen, zusammenfassen und verbessern lassen. Das Ausschöpfen der Potentiale steht noch ganz am Anfang.

1 Projektziele

Die konventionelle Herstellung von Bauteilen aus Metall und Kunststoff mit komplexer Geometrie oder individualisierter Bauteile ist technologisch eingeschränkt und durch eine geringe Flexibilität mit hohen Kosten verbunden (Abbildung 1). Diese konventionelle Fertigung bedarf einen teuren und komplexen Maschinenpark, erfahrenes Fachpersonal und Fertigungsfläche. Jede dieser Maschinen muss zusätzlich entsprechend eines Wartungsplans in bestimmten Zeitabständen geprüft werden.



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

Aus ersten Erfahrungen des Partners Berdani im Bereich der additiven Fertigung wurde das Potential zur Integration dieses Fertigungsprozesses verdeutlicht. Motivation ist die Unabhängigkeit von Zukaufteilen bei chinesischen Monopolanbietern wegen schwankender Qualität bei gleichzeitig hohen Abnahmestückzahlen sowie Lieferengpässen. Weiterer großer Aspekt ist der stetig steigende Personalmangel an geeigneten Facharbeitern, Berufseinsteigern oder Lehrlingen im vogtländischen Raum. Die Schaffung einer von Personal und Zulieferer unabhängigen Fertigung gewinnt am Standort der Partner zunehmend an Bedeutung. Die zunehmende Akademisierung bei jungen Leuten ist der Entwicklung industrieller Betriebe entsprechend Autonomie konform. Es Bedarf im Fertigungssektor weniger, dafür stärker qualifizierte Mitarbeiter, welche einerseits CAD/CAM-Anwendungen verstehen und evtl. beherrschen sowie befähigt sind, verschiedene komplexe Fertigungsmaschinen zu bedienen.

Die komplette Prozesskette der additiven Fertigung und die Möglichkeit der Abbildung dieser Prozesskette innerhalb der Firmen wurde untersucht. Die dauerhafte Integration des 3D-Drucks bedarf die Neueinstellung oder die Qualifizierung des bestehenden Personals, die Anschaffung einer AM-Maschine sowie die Ergänzung durch einen geeigneten Postprozess. Hierfür kann mitunter auf bereits existente Maschinen zurückgegriffen werden. Die Prozesskette besteht aus den Schritten (1) Computerunterstütztes Bauteildesign (CAD), (2) Konvertierung in Maschinensprache, (3) Einstellung der Maschinenparameter, (4) Schichtweise Fertigung, (5) Bauteilentnahme, (6) und Nachbehandlung.

Durch die Zusammenarbeit von zwei Industriepartnern und einer Hochschule ist eine gute Verzweigung von Wissenschaft und Wirtschaft entstanden. Neben den bereits genannten Vorteilen ist besonders die Stärkung der eigenen Innovationsfähigkeit durch die kostengünstige Prototypenfertigung von neuen Produktideen zweckdienlich.

Anhand des erstellten Kriterienkatalogs konnte das optimale additive Fertigungsverfahren schnell identifiziert werden. Fokus lag besonders auf dem zu verwendenden metallischen Werkstoff sowie erreichbare minimale Toleranzen sowie Bauraumgröße und Bauraumbestückung. Mittels Variantenvergleichs konnte schnell das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzverfahren (PBF –

powder bed fusion) für beide Partner zur Erzeugung endkonturnaher metallischer Bauteile identifiziert werden.

Die Skalierrelevanz von Bauteilen ist Materialabhängig und im Allgemeinen für die verschiedenen Verfahren bekannt. Die im Projekt entstandene Verbindung zu Additive Drives GmbH als Dienstleister zur Bauteilherstellung in Kupfer, die Erfahrungsträger, Marktführer und im Folgeprojekt „FULMUS“ als Partner dabei sind, besitzen das Wissen und die Erfahrung, Bauteile im Bauraum zu platzieren und herzustellen. Die Beauftragung der Firma Additive Drives GmbH als Dienstleister reduzierte das finanzielle Risiko auf ein Minimum und ermöglichte trotzdem eine wirtschaftliche Bauteilherstellung.

Für kundenspezifische Individualisierungen erscheint gegenwärtig der Markt noch nicht bereit. Besonders im hochpreisigen Segment hegen die Kunden seit jeher gleichbleibend dieselben Ansprüche an Material und Gestalt. Durch diese Erwartungshaltung ist besonders im Streichinstrumentenbau die Einführung neuer Technologien und Materialien schwierig.

Mit den Partnern ist ein Leitfaden zur Integration unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit erstellt worden und ermöglicht ihnen, eigenständig die Kosten überschlägig zu ermitteln.

2 Projektablauf

2.1 Auswahlkriterien potentieller Bauteile

Grundvoraussetzungen der Auswahl geeigneter Musterbauteile sind konträr zu aktuellen Fertigungsansätzen. Besonders komplexe Bauteile bzw. Baugruppen gleichen Materials mit verschiedenen Geometrien, Formänderungen, Hinterschneidungen und Freiformflächen sind für die additive Fertigung prädestiniert. Werden derartige Bauteile konventionell hergestellt, durchlaufen diese im Fertigungsprozess eine Vielzahl an Stationen mit verschiedenen Maschinen bei vergleichsweise langer Bearbeitungszeit, wie beispielsweise das Gewindeschneiden der Tüllen (Abbildung 2 links).



Abbildung 2: Werkstatt Voigt (links) und Berdani (rechts)

Damit werden die beispielsweise aus Buntblech geformten Elemente kostenintensiv. Der Materialeinsatz ist hingegen gemessen am Gesamtaufwand bedeutungslos. Erfahrungswerte des geschulten Personals sind nur durch teilweise jahrelange Einarbeitung übertragbar.

2.2 Verfahrensauswahl

Mithilfe einer Marktanalyse ist eine Übersicht der verschiedenen Verfahrenstechnologien und den verarbeitbaren Materialien entstanden. Dies bildete die Grundlage um eine den Anforderungen, gegeben durch die zu verwendenden Materialien, entsprechende Technologie auszuwählen (Tabelle 1).

Tabelle 1; Auszug der Übersichtstabelle der Technologien mit den zu verarbeitbaren Materialien
(Grau hinterlegt: von großem Interesse im Projekt)

	SLM	EBM	LMD	WAAM	MFDM	MBJ
Edelstahl						
1.4404 / 316L	Industrie		Industrie		Industrie	Industrie
430L			Industrie			
1.4545 / 15-5PH	Industrie		Industrie			
1.4542 / 17-4PH	Industrie		Industrie		Industrie	
1.4540 / PH1	Industrie		Industrie			
1.4938 / M152			Industrie			
Titan						
Ti	Industrie	Industrie	Industrie			
Ti-6Al-4V	Industrie	Industrie	Industrie			
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Industrie		Industrie			
Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr	Industrie		Industrie			
TiAl	Industrie	Industrie	Industrie			
Kupfer						
Cu	Industrie				Industrie	Industrie
Messing						
Bronze	Industrie					
CuAl						
CuAg						
Silberbronze						
CuCrZr	Industrie					
CuNi2SiCr	Industrie					
Nickel						
Ni						
IN625	Industrie				Industrie	
IN718	Industrie	Industrie				
IN939	Industrie					
Invar 36	Industrie					
NiCr						
MCrAlY						
NiTi	(Forschung)	(Forschung)				
Edelmetalle						
Gold	Industrie					
Silber	Industrie					
Platin	Industrie					
Palladium	Industrie					
Sonstige						
Zinn						
Zink						
CoCr	Industrie	Industrie				

Legende: **SLM** Selective Laser Melting **WAAM** Wire Arc Additive Manufacturing
 EBM Electron Beam Melting **MFDM** Metall-FDM
 LMD Laser Metal Deposition **MBJ** Metal Binder Jetting

Im Bereich der Buntblechbläser sind Edelstähle sowie Kupfer und Kupferlegierungen von großem Interesse. Im Gesamtanwendungsfall, so auch bei Zusatz- und Anbauteilen für die Streichinstrumente, rücken die Titanlegierungen wegen dem geringen Gewicht in den Fokus. Dem

speziellen Kundenkreis in der Musikbranche geschuldet rücken die erheblich größeren Produktionskosten im Bedarfsfall nach hinten. Die Verarbeitung von reinem Kupfer ist ein Spezialverfahren, welches nur durch den Kompetenzträger Additive Drives GmbH umsetzbar ist und als Unterauftragnehmer Bauteile für das Projekt fertigt.

Die überschneidende Technologie, welche die Verarbeitung aller interessanten Materialien ermöglicht, ist das SLM-Verfahren (SLM-Selektives Laserstrahlschmelzen; nach DIN 52900: PBF).

2.3 Musterbauteile Voigt

Im Bereich der Blechbläser konnte durch genaue Begutachtung des Portfolios eine aus 25 Einzelteilen zusammengesetzte Baugruppe ermittelt werden. Es handelt sich um den Luftstromverteiler der Schalmeien mit seinen Tüllen (Abbildung 3).



Abbildung 3: Schalmei der Firma Voigt, eingerahmt: Luftstromverteiler

Dieses Bauteil besteht aus einem Innengerüst (Abbildung 4 links), welches aus einer Vielzahl an Teilen besteht, einen Hohlkegelstumpf mit Bohrungen (mittig) und den drei eingeschobenen Quertüllen, wobei in erster Iterationsschleife das Bauteil ohne Quertüllen hergestellt wurde.



Abbildung 4: Einzelteile des Luftstromverteilers

In gegenwärtiger Fertigungsweise wird die für das Innengerüst erforderlichen Buntblechteile aus Blechtafeln getrennt und händig mittels Lötens gefügt. Das Gerüst ist in diesem Stadium größer als der Hohlkegelstumpf. Durch schrittweise Nachbearbeitung des Gerüsts werden Gerüst und Kegelstumpf bis zum spielfreien Sitz ineinander eingepasst. Das erfordert Zeit und Erfahrung des Personals. Letzter Schritt ist das zusammenfügen beider Elemente mittels Lötens. Nachfolgend werden die drei quer zum Hohlkegelstumpf sitzenden Tüllen, welche die Ventilsitze sind, eingelötet. Nach Beendigung des letzten Arbeitsschrittes kann geprüft werden, ob das Bauteil seine Funktion erfüllt oder ob durch Schrumpfung oder groben Materialabtrags beim Einpassen das Bauteil Ausschuss ist.

2.4 Konstruktive Umsetzung und Wirtschaftlichkeit

Mittels CAD wird zunächst das Bauteil virtuell erstellt (Abbildung 5). Die konstruktionsspezifischen Voraussetzungen zur Erstellung derart einfacher Bauteile an das Personal sind flach und können durchaus von Zerspanungsmechanikern in Lehrgängen vermittelt werden.



Abbildung 5: Konstruktive Umsetzung; v. l. n. r.: Traditionsbauteil, Bauteildesign mittels CAD, Bauteilübernahme in Postprozessor (CAM), mittels AM gefertigtes Bauteil

Einfache Geometrien bzw. Bauteile, welche sich aus verschiedenen Standardkörpern zusammensetzen wie der Luftstromverteiler, werden mittels genauer Bauteilabmessung als virtuelles Bauteil aufgebaut. Bauteile mit komplexen Geometrien (bspw. Freiformflächen) können durch geeignete Scanverfahren eingelesen sowie virtuell abgebildet und mittels Reverse-Engineerings vollständig definiert werden, oder, falls eine genaue Krümmungswiedergabe nicht erforderlich ist, können Freiformflächen durch eine geeignete Auswahl an Bedingungen und Beziehungen zu anderen Elementen am Bauteil ohne Scannen im CAD erstellt werden. Die Voraussetzungen an die Qualifikationen des Personals sind in diesem Fall größer und erfordern ingenieurstechnisches Wissen.

Der Bauprozess auf einer EOS M 290-Anlage mit einer Baufläche von 250 mm x 250 mm und einer Stufensprung von 0,1 mm beträgt ca. 3,5 Stunden. Davon entfallen 75 % auf das schichtweise Neubeschichten mittels Pulver, 25 % auf den Pulverschmelzvorgang (Mikroschweißprozess mittels Laser). Bei sinnvoller Ausrichtung des Bauteils im 45° Winkel beträgt die resultierende Fläche 3160 mm² (Abbildung 6).

Vorteile dieser Ausrichtung im Bauraum sind ein minimierter Stufensprungeffekt zwischen den Schichten und damit bessere Oberflächenrauheitswerte des Kegels sowie der Gegebenheit, dass bis 45° Drehung von der Vertikalen keine Stützstruktur erforderlich ist. Damit kann auf innenliegende Stützstrukturen für das Gerüst sowie für die Bohrlöcher verzichtet werden.

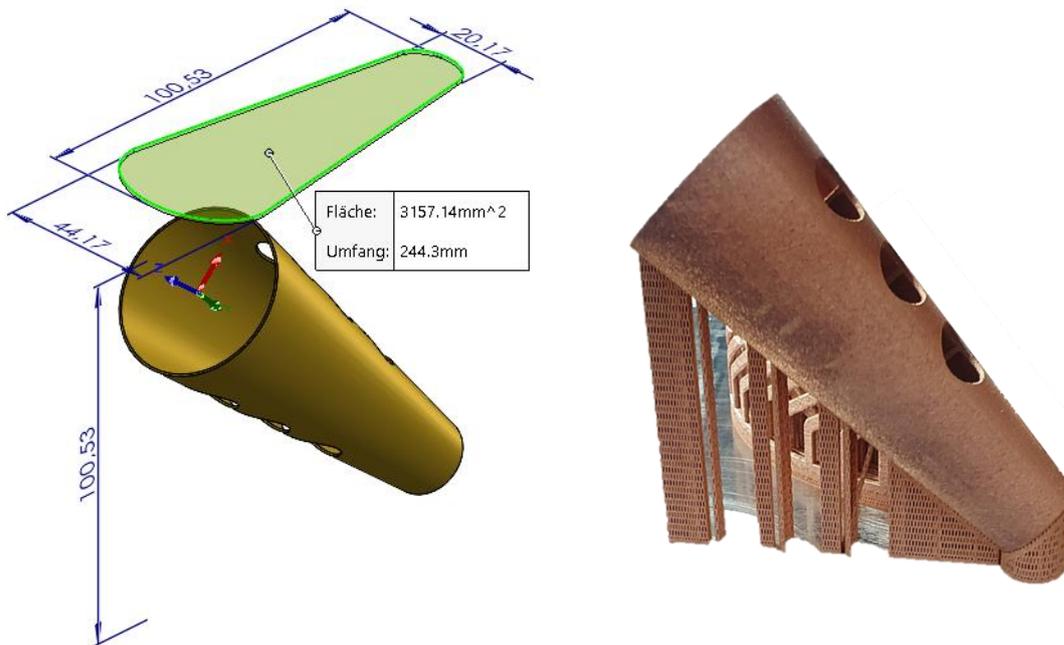


Abbildung 6: Bauprozess im 45°-Winkel; links: resultierende Fläche und Höhe; rechts: generiertes Bauteil mit Stützstruktur

Aus Fertigungstechnischer Sicht ist die Entfernung innenliegender Stützstrukturen schlecht automatisierbar und wäre für die industrielle Umsetzung ein KO-Kriterium. Die Stützstrukturen außen sichern das Bauteil hauptsächlich gegen thermischen Verzug. Weiterer Effekt ist die Reduzierung der projizierten Bauteilfläche, was die Platzierung von bis zu 12 Bauteilen auf einer Bauplattform ermöglicht (Abbildung 7).

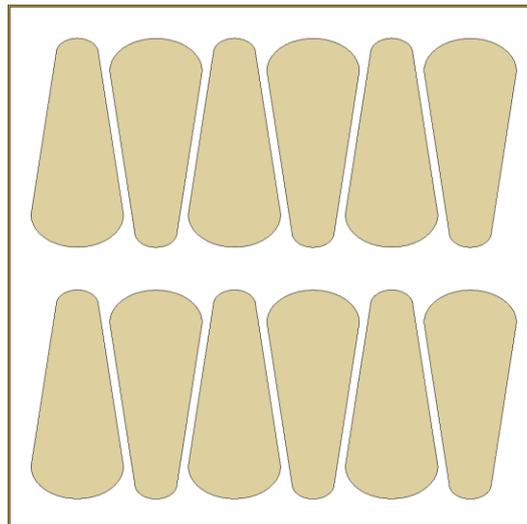


Abbildung 7: Maximale Bauplächenausnutzung der Beispielanlage mit den Maßen 250 mm x 250 mm (EOS 290 M)

In Tabelle 2 werden die Fertigungszeiten bei unterschiedlicher Bauraumausnutzung dargestellt. Eine sinnvolle und vollständige Auslastung der Bauteilfläche ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten stets anzustreben, da der Beschichtungsvorgang von der Bauteilgröße unabhängig ist und nur der Schmelzvorgang sich entsprechend der Bauteilanzahl aufsummiert.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Fertigungszeit bei unterschiedlicher Maschinenauslastung

Anzahl Bauteile	Dauer Beschichtungsvorgang in Minuten	Dauer Schmelzvorgang in Minuten	Dauer Gesamt in Minuten (& Stunden)
1	167	50	217 (3,6)
2	167	100	267 (4,5)
12	167	600	767 (12,8)

Durch einen geeigneten Postprozess kann auf eine extrem feine Auflösung (Stufensprung zwischen 30 μm und 50 μm) verzichtet werden. Die Halbierung der Auflösung von 0,05 mm auf 0,1 mm halbiert die Anzahl und damit die Dauer der Beschichtungs- und Schmelzvorgänge.

Die Reduzierung der Stützstruktur birgt auch wirtschaftliche Interessen, da einerseits weniger Material zugunsten der Gesamtdauer des Postprozesses entfernt werden muss, andererseits wird weniger Material für den Bauprozess benötigt. Die Kosten des verwendeten Kupferpulvers betragen pro Kilogramm 80 EUR. Bei einer Gesamtmasse des Bauteils von 80 g belaufen sich die Materialkosten auf 6,40 EUR pro Bauteil. Für wirtschaftliche Betrachtungen muss hier der Stundensatz der Maschine sowie die Abschreibung aufgeschlagen werden.

Die Gesamtoberfläche des Bauteils beträgt 32100 mm^2 (ca. $\frac{1}{2}$ A4-Seite), wodurch für den Postprozess das Plasmaelektrolytische Polieren infrage kommt.

2.5 Weiterentwicklung und Anpassung

Im nächsten Entwicklungsschritt ist das Bauteil um die Quertüllen erweitert worden (Abbildung 8). Wegen des erforderlichen Gewindeschnitts und der damit geforderten Rundheit mussten diese Tüllen nach Fertigung besonders auf Geometrieabweichung geprüft werden. Der Einfluss verschiedener Postprozesse auf die inneren Spannungen ist an den Quertüllen kritisch, da mögliche Formabweichungen nur einem geringen Toleranzfeld unterlegen sind.

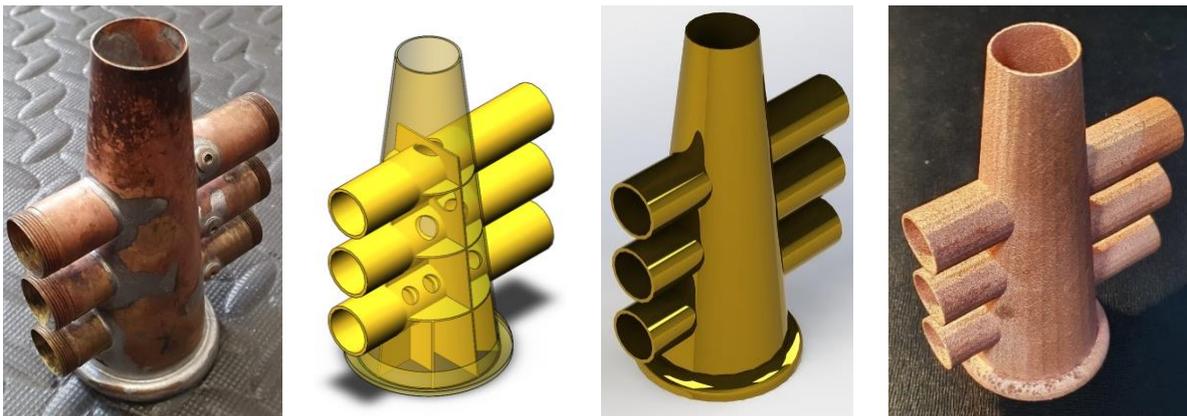


Abbildung 8: Konstruktive Erweiterung; v. l. n. r.: Traditionsbauteil, Bauteildesign mittels CAD, Bauteilübernahme in Postprozessor (CAM), mittels AM gefertigtes Bauteil

Aufgrund der Orientierung im Bauraum mit 45° Winkelanstellung wird der resultierende Platzbedarf nur unbedeutend größer (Abbildung 9).

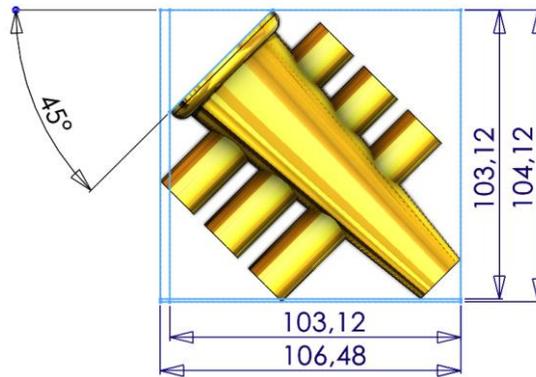


Abbildung 9: Bauteildimensionen mit und ohne Tüllen

Der Massezuwachs beträgt 120 g (von 80 g auf 200 g), wodurch die Materialkosten auf 16,00 EUR pro Stück steigen. Die resultierende Gesamtoberfläche mit 56800 mm² entspricht knapp einer A4-Seite, womit die Maximalfläche zum plasmalektrolytischen Polieren nahezu erreicht ist. Weitere Adaptionen sind folglich unter Beibehaltung dieses Polierprozesses nach der Bauteilfertigung nicht möglich.

2.6 Musterbauteile Berdani

Im Bereich der Streichinstrumente sind potentielle Musterbauteile für das metallbasierte additive Verfahren schwer auffindbar. Vorhandene Hebel, Schraubelemente und Spannvorrichtungen wie Kinnhaltermechanik oder Feinstimmarm (Abbildung 10) sollen aufgrund der etwaigen Lieferschwierigen aus Fernost bestenfalls durch additiv gefertigte Bauteile ersetzt werden, nur gestaltet sich die Umsetzung schwierig. Besonders die Interessenkonflikte zwischen möglicher Designanpassungen und der Erwartungshaltung potentieller Kunden erschwert die konstruktive Neugestaltung.

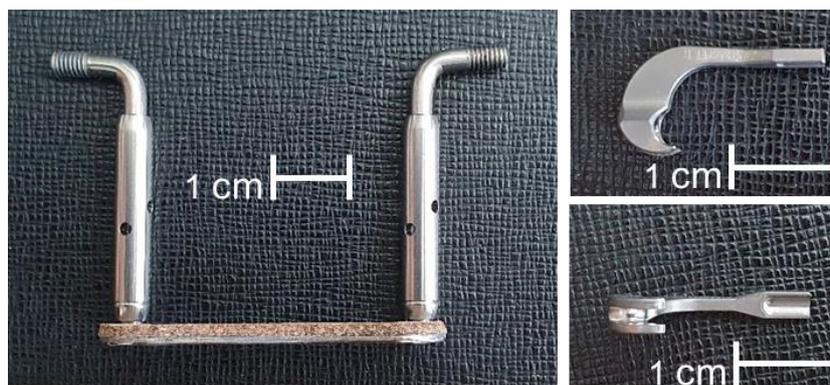


Abbildung 10: Anbauteile Streichinstrumente; links: Kinnhaltermechanik, rechts: Feinstimmarm

2.7 Konstruktive Umsetzung

Die Kinnhaltermechanik wurde als Bauteil zur Umgestaltung ausgewählt, da die Lieferbedingungen eine schnellstmögliche Unabhängigkeit erfordern. Da die Abmessungen des Geigenkörpers verschiedener Geigen zwischen Decke und Boden Schwankungen im Bereich von 5 mm aufweisen (Abbildung 11) ist eine starre Lösung nicht umsetzbar. Ansatz war eine in sich gleitende

Schiebemechanik. Eine vorgesehener Gewindestift soll den Halter fixieren, um ein selbstlösen zu vermeiden. Die gewählte Form erlaubt die Beibehaltung des Knaufs, welcher den Seitenspanner hält.



Abbildung 11: links: montierte Kinnhaltermechanik; rechts: Schiebemechanismus

Auftretende Probleme waren bei dieser Lösung, dass Zugkräfte zum Vorspannen nicht induziert werden können, dass ein Schiebemechanismus mit idealen Gleiteigenschaften nur durch geeignete Postprozesse fertigbar ist sowie die ebenfalls hohen Kundenanforderungen in Haptik und Optik an dieses Bauteil. Selbst die verschiedenen Iterationsschritte (Abbildung 12) konnten keine zufriedenstellende Lösung hervorbringen.



Abbildung 12: links: Iterationsschritte; rechts: letzter Iterationsschritt

Folgende Anforderungen an das Bauteil führen zu divergierenden Konstruktionslösungen:

- hohe mechanische Belastungen erfordern steife Konstruktionen
- hohe haptische Ansprüche führen konstruktiv zu großen Radien und Freiformflächen mit geringen Rauheitswerten
- Unterschiedliche Abmessungen des Instrumentenkörpers führen zu adaptiven Konstruktionslösungen

Eine Kompromisslösung aller Anforderungen konnte nicht identifiziert werden. Das durch ein Gesamtbauteil aus Halterung und Kinnhalter entstehende Potential an Verbesserungen bleibt bestehen, konnte im Projekt jedoch nicht gelöst werden.

2.8 Postprozess

2.8.1 Auswahl geeigneter Verfahren

Nach Entnahme der Bauplatte auf welcher sich die Bauteile befinden, werden diese abgetrennt. Ebenso werden die noch mit den Bauteilen verbundenen Stützstrukturen entfernt (z.B. Drahterodieren, Wasserstrahl- oder Trennscheiden).

Die im PBF-Prozess hergestellten Bauteile weisen eine raue und matte Oberfläche auf. Durch das fertigungsbedingte lokale aufschmelzen von metallischem Pulver gestaltet sich die Oberfläche aus teilaufgeschmolzenen bzw. teilweise angeschmolzenen kugelförmigen Partikeln im Größenbereich der verwendeten Korngrößen. Zur Charakterisierung der Oberfläche solcher additiv gefertigten Bauteile eignen sich Flächenrauheitswerte die mittels optischer Messsysteme ermittelt werden. Abbildung 13 zeigt beispielhaft makroskopische Aufnahmen sowie 3D-Oberflächenprofile (Messsystem: MarSurf CM explorer, Fa. MAHR) des unbearbeiteten Bauteils ohne Postprozess. Die ermittelte Oberflächenrauheit Sq beträgt ca. 15 μm .

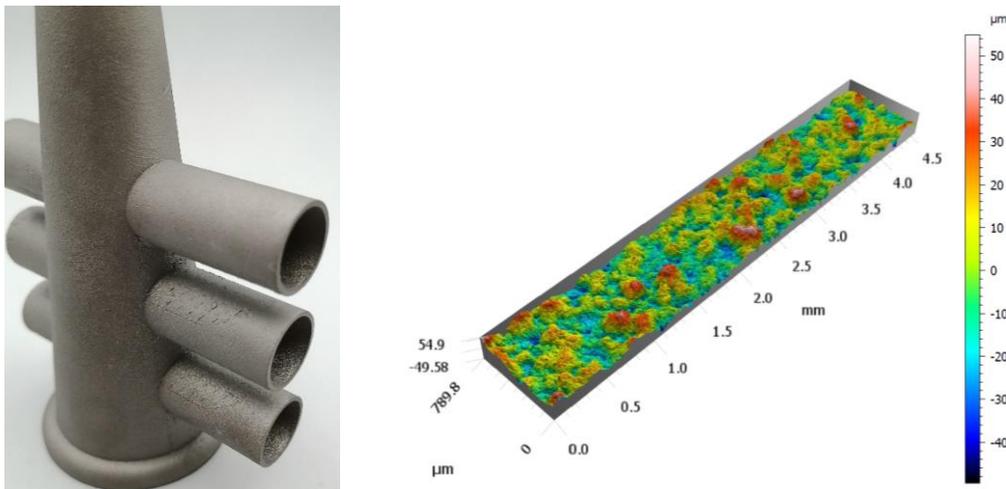


Abbildung 13: Vergleichende makroskopische Aufnahme (links) und 3D-Darstellung des Oberflächenprofils (rechts) vom unbearbeiteten Bauteil

Da die zu substituierenden konventionell gefertigten Bauteile eine im Vergleich zu additiv gefertigten Bauteilen Oberflächen mit sehr niedriger Rauheit und hohem Glanzgrad aufweisen, wurden geeignete Nachbehandlungsverfahren mit dieser Zielvorgabe evaluiert. Konventionelle Methoden wie Schleifen und Polieren sind bei komplex geformten Bauteilen, wie dem hier Vorliegenden, nicht oder nur mit erheblichem Zeit-, Maschinen- und/oder humanem Arbeitsaufwand möglich und wurden aus diesem Grund nicht betrachtet.

2.8.2 Strahlen

Mechanisches Strahlen ist ein Verfahren welches neben der Beseitigung von Verunreinigungen und Oxidschichten auch zum Glätten rauer Oberflächen eingesetzt werden kann. Durch die Auswahl der verwendeten Partikel kann der Effekt beim Glätten beeinflusst werden. Werden scharfkantige bzw. spratzige Partikel eingesetzt, erfolgt ein spanabhebendes bzw. abtragendes Glätten, während bei der Nutzung runder bzw. sphärischer Partikel der abtragende Effekt kaum bis gar nicht zum Tragen kommt und die Glättung infolge plastischer Deformation der Oberfläche erfolgt. Die erzielbare Oberflächenrauheit wird neben der Partikelform auch stark durch die kinetische Energie der Partikel bestimmt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden hier sowohl Strahlmittel mit sphärischer als auch spratziger Partikelform verwendet. Es wurde ebenso eine Strategie zur schrittweisen Reduzierung der kinetischen Partikelenergie erarbeitet, welche eine hohe Reduktion der Oberflächenrauheit bei möglichst kurzer Bearbeitungszeit ermöglicht (Abbildung 14).

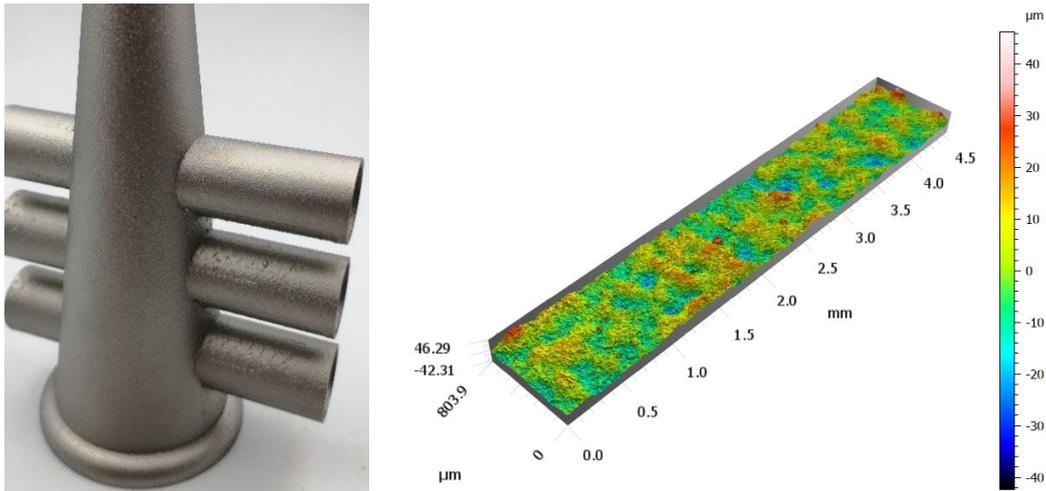


Abbildung 14: Vergleichende makroskopische Aufnahme (links) und 3D-Darstellung des Oberflächenprofils (rechts) vom gestrahlten Bauteil

2.8.3 Plasmaelektrolytisches Polieren

Das plasmaelektrolytische Polieren ist ein abtragendes Endbearbeitungsverfahren, welches eine starke Rauheitsreduzierung und einen hohen Glanz bei vergleichsweise (z.B. elektrochemisches oder chemisches Polieren) kurzen Bearbeitungszeiten und unter Verwendung deutlich umweltverträglicherer Elektrolytlösungen ermöglicht. Hierbei wird das anodisch kontaktierte Bauteil bei Gleichspannungen im Bereich von ca. 280 V bis 350 V in ein mit wässriger Elektrolytlösung gefülltes kathodisch gepoltes Becken eingetaucht. Um das Bauteil wird dadurch eine ionisierte Gas-Dampf-Schicht (Plasma) gebildet die ebenso wie der elektrochemische Anteil zum Abtragprozess beiträgt. Da der Prozess an allen elektrisch leitfähigen Teilen des Bauteils wirksam wird, eignet sich das Verfahren besonders wie im vorliegenden Fall für komplex geformte Bauteile. Beschränkungen für das Verfahren ergeben sich aus der prozesstypischen Stromdichte (ca. 0,1 – 0,3 A/cm²), welche die zu bearbeitende Bauteilgröße in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Leistung der Prozessenergiequelle limitiert. Die verwendete Anlage ermöglicht das Polieren von Bauteilen bis zu einer A4-Seite großen äquivalenten Oberfläche. Die Stärken des plasmaelektrolytischen Polierens, wie das erzeugen besonders glatter Oberflächen innerhalb kurzer Bearbeitungszeiten, kommen besonders dann zum Tragen, wenn die zu bearbeitenden Bauteile ebenfalls bereits über möglichst glatte Oberflächen verfügen. Hierzu empfiehlt sich eine Vorbehandlung bspw. durch mechanisches Strahlen (Abbildung 15).

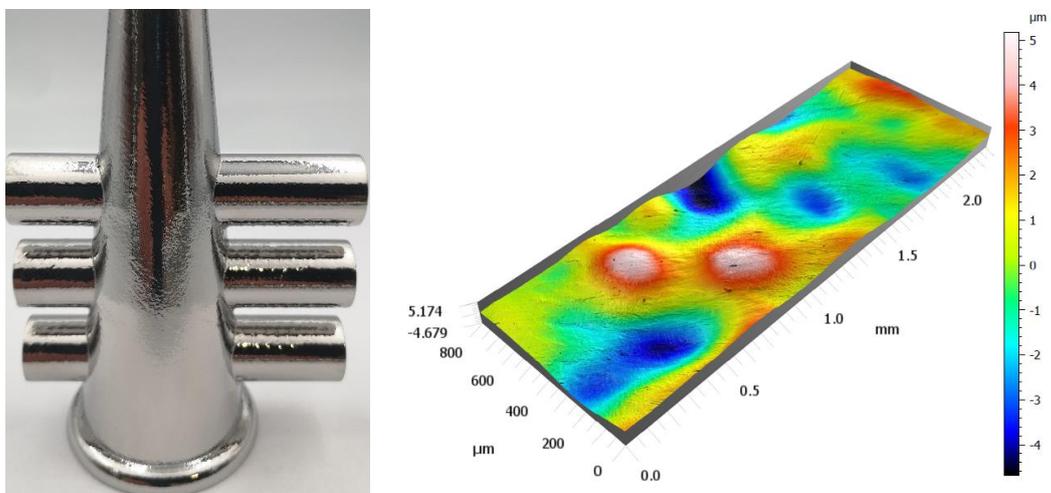


Abbildung 15: Vergleichende makroskopische Aufnahme (links) und 3D-Darstellung des Oberflächenprofils (rechts) vom gestrahlten und polierten Bauteil

3 Projektergebnisse

3.1 Bauteilerprobung Voigt

Das entwickelte Verbundbauteil wird im Anschluss durch die Firma Voigt genauer untersucht. Neben den genauen Sitz des Bauteils, vorgegeben durch angrenzende Bauteile, ist eine weitere Anforderung, den Einbau der Wechsel zu ermöglichen. Dafür werden die Quertüllen bzw. Büchsen auf Maß ausgerieben und im Folgeschritt mit einem Gewinde (beides Trennverfahren) versehen (Abbildung 16).

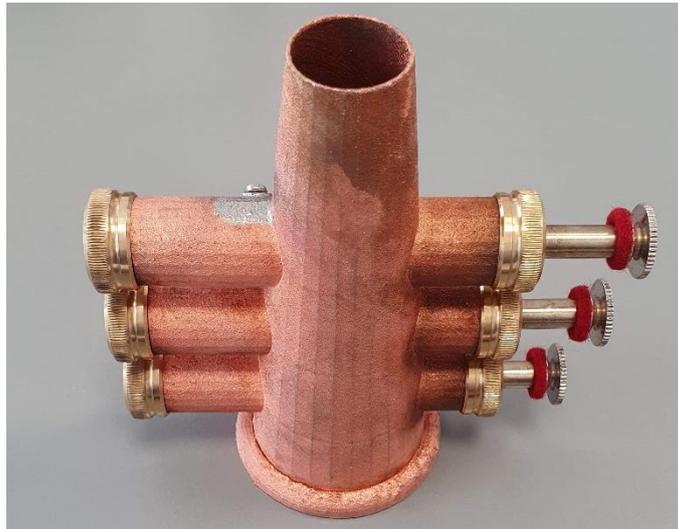


Abbildung 16: Luftstromverteiler mit Büchsen und Wechsel

Die Fertigung mittels SLM ermöglicht zunächst die formgenaue Bauteilherstellung. Nachfolgende Fertigungsschritte am Bauteil sind umsetzbar.

Fortführende Bewertungskriterien sind Optik, Haptik und Funktionalität. Im Vergleich zu Abbildung 3 ist erkennbar, dass optische Anforderungen ohne nachfolgende Prozessschritte zur Aufwertung des gedruckten Bauteils unerfüllt bleiben. Ursache liegt in der Technologie des SLM-Verfahrens selbst (oder PBF-Verfahrens). Durch den schichtweisen Aufbau im Pulverbett mittels selektivem Schmelzen der Pulverpartikel in jeder Schicht entsprechend des aktuellen Bauteilquerschnitts haften teilweise nach Bauteilentnahme an der Randzone zwischen freiem Pulver und Bauteil Restpulverteilchen an der Oberfläche und sorgen für eine raue Oberfläche.

Folgend ist dieses Phänomen verantwortlich für eine schlechtere Haptik, da das Bauteil entgegen dem Traditionsbauteil keine glatte Oberfläche besitzt.

Zur Funktionalität kann angenommen werden, da auch beim Traditionsbauteil Überreste bzw. kleine Perlen vom Fügeverfahren mittels Lötens im Inneren vorhanden sind, dass die raueren Oberflächen zu keinen Einschränkungen, wie beispielsweise Tonveränderung durch eine andere Luftverwirbelung, führt. Dies wird allerdings im Folgeprojekt „FULMUS“ genauer untersucht.

3.2 Bauteilerprobung Berdani

Die Fertigung des Bauteils nach letztem Iterationsschritt in Kupfer zeigt die gleichen Probleme, gegeben durch die fertigungsbedingten Rauheiten des SLM-Verfahrens, welche auch bei Voigt dazu führen, dass eine Nachbehandlung unumgänglich ist (Abbildung 17).

Die Fertigung des Schiebemechanismus im zusammengebauten Zustand als ein Baugruppenteil führt dazu, dass der Schiebemechanismus funktionslos ist, die getrennte Fertigung ermöglicht zwar eine entsprechende Nachbehandlung, nur kann die Gleitfunktion wegen unvorhersehbarer Bauteilreduktion nicht garantiert werden.



Abbildung 17: In Kupfer mittels SLM getrennt hergestellter Schiebemechanismus

3.3 Wirtschaftliche und Technologische Gegenüberstellung der Postprozessverfahren

Mechanisches Strahlen stellt ein kostengünstiges Nachbearbeitungsverfahren dar, welches durch Nutzung eines Bearbeitungsautomaten reproduzierbare Ergebnisse bei gleichzeitig geringem humanem Arbeitsaufwand liefert. In Automaten können mehrere Bauteile gleichzeitig gestrahlt werden.

Das plasmaelektrolytische Polieren benötigt insbesondere bei größeren Bauteilen leistungsstarke und somit vergleichsweise teure Prozessenergiequellen. Auch wenn mit diesem Verfahren in vergleichsweise kurzer Zeit hochglänzende Oberflächen erzeugt werden können, beschränkt sich die Bearbeitung aufgrund der notwendigen Leistung bei großen Teilen in der Regel auf eine Einzelbearbeitung.

Während mit dem mechanischen Strahlen sehr raue Oberflächen in kurzer Zeit bis zu einer durch das verwendete Strahlmittel und dessen Partikelgröße bestimmten Rauheit verringern lässt, eignet sich das plasmaelektrolytische Polieren als ein finaler Polierprozess zur Minimierung der Rauheit bis hin zu spiegelglänzenden Oberflächen. Eine Halbierung der Rauheitskennwerte ist mit diesem Verfahren innerhalb von 5 bis 10 Minuten Bearbeitungszeit möglich.

Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass sich die beiden Verfahren in der Reihenfolge Strahlen und sich anschließendes Plasmaelektrolytisches Polieren ergänzen.

Mit der Strategie der schrittweisen Reduzierung der kinetischen Partikelenergie konnte die Ausgangsrauheit durch 30-minütiges Strahlen mit $S_q = 8 \mu\text{m}$ nahezu halbiert werden. Durch das anschließend durchgeführte Plasmapolieren konnte die finale Rauheit nochmals um das 4-fache auf $S_q = 1,8 \mu\text{m}$ reduziert werden.

4 Potentielle Nutzung der Projektergebnisse

4.1 Mögliche Weiterführung

Die verschiedenen Komplikationen führten zum Verwerfen des ersten Konstruktionsansatzes. Folgeansatz ist ein formelastisches Spannteils zur Montage am Geigenkörper (Abbildung 18 links). Dafür sind zunächst die erforderlichen Spannkkräfte, welche der Einspannbelastung zwischen Schulter und Kinn standhalten, festgestellt worden. Nach Ermitteln der erforderlichen Umdrehungen zum Festspannen des Halters auf dem Geigenkörper wurde dies mit gleicher Umdrehungsanzahl auf einen Kraftsensor durchgeführt. Die Unterschiedlichen Steifigkeiten der eingespannten Körper bleiben unberücksichtigt. Die Messungen ergeben beim Anziehen etwa 100 N (kumulierter Verlauf - mittig) und beim Lösen etwa 80 N (rechts).

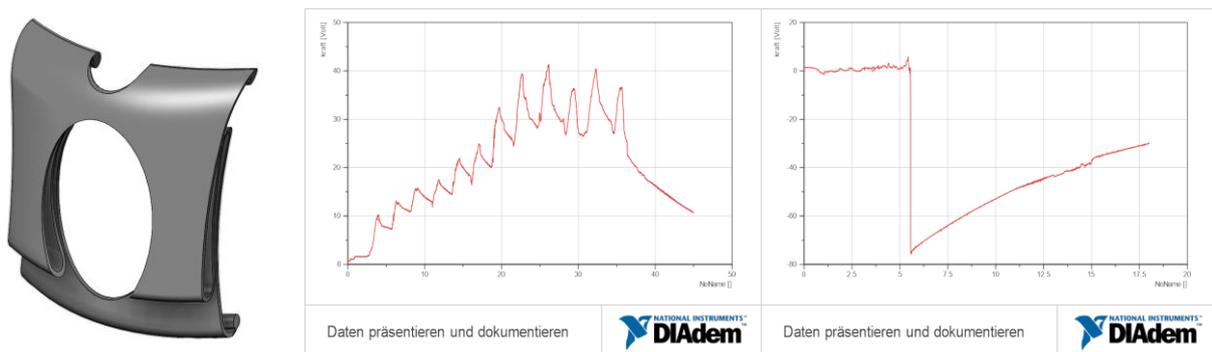


Abbildung 18: links: Spannhalter; mittig: Kraftverlauf beim Anziehen; rechts: Kraftverlauf beim Lösen

4.2 Probleme, Optimierungen und Potentiale

Die Etablierung einer neuen Fertigungsmethode mit den erforderlichen Postprozessen setzt verschiedene Aspekte und ein gewisses Knowhow voraus. Zur Vermeidung von Problemen muss bekannt sein, dass die additive Fertigung die Herstellung einfacher Bauteile mit geringem Fertigungsbedarf nicht ersetzen wird, wie beispielsweise die Herstellung rotationssymmetrischer Bauteile mittels Drehmaschine. Bauteile mit komplexen Geometrien, welche einen hohen Fertigungsaufwand besitzen bzw. verschiedene Fertigungsschritte durchlaufen, besitzen Potential um additiv gefertigt zu werden. Das Erstellen eines klaren Anforderungsprofils äquivalent eines Lastenheftes sowie eine Analyse zur Wirtschaftlichkeit sind sinnvolle Werkzeuge um Fehlentscheidungen zu umgehen.

Im Musikinstrumentenbau spielt neben den Klangeigenschaften auch die Ästhetik und Haptik eine entscheidende Rolle. Potentielle Veränderungen müssen hier durch repräsentative Umfragen erhoben werden. Hierbei ist das entscheidendste Kriterium der Klang, da dieser den individuellen Charakter jedes Instruments teilweise seit Jahrhunderten bestimmt. Grund genug, um im Folgeprojekt „FULMUS“ daraus einen Schwerpunkt zu formulieren.

Das additive Fertigen verlangt in den meisten Anwendungsfällen einen sinnvollen Postprozess. Dies muss in der wirtschaftlichen Betrachtung berücksichtigt werden. Neben dem von der Bauplattform mechanischen Trennen der im Pulverbett gefertigten Metallbauteile folgt der Nachbearbeitungsprozess der teilweise komplexen Geometrien (Hinterschneidungen und Freiformflächen). Hierfür sind Verfahren gängig, welche für sämtliche Oberflächenformen anwendbar sind, wie beispielsweise das Strömungsschleifen, das Strahlen und das elektrolytische sowie das plasmaelektrolytische Polieren.

Die Gegenüberstellung eines konventionell gefertigten Bauteils mit einem additiv gefertigten Bauteil einschließlich Postprozess zeigt Abbildung 19. Innere Bauteilspannungen treten häufig im Postprozess aufgrund des Oberflächenabtrags unter mechanischer oder thermischer Einwirkung auf (Öffnung des Hohlkegelstumpfes).

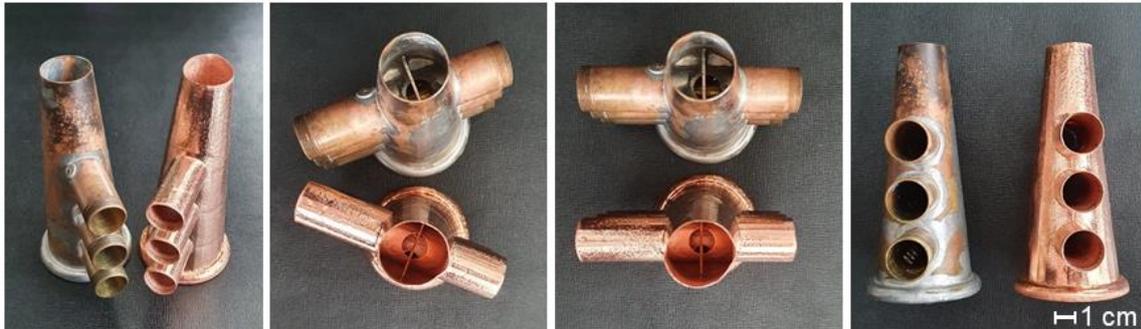


Abbildung 19: Vergleich des konventionell gefertigten (jeweils links bzw. unten) sowie des additiv gefertigten Luftstromverteilers der Firma Voigt

Die Versuche zeigen außerdem, dass die Materialeigenschaften elektrische Leit- und Wärmeleitfähigkeit großen Einfluss auf die inneren Spannungen haben und somit die Materialvorauswahl dies berücksichtigen muss. Der Vergleich zwischen Kupfer- und Edelstahlbauteil (Abbildung 20– roter Kreis) verdeutlicht diese Materialabhängigkeit.



Abbildung 20: Luftstromverteiler aus Kupfer (links) und Edelstahl (rechts)

Ein weiteres Bauteil, gefertigt aus einer Titanlegierung, ist für weitere Betrachtungen nicht wirtschaftlich, da die Gesamtkosten um Faktoren größer sind. Zur Veranschaulichung lässt sich für Edelstahlpulver ein Preis von 10,00 EUR/Kg feststellen, für Titanlegierungen von 200,00 EUR/Kg. Dieser Trend setzt sich bei der Elektrolytlösung für das Plasmapolieren fort. Für Edelstahl belaufen sich die Kosten für das Füllen der Wanne auf 20,00 EUR respektive 160,00 EUR für Titanlegierungen. Die maximale Anzahl von Polierdurchgängen mit derselben Elektrolytlösung beläuft sich für Edelstahlbauteile auf ca. 5000, für Titanbauteile auf ca. 50. Insgesamt beträgt der Kostenunterschied das 16.000-fache und ist für eine zu etablierende Standardfertigungsstrecke in der Bauteilfertigung von Blechbläserteilen nicht begründbar.