

Endbearbeitung additiv gefertigter Bauteile mithilfe integrierter Referenzgeometrien

Hybride Prozesskette für die additive Fertigung

M. Krasniqi, W. Brandes, F. Löffler

ZUSAMMENFASSUNG Die hybride Fertigung, die additive und konventionelle Fertigungsverfahren kombiniert, ist eine effiziente Methode zur Herstellung komplexer Metallbauteile mit hoher Maßhaltigkeit. An einem Krümmersammler wird eine optimierte Prozesskette mit selektivem Laserstrahlschmelzen (PBF/LB-M) und spanender Endbearbeitung vorgestellt. Anhand einer mitgedruckten Zentrierungsvorrichtung werden Abweichungen deutlich reduziert und die Prozessstabilität erhöht. Die Ergebnisse belegen die Eignung der hybriden Fertigung für funktionskritische Ersatzteile und zeigen Potenziale für den industriellen Einsatz auf.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Messtechnik, Reverse Engineering

Hybrid process chain for additive manufacturing

ABSTRACT Hybrid manufacturing combines additive and conventional manufacturing processes to efficiently produce complex metal components with high dimensional accuracy. An optimized process chain with selective laser melting and mechanical post-processing is presented for a manifold collector. A co-printed centering surface leads to significantly reduced deviations and increases process stability. The results demonstrate the suitability of hybrid manufacturing for functionally critical spare parts and underscore its potential for use in industry.

1 Einleitung

Die additive Fertigung (AF) hat sich in den letzten Jahren als Schlüsseltechnologie der modernen Produktion etabliert. Sie erlaubt den direkten Aufbau komplexer Geometrien aus digitalen Modellen und bietet eine hohe Gestaltungsfreiheit bei gleichzeitig effizientem Materialeinsatz [1–3]. Besonders bei metallischen Bauteilen eröffnet AF neue Potenziale für Funktionsintegration und Individualisierung. Die industrielle Nutzung bleibt jedoch durch technologische Grenzen eingeschränkt. Dazu zählen vor allem die unzureichende Oberflächenqualität, begrenzte Maßhaltigkeit und die vergleichsweise geringe Produktivität generativer Verfahren [4–6].

Ein wesentlicher Grund für diese Defizite liegt in der physikalischen Natur des schichtweisen Aufbaus. Prozessbedingte Effekte wie Wärmeeintrag, Schrumpfung oder Pulveranhaftungen führen

zu Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geometrie sowie zu hohen Oberflächenrauheiten [7]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden vermehrt hybride Fertigungsstrategien entwickelt, bei denen additive und subtraktive Verfahren innerhalb einer durchgängigen Prozesskette kombiniert werden [8–13]. Ziel ist es, die gestalterische Freiheit der AF mit der Oberflächen-genauigkeit spanender Verfahren zu verbinden. **Tabelle 1** zeigt, wie sich die Stärken additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren innerhalb hybrider Prozessketten ergänzen lassen.

Die Bewertung der Kriterien erfolgt qualitativ auf Basis typischer, verfahrensspezifischer Eigenschaften, wie sie in der aktuellen Fachliteratur beschrieben sind [14, 15]. Dabei wurden vor allem Aspekte wie Designfreiheit, Oberflächenqualität, Materialeffizienz und Produktivität berücksichtigt, um den funktionalen Mehrwert hybrider Ansätze herauszuarbeiten.

Tabelle 1. Vergleich von additiver, subtraktiver und hybrider Fertigung.

Kriterium	Additive Fertigung	Subtraktive Fertigung	Hybride Fertigung
Designfreiheit	Hoch	Niedrig	Hoch
Produktivität	Niedrig	Hoch	Mittel
Oberflächenqualität	Niedrig	Hoch	Hoch
Materialeffizienz	Hoch	Niedrig	Hoch
(Near-)Net-Shape	Mittel	Hoch	Hoch

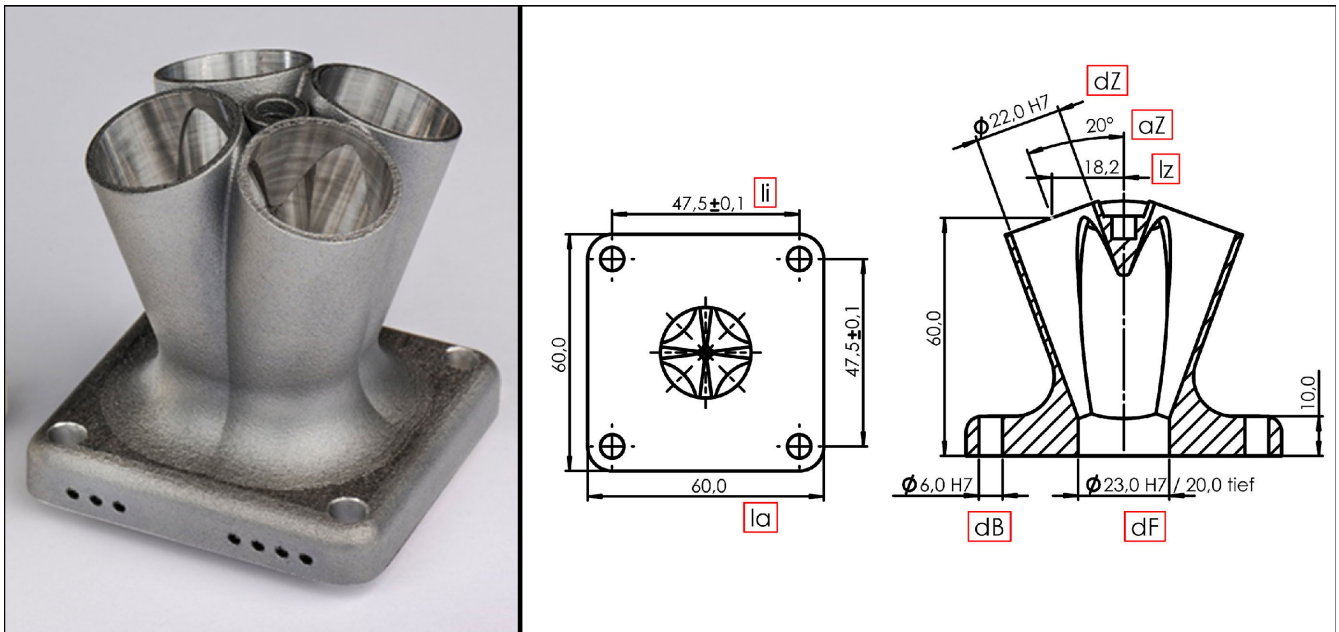


Bild 1 Links: Hybrid gefertigter Krümmersammler. Rechts: Technische Zeichnung des Krümmersammlers mit markierten Messmerkmalen.
Grafik: PTB Braunschweig

Hybride Ansätze haben in zahlreichen Studien ihre technische Machbarkeit gezeigt. Dabei lassen sich zwei grundsätzliche Entwicklungsrichtungen unterscheiden: Einige Arbeiten befassen sich mit integrierten Maschinenkonzepten, bei denen die AF und subtraktive Endbearbeitung innerhalb einer gemeinsamen Anlage erfolgt [8]. Diese Konzepte minimieren Umspannvorgänge und ermöglichen eine Bearbeitung in einer einzigen Aufspannung, sind jedoch durch begrenzte Baugrößen, hohe Investitionskosten und eingeschränkte Flexibilität in der industriellen Anwendung limitiert. Zum anderen existieren Studien, in denen additive und zerspanende Prozesse auf separaten Maschinen realisiert werden, wobei beide Schritte nacheinander erfolgen [10, 16]. Dieser Beitrag ordnet sich der zweiten Kategorie zu und erweitert bestehende Arbeiten um eine gezielte Analyse der Bauteilreferenzierung innerhalb getrennter Prozessketten.

Eine zentrale Herausforderung solcher hybrider Ansätze besteht in der exakten Positionierung des additiv hergestellten Bauteils für die nachfolgende spanende Endbearbeitung. Zwar erlauben etablierte Nullpunktspannsysteme eine reproduzierbare Fixierung [17], jedoch können bereits geringe Toleranzen im Spannsystem oder thermisch induzierte Verzüge beim Umspannen zu Abweichungen führen [10, 18].

Vor diesem Hintergrund kommt der Integration von Referenzierungsmerkmalen in das Bauteildesign eine zunehmende Bedeutung zu. Dabei werden geometrische Elemente bereits im PBF/LB-M-Prozess so ausgelegt, dass sie als definierte Bezugselemente für die Endbearbeitung dienen. Ferchow et al. [10] demonstrieren ein solches Konzept anhand einer mitgedruckten Spannvorrichtung, die eine direkte Fixierung für die Endbearbeitung ermöglicht. Im Gegensatz dazu beschreiben Cornelius et al. [19] einen hybriden Ansatz ohne integrierte Referenzierung, bei dem die Ausrichtung durch externe Merkmale und zusätzliche Scanprozesse erfolgt.

Die vorliegende Arbeit erweitert den bestehenden Forschungsstand um eine werkstückintegrierte Zentrierhilfe, die direkt im

additiven Fertigungsprozess mitgedruckt wird und als Bezugsebene für die spanende Endbearbeitung dient. Anders als permanente Spannschnittstellen aus bisherigen Studien erlaubt diese gezielt gestaltete Referenzstruktur eine direkte, werkstückbezogene Positionierung ohne zusätzliche Vorrichtungen oder erneute Umspannvorgänge.

Die zentrale Hypothese dieser Arbeit ist, dass sich mithilfe der integrierten Zentrierhilfe die Abweichungen gegenüber konventionellen Nullpunktspannsystemen deutlich reduzieren lassen. In der Folge sollen sowohl die Prozessgenauigkeit und Reproduzierbarkeit erhöht als auch der zeitliche Aufwand innerhalb der hybriden Prozesskette verringert werden.

Zur Überprüfung dieser Hypothese wird ein Krümmersammler als Demonstrator entwickelt und vollständig entlang der digitalen und physischen Prozesskette begleitet. Dies umfasst die Konstruktion, die AF und die spanende Endbearbeitung bis hin zur abschließenden Qualitätsanalyse. Im Mittelpunkt stehen die messtechnische Erfassung geometrischer Abweichungen und die Analyse der Reproduzierbarkeit über mehrere Fertigungsdurchläufe. Die daraus abgeleiteten Ergebnisse erlauben eine quantitative Bewertung der integrierten Zentrierhilfe und liefern Impulse für die methodische Weiterentwicklung hybrider Fertigungsprozesse.

2 Integration in hybride Systeme von additiv gefertigten Komponenten

2.1 Analyse der Anforderungen anhand eines Demonstratorbauteils

Um die Anforderungen an die Integration additiv gefertigter Komponenten in hybride Systeme eingehend zu erörtern, wird in dieser Arbeit ein Demonstratorbauteil herangezogen. Der betrachtete Krümmersammler ist kein in der Praxis eingesetztes Bauteil, sondern ein Modell mit hohem Potenzial für die hybride

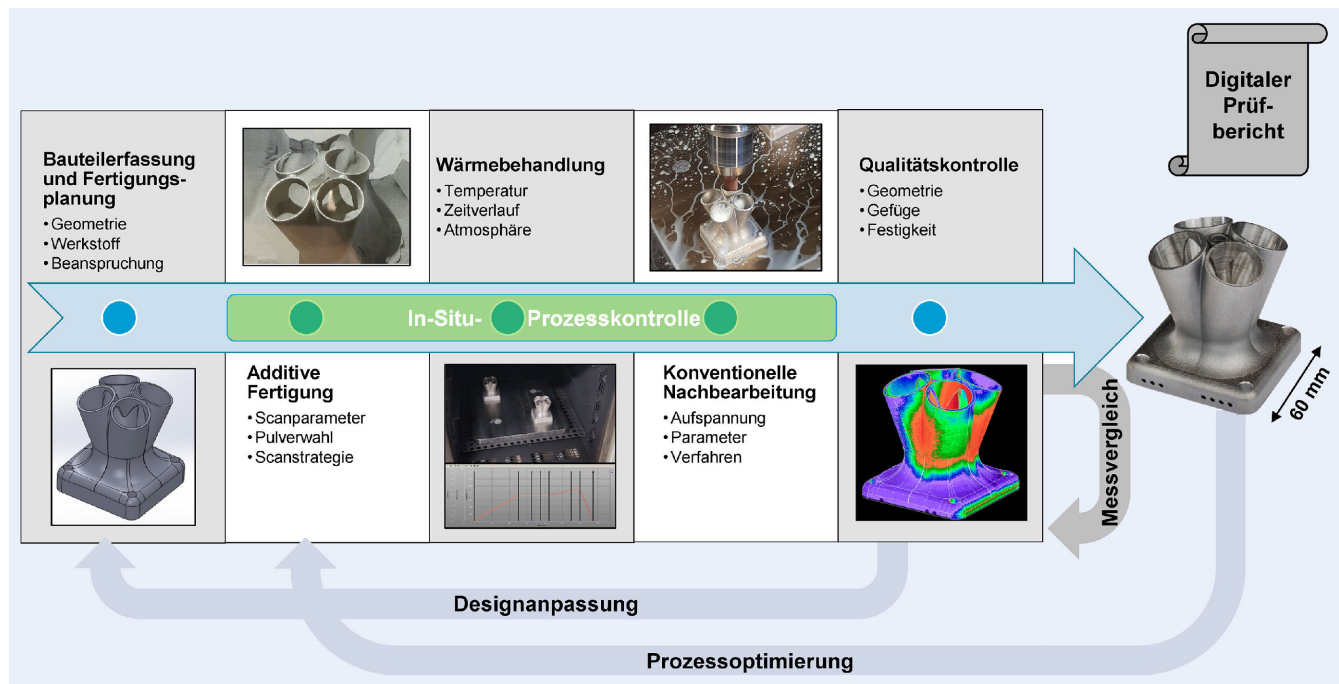


Bild 2 Hybride Prozesskette. Grafik: PTB Braunschweig

Fertigung, das exemplarisch die damit verbundenen Herausforderungen und Möglichkeiten veranschaulicht (Bild 1).

Der konventionelle Fertigungsprozess eines Krümmersammlers umfasst mehrere aufeinanderfolgende Bearbeitungsschritte, wie Zuschneiden, Biegen, Schweißen und spanende Endbearbeitung. Diese mehrstufige Herstellung ist zeit- und kostenintensiv und erfordert präzise Vorrichtungen zur korrekten Positionierung der einzelnen Segmente. Besonders anspruchsvoll ist die Bearbeitung kritischer Funktionsflächen, wie Flanschverbindungen und Rohranschlüsse, um eine dichte und maßhaltige Passung zu gewährleisten.

Die Funktion des Krümmersammlers ist es, die Emissionen mehrerer Zylinder zusammenzuführen und gesammelt an den Katalysator weiterzuleiten. Aufgrund der komplexen Geometrie und der hohen Anforderungen an Dichtigkeit und Passgenauigkeit ist der konventionelle Fertigungsprozess besonders aufwendig. Hier zeigt sich das große Potenzial der hybriden Fertigung. Durch das PBF/LB-M-Verfahren kann ein Krümmersammler in einer einzigen Bauphase mit hoher geometrischer Komplexität hergestellt werden, sodass aufwendige Schweißarbeiten und materialintensive Zwischenschritte entfallen. Die spanende Endbearbeitung stellt sicher, dass Funktionsflächen die geforderte Maßhaltigkeit und Oberflächengüte erreichen.

2.2 Wichtige Einflussfaktoren für die hybride additive Fertigung

Die erfolgreiche Integration additiv gefertigter Komponenten in hybride Systeme hängt von mehreren zentralen Faktoren ab. Maßgenauigkeit, Festigkeit, Oberflächengüte und Materialverträglichkeit sind essenzielle Qualitätskriterien, die sowohl durch die AF als auch durch die spanende Endbearbeitung beeinflusst werden. Die hohe Designfreiheit der AF steht den Präzisionsanforderungen der spanenden Endbearbeitung gegenüber. Eine durchgängige Konstruktionsanpassung ist entscheidend, um beide

Verfahren in einer hybriden Prozesskette erfolgreich zu integrieren [8–10]. Dazu gehören optimierte Stützstrukturen, die eine stabile Fertigung ermöglichen, sowie integrierte Zentrierungshilfen, die die Endbearbeitung erleichtern und Abweichungen minimieren. Methoden wie die Topologieoptimierung können zusätzlich genutzt werden, um Material einzusparen, während die mechanischen Eigenschaften des Bauteils erhalten bleiben.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor sind die Prozessparameter der AF, vor allem Laserleistung, Scangeschwindigkeit, Spurbabstand und Schichtdicke. Diese Parameter bestimmen nicht nur die Materialeigenschaften, sondern auch die Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität des gefertigten Bauteils. Untersuchungen belegen, dass eine genaue Abstimmung dieser Parameter erforderlich ist, um thermisch bedingte Verzüge und Porosität zu vermeiden und die Bauteilqualität sicherzustellen [20–25]. Die eingesetzten Parameter wurden in Vorarbeiten [26] systematisch untersucht, optimiert und sind in Kapitel 3.3 aufgeführt.

3 Hybride additive Prozesskette

In diesem Kapitel wird die Entwicklung einer hybriden Prozesskette für die AF eines Krümmersammlers vorgestellt (Bild 2). Die Kombination aus PBF/LB-M und spanender Endbearbeitung ermöglicht die Herstellung eines Bauteils mit hoher geometrischer Komplexität bei gleichzeitig präziser Maßhaltigkeit und optimierter Oberflächenqualität. Die Prozesskette umfasst die Bauteilerfassung, das Pre-Processing, die additive Fertigung, das Post-Processing durch Wärmebehandlung und spanende Endbearbeitung sowie die abschließende Qualitätskontrolle.

3.1 Bauteilbeschreibung/-erfassung

Beim Demonstratorbauteil handelt es sich um einen Abgaskrümmersammler aus dem Automobilbereich. Das Bauteil verfügt über vier röhrenförmige Anschlüsse mit einem Durchmesser von

22 mm sowie eine Flanschplatte mit vier Bohrungen (\varnothing 6 mm) zur Befestigung (siehe Bild 1, rechts). Die Außenabmessungen der Flanschplatte betragen 60 mm \times 60 mm. Aufgrund der funktionsrelevanten Flansche und Rohre bestehen hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit, um eine zuverlässige Dichtwirkung und Passgenauigkeit sicherzustellen.

Zur Vorbereitung der AF wird ein digitales Bauteilmodell benötigt, das entweder durch Reverse Engineering (zum Beispiel mittels Computertomographie oder 3D-Scan) oder durch bereits bestehende CAD-Daten (Computer-Aided Design) bereitgestellt werden kann. Im Fall komplexer Geometrien mit schwer zugänglichen Innenstrukturen ermöglicht die kontaktlose 3D-Erfassung eine präzise Rekonstruktion des Bauteils. Alternativ können vorhandene CAD-Daten direkt übernommen und bei Bedarf modifiziert werden. Beide Ansätze bilden die Grundlage für die Weiterverarbeitung in der hybriden Prozesskette und reduzieren den Aufwand zur Neuerstellung eines Modells. Dies ist ein wesentlicher Vorteil, insbesondere bei der Nachfertigung von Bauteilen im Ersatzteilkontext.

Die Vermessung der gefertigten Bauteile erfolgt mit industrieller Computertomographie (CT). Zum Einsatz kommt dabei ein „TomoScope XS“ der Firma Werth Messtechnik. Die Messung erfolgt bei einer Röntgenspannung von 160 kV und einer Stromstärke von 90 μ A unter Verwendung eines 0,5 mm starken Filters aus Kupfer. Die CT-Aufnahme umfasst 2000 Rotationsschritte mit einer Integrationszeit von jeweils 1500 ms. Der Abstand zwischen Quelle und Detektor (SDD) beträgt 501,60 mm, der Abstand zwischen Quelle und Objekt (SOD) 422,42 mm, was einem geometrischen Vergrößerungsfaktor von 1,187 entspricht. Die Messdauer pro Bauteil liegt bei circa einer Stunde.

Die maximal zulässige Längenmessabweichung des eingesetzten CT-Systems liegt bei:

$$E_{L,MPE} = 4,5 \mu\text{m} + L / (75 \text{ mm}/\mu\text{m}), \text{ mit } L \text{ in mm} \quad (1)$$

Die Bestimmung der Messunsicherheit orientiert sich an den Anforderungen der VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [27] und berücksichtigt eine Vielzahl von Einflussgrößen. Dazu zählen systematische Effekte bei der Ausrichtung und Bildverarbeitung, die Wiederholungsgenauigkeit, der Bedienerinfluss sowie die Rauheit der Bauteiloberfläche. Zur Bewertung der Wiederholungsgenauigkeit wurden fünf Wiederholmessungen pro Bauteil durchgeführt. Die Streuung der Messwerte lag dabei zwischen 5 μ m und 20 μ m.

Für den gleichen Werkstoff und ähnliche Bauteilgeometrien wurden in einer Vorarbeit Messunsicherheiten von bis zu 56 μ m für bidirektionale Längenmessungen ermittelt [28]. Diese Ergebnisse lassen sich auf die vorliegende Untersuchung übertragen, da Messaufbau, Fertigungsparameter und Prüfmerkmale vergleichbar sind.

3.2 Pre-Processing

Nach der digitalen Erfassung des Bauteils erfolgt im Schritt Pre-Processing die Vorbereitung der Geometriedaten für die AF. Zunächst wird das CAD-Modell in das STL-Format (Standard Triangulation Language) überführt. Falls erforderlich erfolgen konstruktive Anpassungen, beispielsweise die Integration von Zentrierungsvorrichtungen, die eine präzisere Ausrichtung für die spätere Endbearbeitung ermöglichen. Die Konstruktion erfolgt in „Siemens NX“, während die anschließende Druckvorbereitung,

einschließlich Bauteilorientierung, Stützstrukturplanung und Export der Slicerdaten, in „Materialise Magics“ durchgeführt wird.

Ein weiterer zentraler Bestandteil dieses Schritts ist die Definition der prozessrelevanten Parameter wie Schichtdicke, Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurabstand. Zudem wird die Bauteilorientierung im Bauraum festgelegt. Diese beeinflusst nicht nur die thermischen Belastungen und die Ausrichtung der Schichten, sondern auch die Notwendigkeit von Stützstrukturen und die Oberflächenqualität funktionsrelevanter Bereiche.

Der Krümmersammler wird im Bauraum so ausgerichtet, dass temperaturbedingte Verzüge minimiert und nur eine Supportstruktur benötigt wird. Diese strategische Ausrichtung erleichtert die Endbearbeitung und unterstützt die Einhaltung der Maßtoleranzen.

3.3 Additive Fertigung mittels PBF/LB-M

Die Fertigung des Krümmersammlers erfolgt auf einer PBF/LB-M-Anlage des Typs „Lasertec 30 SLM 2nd Generation“ von DMG Mori. Die Maschine ist mit einem Ytterbium-Faserlaser mit einer maximalen Leistung von 600 W ausgestattet. Für die Herstellung wird ein Strahldurchmesser von 80 μ m verwendet. Der schichtweise Aufbau des Bauteils erfolgt mit einer konstanten Schichtdicke von 40 μ m. Der Bauraum der Anlage beträgt 300 mm \times 300 mm \times 300 mm.

Die Fertigung erfolgt unter Argon-Schutzgasatmosphäre, wobei der Sauerstoffgehalt in der Baukammer kontrolliert unter 0,2 % gehalten wird, um Oxidation des Schmelzbades während des Prozesses zu vermeiden. Zur Reduktion thermisch induzierter Spannungen und zur Kontrolle des Erstarrungsverhaltens wird die Bauplattform auf 200 °C beheizt. Die im Pre-Processing festgelegten Prozessparameter basieren auf vorangegangenen Untersuchungen und sind auf das verwendete Material AlSi10Mg abgestimmt. Dabei kommen eine Laserleistung von 350 W, eine Scangeschwindigkeit von 1450 mm/s sowie ein Spurabstand von 0,14 mm zum Einsatz [26].

Die Scanstrategie folgt einem streifenbasierten Ansatz, bei dem das Pulverbett in linear angeordneten, überlappenden Streifen belichtet wird. Diese Vorgehensweise dient der Reduzierung von Spannungsgradienten innerhalb der Bauteilstruktur und unterstützt eine homogene Materialverdichtung. Die Belichtungsrichtung wird in jeder Schicht um 67° rotiert, um anisotrope Effekte zu verringern.

Das Ausgangsmaterial ist AlSi10Mg-Pulver des Herstellers Heraeus Additive Manufacturing, das eine Korngrößenverteilung zwischen 20 μ m und 63 μ m aufweist. Vor dem Einsatz wird das Material getrocknet und durch Siebung aufbereitet, um eine gleichmäßige Fließfähigkeit und eine stabile Pulverbettqualität sicherzustellen.

3.4 Post-Processing durch spanende Endbearbeitung

Nach der AF wird der Krümmersammler zunächst bei 300 °C für zwei Stunden spannungsarm gegläht, um innere Spannungen im Gefüge zu reduzieren und die Zerspanbarkeit zu erhöhen.

Um die Endbearbeitung zu erleichtern, wird zusätzlich eine Negativform aus Kunststoff (PA 12) additiv gefertigt. Sie dient als passgenaue Aufnahme und vermeidet eine direkte Einspannung des Bauteils während der Endbearbeitung. Dies ermöglicht

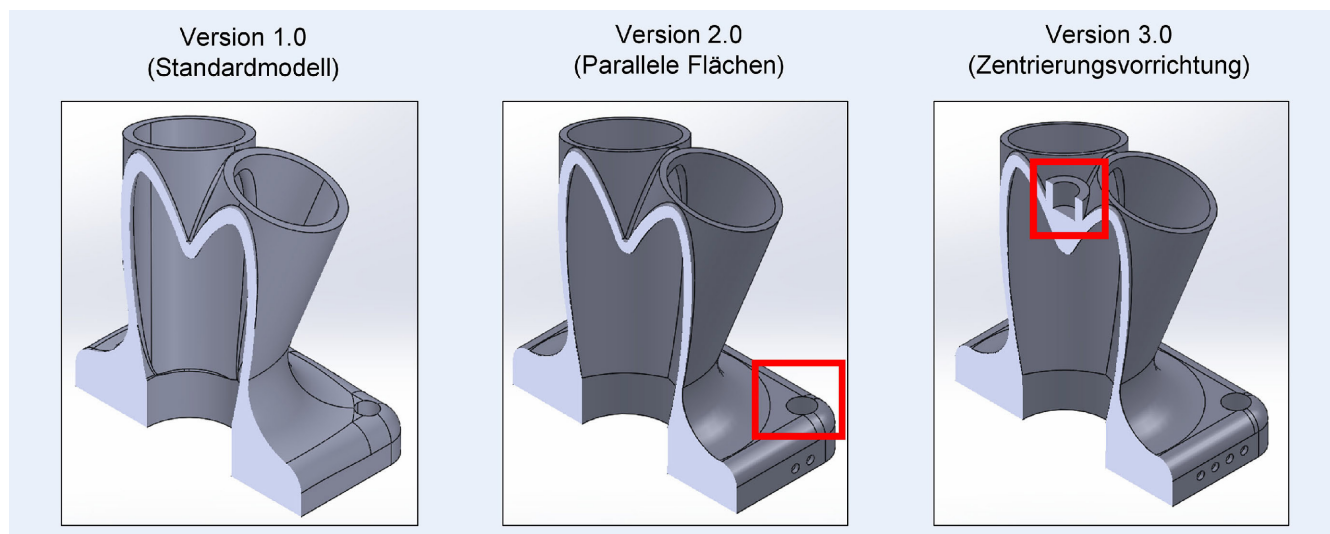


Bild 3 Entwicklungsschritte des Krümmersammlers (Querschnittsansicht). Grafik: PTB Braunschweig

ein präzises und wiederholgenaues Planfräsen der Flanschfläche und verhindert ungewollte Deformationen.

Im Anschluss werden alle Funktionsflächen, einschließlich der Bohrungen und der vier Rohre, endbearbeitet. Die Ausrichtung in der Fräsmaschine erfolgt je nach Entwicklungsstand (Kapitel 4) entweder über ein Nullpunktspannsystem oder über eine integrierte Zentrierhilfe, deren Einfluss auf die Positioniergenauigkeit systematisch analysiert wird. Abschließend erfolgt die Trennung des Bauteils von der Bauplattform mittels Bandsäge und die Endbearbeitung der zentralen Flanschbohrung.

3.5 Qualitätskontrolle durch zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die Qualitätskontrolle des Krümmersammlers erfolgt mittels CT, um die Maßhaltigkeit und innere Struktur des hybrid gefertigten Bauteils ganzheitlich zu überprüfen. Die hochauflösende CT-Messtechnik ermöglicht eine vollständige dreidimensionale Erfassung der Geometrie, inklusive Innenstrukturen, die mit taktilen oder optischen Messverfahren nicht oder nur schwer zugänglich sind. Das eingesetzte CT-System liefert Messdaten aller Außen- und Innenmaße, Bohrungsdurchmesser, Abstände und Winkel. Im Gegensatz zu taktilen Verfahren (wie Koordinatenmessgerät oder Messschieber) erfolgt die CT-Vermessung berührungslos und unabhängig von der Bauteilgeometrie [29–32].

Bei additiv gefertigten Bauteilen trägt die Oberflächenrauheit wesentlich zur Messunsicherheit bei. Taktile Messverfahren erfassen vorwiegend die Oberflächenspitzen, wohingegen tiefer liegende Täler weniger abgebildet werden [29–33]. Aufgrund des mechanischen Filtereffekts werden raue Oberflächen bei taktiler Prüfung nur unvollständig erfasst [29–33]. Vergleichsstudien zwischen Koordinatenmessgerät und CT zeigen Abweichungen im Bereich von etwa $\pm R_z/2$ [29–33]. Diese Erkenntnis verdeutlicht, dass die Oberflächenrauheit bei additiv gefertigten Bauteilen einen maßgeblichen Einfluss auf die Messunsicherheit hat.

4 Entwicklungsschritte des Demonstratorbauteils

Die Entwicklung des Krümmersammlers erfolgte in drei Schritten (**Bild 3**), die iterativ auf Basis von CT-Scans und kontinuierlicher Designoptimierung angepasst wurden. Der Fokus lag dabei auf der Steigerung der Geometrieerfassung, der Reduktion von Abweichungen und der Erhöhung der Prozessstabilität innerhalb der hybriden Fertigungskette.

Für die Analyse der Prozessstabilität und Maßhaltigkeit wurden pro Entwicklungsstufe jeweils drei Krümmersammler gefertigt (insgesamt neun Bauteile). An jedem Bauteil wurden fünf Wiederholungsmessungen der geometrischen Merkmale mit identischer CT-Konfiguration durchgeführt, um eine fundierte statistische Auswertung zu ermöglichen. Alle Krümmersammler wurden in separaten Einzeldruckjobs gefertigt, wobei für jede Fertigung dieselben Prozessparameter verwendet wurden, um eine systematische Vergleichbarkeit sicherzustellen.

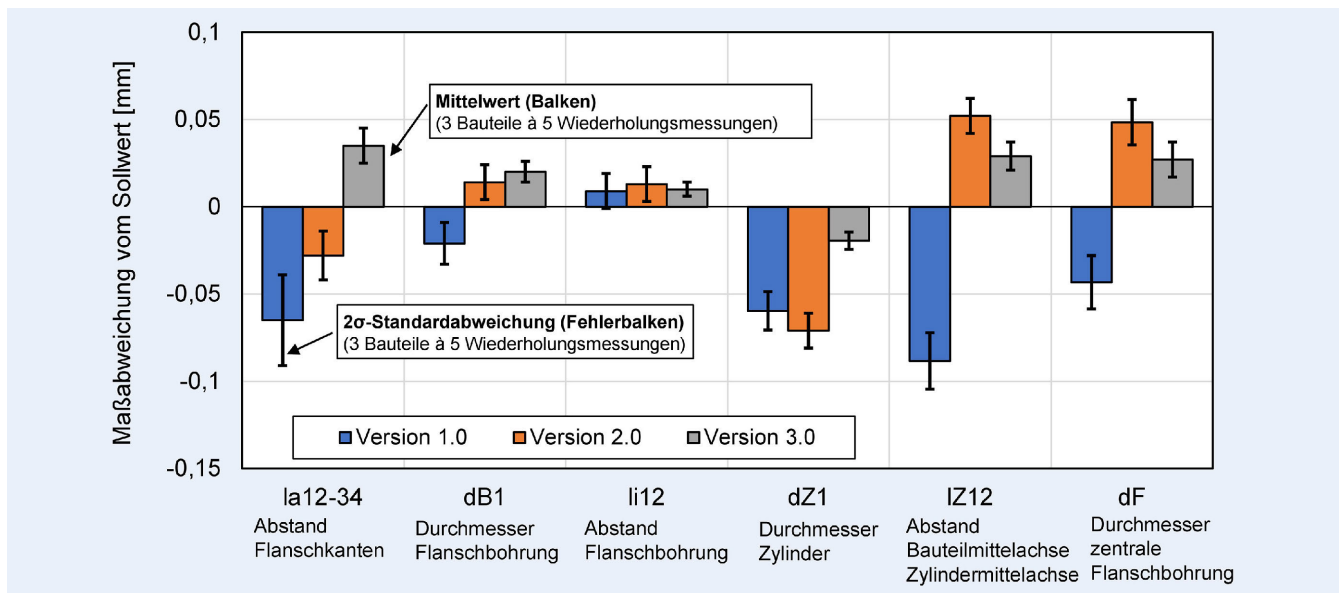
4.1 Version 1.0: Standardmodell

In der ersten Version wurde das grundlegende Bauteildesign umgesetzt und erstmals im PBF/LB-M-Verfahren gefertigt. Für die spanende Endbearbeitung wurde die Bauplattform mechanisch in eine Referenzaufnahme überführt. Dabei kam ein Nullpunktspannsystem (NPSS) zum Einsatz, das eine manuelle Neuausrichtung zwischen den Anlagen vermeiden und durch definierte Spannungspunkte eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleisten sollte. Dennoch zeigten sich bei der Endbearbeitung Abweichungen in der Repositionierung. Ursachen waren etwa mechanisches Spiel in der Fixierung, thermisch bedingte Verzüge sowie minimale Verdrehungen beim Transfer in die Fräsmaschine [10, 18]. Zudem ließen sich nicht alle Flächen vollständig mit dem CT erfassen, was die Geometrieanalyse einschränkte. Aufgrund der ausgeprägten Krümmung standen nur kleine ebene Referenzflächen zur Verfügung, deren CT-Erfassung sich als unzureichend reproduzierbar erwies (siehe Bild 3, Version 1.0).

Die relevanten Messmerkmale zur Bewertung dieser Maßgenauigkeit sind in **Tabelle 2** (vergleiche Bild 1) aufgeführt. Auf Basis dieser Beobachtungen wurde das Design überarbeitet.

Tabelle 2. Beschreibung der geometrischen Merkmale, Sollwerte sowie gemessene Mittelwerte und 2 σ -Standardabweichungen des Krümmersammlers.

Merkmal	Beschreibung	Sollwert	Messwerte Version 1.0	Messwerte Version 2.0	Messwerte Version 3.0
$l_{a12-34} - l_{a23-41}$	Diagonale Abstände zwischen den Flanschkannten	60,0 mm	- 0,07 mm $\pm 0,034$ mm	- 0,028 mm $\pm 0,023$ mm	0,042 mm $\pm 0,021$ mm
$d_{B1} - d_{B4}$	Durchmesser der vier äußeren Flanschbohrungen	6,0 mm	- 0,021 mm $\pm 0,014$ mm	0,19 mm $\pm 0,011$ mm	0,021 mm $\pm 0,006$ mm
$l_{i12} - l_{i41}$	Abstände der Flanschbohrungen in X- und Y-Richtung	47,5 mm	0,016 mm $\pm 0,017$ mm	0,015 mm $\pm 0,013$ mm	0,011 mm $\pm 0,006$ mm
$d_{Z1} - d_{Z4}$	Durchmesser der vier Krümmersammlerzylinder	22,0 mm	- 0,063 mm $\pm 0,014$ mm	- 0,074 mm $\pm 0,011$ mm	- 0,024 mm $\pm 0,007$ mm
$l_{Z12} - l_{Z41}$	Abstand von der Bauteilmittelachse zur Zylindermittelachse (Versatz)	18,2 mm	- 0,089 mm $\pm 0,018$ mm	0,053 mm $\pm 0,011$ mm	0,029 mm $\pm 0,006$ mm
$a_{Z1} - a_{Z4}$	Winkel zwischen Zylinderachse und Bauteilmittelachse	20,0°	- 0,92° $\pm 0,058^\circ$	- 0,75° $\pm 0,051^\circ$	- 0,6° $\pm 0,04^\circ$
d_F	Durchmesser der zentralen Flanschbohrung	23,0 mm	- 0,043 mm $\pm 0,015$ mm	0,048 mm $\pm 0,013$ mm	- 0,027 mm $\pm 0,01$ mm


Bild 4 Mittlere Maßabweichungen ausgewählter Geometrien mit 2 σ -Fehlerbalken für die drei Entwicklungsstufen. Grafik: PTB Braunschweig

4.2 Version 2.0: Erweiterung der parallelen Flächen

Um die Erfassbarkeit im CT zu steigern und die Stabilität während der Endbearbeitung zu erhöhen, wurden parallele Referenzflächen am Bauteil vergrößert (siehe Bild 3, Version 2.0). Diese Änderung führte zu einer optimierten Bauteilerfassung. Mit dem NPSS ließ sich die Positioniergenauigkeit weiterhin nicht stabil reproduzieren, was die Grenzen der eingesetzten Übergabschnittstelle deutlich machte. Dies machte den Bedarf an einer grundlegend neuen Positionierungsstrategie im Gesamtprozess deutlich.

4.3 Version 3.0: Einführung der Zentrierungsvorrichtung

In der finalen Version wurde eine Zentrierungsvorrichtung direkt in das Bauteildesign integriert. Diese mitgedruckte Referenzfläche erlaubt eine eindeutige Ausrichtung des Werkstücks bei der spanenden Endbearbeitung, was das Einmessen erheblich

erleichterte. Dadurch entfiel im Vergleich zum NPSS eine aufwändige manuelle Justierung, was geometrische Abweichungen reduzierte, die Maßhaltigkeit steigerte und die Prozesskette stabilisierte (siehe Bild 3, Version 3.0).

4.4 Auswertung von Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit

Die systematische Auswertung der Maßhaltigkeit über alle drei Entwicklungsstufen zeigt eine schrittweise Reduktion der mittleren Abweichungen sowie der Streuung für nahezu alle untersuchten Geometrien. Die grafische Darstellung in **Bild 4** veranschaulicht die jeweiligen Mittelwerte inklusive der 2 σ -Standardabweichung. Dabei wurden pro Entwicklungsstufe jeweils drei Bauteile gefertigt und fünf Wiederholungsmessungen je Merkmal durchgeführt. Die zugehörigen Mittel- und Streuwerte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Exemplarisch lässt sich die Entwicklung der Reproduzierbarkeit am Merkmal d_{Z1} (Zylinderdurchmesser) nachverfolgen. In Version 1.0 beträgt die mittlere Abweichung $-0,060$ mm bei einer Standardabweichung von $\pm 0,011$ mm. In Version 2.0 ist die Abweichung mit $-0,071$ mm zwar etwas größer, jedoch zeigt sich bereits eine leichtere Reduktion der Streuung ($\pm 0,010$ mm). In Version 3.0 sinkt die mittlere Abweichung deutlich auf $-0,020$ mm, bei einer gleichzeitig geringeren Streuung von $\pm 0,005$ mm. Dies deutet auf eine höhere Maßhaltigkeit sowie eine höhere Reproduzierbarkeit hin.

Auch das Merkmal l_Z (lateraler Versatz der Zylindermittelachse) zeigt eine signifikante Verbesserung. Während in Version 1.0 die mittlere Abweichung noch $-0,089$ mm bei einer Standardabweichung von $\pm 0,016$ mm beträgt, liegt sie in Version 2.0 bei $0,069$ mm ($\pm 0,012$ mm) und in Version 3.0 bei $0,060$ mm ($\pm 0,004$ mm). Die deutliche Verringerung der Standardabweichung im letzten Entwicklungsschritt belegt die erhöhte Reproduzierbarkeit.

5 Diskussion

5.1 Ursachen für die Steigerung der Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit

Die schrittweise Steigerung der Maßhaltigkeit über die drei Entwicklungsstufen hinweg lässt sich auf mehrere Faktoren zurückführen. Zum einen trug die gezielte Anpassung der Bauteilgeometrie zur Minimierung thermisch bedingter Verzüge während des PBF/LB-M-Prozesses bei. Vor allem wurden kritische Bereiche hinsichtlich Wandstärke, Stützung und Übergangsradien überarbeitet, wodurch interne Spannungen reduziert werden konnten.

Ein weiterer entscheidender Faktor war die Einführung der werkstückintegrierten Zentrierhilfe ab Version 3.0. Diese ermöglichte eine definierte, bauteilbezogene Ausrichtung während der spanenden Endbearbeitung und ersetzte das zuvor verwendete Nullpunktspannsystem. Die festgelegte Referenzgeometrie reduzierte Lageabweichungen, die zuvor durch Umspannvorgänge, manuelle Justierungen und thermisch induzierte Verzüge entstanden. Dies zeigt sich etwa an den Abständen der Flanschbohrungen (l_i), deren Standardabweichung von $0,017$ mm in Version 1.0 auf $0,006$ mm in Version 3.0 zurückging (siehe Tabelle 2). Die verringerte Streuung bei nahezu konstanten Mittelwerten weist auf eine stabilere Prozessführung ohne erkennbare systematische Verschiebungen hin.

Ergänzend wurde die Reproduzierbarkeit auf Grundlage von Einzeldruckjobs mit identischen Parametern und jeweils fünf CT-Wiederholmessungen pro Bauteil systematisch bewertet. Dadurch ließen sich zufällige Einflüsse minimieren und belastbare Aussagen zur Reproduzierbarkeit ableiten. Besonders in der letzten Entwicklungsstufe zeigten sich konsistente Maßabweichungen über alle drei gefertigten Krümmersammler hinweg, was die Wirksamkeit der integrierten Referenzgeometrie zusätzlich bestätigt.

5.2 Grenzen der Methodik

Gleichzeitig weist die gewählte Methodik auch Einschränkungen auf. Die geringe Stichprobengröße von drei Bauteilen pro Entwicklungsstufe erlaubt nur eine begrenzte statistische Aussage. Zudem wurden die Messungen ausschließlich CT-basiert durch-

geführt. Mögliche systematische Effekte durch die Bildverarbeitung wurden nicht separat analysiert. Auch die Einflussgrößen innerhalb der Endbearbeitung selbst, etwa Werkzeugverschleiß oder thermische Einflüsse, wurden nicht isoliert betrachtet. Diese Aspekte bilden Anknüpfungspunkte für weiterführende Studien.

Die CT-Messstrategie wurde zwar durch Wiederholmessungen abgesichert, eine vollständige Messunsicherheitsberechnung für diesen Prüfkörper gemäß den Anforderungen der VDI/VDE 2630 Blatt 2.1 [27] erfolgte aber nicht. Die beobachtete Reproduzierbarkeit von $5\text{ }\mu\text{m}$ bis $20\text{ }\mu\text{m}$ spricht dennoch für eine stabile Messdurchführung und die Abweichungen zwischen den Entwicklungsstufen lassen auf reale Unterschiede im Bauteilverhalten schließen, nicht auf messtechnische Einflüsse.

5.3 Vergleich mit bestehenden Arbeiten

Ein Vergleich mit bestehenden Arbeiten bestätigt die Relevanz des gewählten Ansatzes. So beschreiben *Cornelius et al.* [19] einen hybriden Prozess aus additiver Vorfertigung und anschließender Endbearbeitung, jedoch ohne integrierte Referenzierung. Dort erwies sich die exakte Überführung der gedruckten Geometrie in das Koordinatensystem der Fräsmaschine als Herausforderung, da vor allem komplexe Freiformflächen keine klaren Bezugspunkte bieten und fertigungsbedingte Formabweichungen die Ausrichtung erschweren. Infolge wurden externe Referenzelemente am Bauteil angebracht und mittels 3D-Scan vermessen, um das Koordinatensystem für die Zerspanung abzuleiten. Diese zusätzliche Ausrichtprozedur mit wiederholtem Umspannungen schwer zugänglicher Bereiche verursachte messbare Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Geometrie, besonders bei Bauteilbereichen, die in mehreren Aufspannungen bearbeitet wurden.

Die vorliegende Arbeit ergänzt den bestehenden Forschungsstand um den Nachweis, dass sich durch integrierte geometrische Referenzelemente Abweichungen deutlich reduzieren lassen, ohne zusätzliche Sensorik oder maschinelle Anpassungen.

5.4 Wirtschaftliche Potenziale

Aus wirtschaftlicher Sicht eignet sich die vorgestellte Methode besonders für den Ersatzteilbereich und die Kleinserienfertigung. In Fällen ohne vorhandene CAD-Daten lassen sich Bauteile durch Reverse Engineering digital erfassen. Die mitgedruckte Zentrierhilfe reduziert den Rüstaufwand bei der spanenden Endbearbeitung erheblich, da kein zusätzliches Justieren oder Ausrichten notwendig ist. In der Praxis können somit Prozessschritte eingespart und Fehlerpotenziale minimiert werden. Der Konstruktionsaufwand für die Zentrierhilfe fällt einmalig an und lässt sich bei vergleichbaren Bauteilen erneut nutzen. Interne Versuche zeigten eine Reduktion der Endbearbeitungszeit um circa 20 % im Vergleich zum konventionellen Nullpunktspannsystem. Eine detaillierte Kostenanalyse ist Bestandteil künftiger Untersuchungen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine durchgängige hybride Prozesskette zur Fertigung eines komplexen Krümmersammlers aus AlSi10Mg entwickelt, umgesetzt und analysiert. Die Kombination additiver und subtraktiver Fertigungsschritte zeigt, dass sich die jeweiligen Stärken beider Verfahren wirkungsvoll verbinden lassen. Während das PBF/LB-M-Verfahren eine hohe Designfreiheit bei der Bau-

teilgestaltung ermöglicht, erlaubt die anschließende spanende Endbearbeitung die Erzeugung maßhaltiger Funktionsflächen.

Ein wesentlicher Fortschritt besteht in der werkstückintegrierten Zentrierhilfe, die das Bauteil bereits während der AF eindeutig positionierte. Dadurch entfiel im Vergleich zum Nullpunktspannsystem die manuelle Justierung in der Endbearbeitung, was zu einer signifikanten Reduktion geometrischer Abweichungen sowie zu einer erhöhten Prozessstabilität führte. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Erfolg hybrider Prozessketten wesentlich von der abgestimmten Auslegung von Design, Fertigungsstrategie und messtechnischer Bewertung abhängt. Eine analytische Modellierung oder Simulation der Prozesskette war nicht Gegenstand dieser Arbeit, wird jedoch als potenzieller Weiterentwicklungspfad identifiziert.

Zugleich bleibt offen, in welchem Umfang sich die entwickelte Prozesskette auf andere Geometrien, Materialien und Fertigungs-szenarien übertragen lässt. Insbesondere bei asymmetrischen Strukturen, rotationssymmetrischen Bauteilen oder Werkstoffen mit abweichenden thermischen Eigenschaften ist weiterer Forschungsbedarf gegeben. Auch die Integration in industrielle Fertigungsumgebungen, etwa in Form automatisierter Übergabschnittstellen oder qualitätsgesicherter Endbearbeitungsroutinen, stellt eine zukünftige Herausforderung dar.

Die Ergebnisse fließen in das Projekt „QI-Digital – Additive Fertigung“ ein, das sich mit der digitalen Qualitätssicherung gemäß DIN EN ISO/ASTM 52908 [34] befasst.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken Steffen Kahlert für die Durchführung der subtraktiven Endbearbeitung der Bauteile und für seine konstruktiven Beiträge.

LITERATUR

- [1] Attaran, M.: The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons* 60 (2017) 5, pp. 677–688
- [2] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D. et al.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design* 69 (2015), pp. 65–89
- [3] Ford, S.; Despeisse, M.: Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production* 137 (2016), pp. 1573–1587
- [4] Frazier, W. E.: Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23 (2014) 6, pp. 1917–1928
- [5] Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E. et al.: Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* 117 (2016), pp. 371–392
- [6] DebRoy, T.; Wei, H. L.; Zuback, J. S. et al.: Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science* 92 (2018), pp. 112–224
- [7] Trevisan, F.; Calignano, F.; Lorusso, M. et al.: On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties. *Materials* (Basel, Switzerland) 10 (2017) 1, #76, doi.org/10.3390/ma10010076
- [8] Yamazaki, T.: Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining. *Procedia CIRP* 42 (2016), pp. 81–86
- [9] van Le, T.; Paris, H.; Mandil, G.: Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. *Journal of Manufacturing Systems* 44 (2017), pp. 243–254
- [10] Ferchow, J.; Kalin, D.; Englberger, G. et al.: Design and validation of integrated clamping interfaces for post-processing and robotic handling in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 118 (2022) 11–12, pp. 3761–3787
- [11] Flynn, J. M.; Shokrani, A.; Newman, P. T. et al.: Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 101 (2016), pp. 79–101
- [12] Du, W.; Bai, Q.; Zhang, B.: A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts. *Procedia Manufacturing* 5 (2016), pp. 1018–1030
- [13] Cortina, M.; Arrizubieta, J. I.; Ruiz, J. E. et al.: Latest Developments in Industrial Hybrid Machine Tools that Combine Additive and Subtractive Operations. *Materials* (Basel, Switzerland) 11 (2018) 12, #2583; doi.org/10.3390/ma11122583
- [14] Leuteritz, G.; Demminger, C.; Maier, H.-J. et al.: Hybride Additive Fertigung: Ansätze zur Kombination von additiven und gießtechnischen Fertigungsverfahren für die Serienfertigung. In: Lachmayer, R.; Lippert, R. B.; Kaierle, S. (Hrsg.): *Additive Serienfertigung*. Heidelberg: Springer 2018, S. 115–126
- [15] Dilberoglu, U. M.; Ghahreghpapagh, B.; Yaman, U. et al.: Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 113 (2021) 3–4, pp. 623–648
- [16] Didier, P.; Le Coz, G.; Robin, G. et al.: Consideration of additive manufacturing supports for post-processing by end milling: a hybrid analytical-numerical model and experimental validation.- *Progress in Additive Manufacturing* 7 (2022) 1, pp. 15–27
- [17] Denkena, B.; Bergmann, B.; Kiesner, J. et al.: Sensory zero-point clamping system for condition and process monitoring. *Procedia CIRP* 96 (2021), pp. 359–364
- [18] Sulz, C.; Brier, J.; Agovic, A. et al.: Investigation of the thermal compensation behaviour of zero-point clamping systems. *Procedia CIRP* 99 (2021), pp. 69–74
- [19] Cornelius, A.; Dvorak, J.; Jacobs, L. et al.: Combination of structured light scanning and external fiducials for coordinate system transfer in hybrid manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes* 68 (2021), pp. 1824–1836
- [20] Limbasiya, N.; Jain, A.; Soni, H. et al.: A comprehensive review on the effect of process parameters and post-process treatments on micro-structure and mechanical properties of selective laser melting of AlSi10Mg. *Journal of Materials Research and Technology* 21 (2022), pp. 1141–1176
- [21] Maamoun, A. H.; Xue, Y. F.; Elbestawi, M. A. et al.: Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy. *Materials* (Basel, Switzerland) 11 (2018) 12, #2343; doi.org/10.3390/ma11122343
- [22] Miao, H.; Yusof, F.; Karim, M. S. A. et al.: Process parameter optimisation for selective laser melting of AlSi10Mg-316L multi-materials using machine learning method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 129 (2023) 7–8, pp. 3093–3108
- [23] Minkowitz, L.; Arneitz, S.; Effertz, P. S. et al.: Laser-powder bed fusion process optimisation of AlSi10Mg using extra trees regression. *Materials & Design* 227 (2023), #111718
- [24] Rios, J. A. T.; Zambrano-Robledo, P.; Taborda, J. D. T. et al.: Process parameters effect and porosity reduction on AlSi10Mg parts manufactured by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 129 (2023) 7–8, pp. 3341–3351
- [25] Franczyk, E.; Machno, M.; Zębala, W.: Investigation and Optimization of the SLM and WEDM Processes' Parameters for the AlSi10Mg-Sintered Part. *Materials* (Basel, Switzerland) 14 (2021) 2, # 410; doi.org/10.3390/ma14020410
- [26] Krasniqi, M.; Löffler, F.: Comprehensive study on statistical methods for optimization of process parameters and material properties of Al-Si10Mg in laser powder bed fusion. *Discover Mechanical Engineering* 3 (2024) 1, #42, doi.org/10.1007/s44245-024-00073-4
- [27] VDI/VDE: VDI/VDE 2630 Blatt 2.1: Computed tomography in dimensional measurement – Determination of the uncertainty of measurement and the test process suitability of coordinate measurement systems with CT sensors. Berlin: Beuth Verlag 2015
- [28] Krasniqi, M.; Laquai, R.; Löffler, F.: Measurement Uncertainty and Accuracy of CT and CMM in Additive Manufacturing. [Einreichung noch nicht veröffentlicht]
- [29] Lou, S.; Brown, S. B.; Sun, W. et al.: An investigation of the mechanical filtering effect of tactile CMM in the measurement of additively manufactured parts. *Measurement* 144 (2019), pp. 173–182
- [30] Aloisi, V.; Carmignato, S.: Influence of surface roughness on X-ray computed tomography dimensional measurements of additive manufactured parts. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation* 6 (2016), pp. 104–110

- [31] Villarraga-Gómez, H.; Lee, C.; Smith, S. T.: Dimensional metrology with X-ray CT: A comparison with CMM measurements on internal features and compliant structures. *Precision Engineering* 51 (2018), pp. 291–307
- [32] Villarraga-Gómez, H.; Smith, S. T.: Effect of geometric magnification on dimensional measurements with a metrology-grade X-ray computed tomography system. *Precision Engineering* 73 (2022), pp. 488–503
- [33] Bartscher, M.; Sato, O.; Härtig, F. et al.: Current state of standardization in the field of dimensional computed tomography. *Measurement Science and Technology* 25 (2014) 6, #64013, doi.org/10.1088/0957-0233/25/6/064013
- [34] DIN EN ISO/ASTM 52908:2024-03, Additive Fertigung von Metallen-Eigenschaften von Fertigteilen – Nachbearbeitung, Inspektion und Prüfung von Bauteilen hergestellt mittels pulverbettbasiertem Schmelzen (ISO/ASTM 52908:2023). Deutsche Fassung EN_ISO/ASTM 52908:2023

Dr.-Ing. Mergim Krasniqi
 mergim.krasniqi@ptb.de

Wiebke Brandes, M.Sc.

Dr.-Ing. Frank Löffler
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
 Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
 www.ptb.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)