

Qualitätssicherung für unterschiedliche Unternehmensbereiche

Messmethoden zur Prüfung additiv gefertigter Bauteile

W. Brandes, M. Krasniqi, F. Löffler

ZUSAMMENFASSUNG Die Qualitätssicherung von additiv gefertigten Bauteilen ist eine besondere Herausforderung. Die Designflexibilität des Verfahrens bietet die Möglichkeit, beliebige Freiformflächen oder innere Geometrieelemente zu erzeugen. Vor diesem Hintergrund werden neben High-End-Messgeräten auch kostengünstige und fertigungsbegleitende Messtechniken eingesetzt. Gegenstand der Untersuchung sind hybrid gefertigte Prüfkörper. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen additiv gefertigten und subtraktiv nachbearbeiteten Flächen sowie zwischen unterschiedlichen Messgeräteklassen.

STICHWÖRTER

Additive Fertigung, Fertigungsmesstechnik, Qualitätssicherung

Measuring methods for testing additively manufactured components

ABSTRACT The quality assurance of additively manufactured components poses a particular challenge. The design flexibility of the process makes it possible to create any free-form surfaces or internal geometry elements. Against this backdrop, cost-effective and production-accompanying measuring techniques are used in addition to high-end measuring devices. The subject of this paper is hybrid-manufactured test specimens. The results point out clear differences between additively manufactured and subtractively post-processed surfaces as well as between different measuring device classes.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts „QI-Digital“ im Use Case „Additive Fertigung (AF)“ wird die Eignung verschiedener Messmethoden zur Qualitätssicherung untersucht. Neben der Nutzung verschiedener Messgeräteklassen erfolgt auch eine Messunsicherheitsbetrachtung entlang der Messprozesse. Für diese Studie werden sogenannte hybrid gefertigte Prüfkörper verwendet. Die hybride Fertigung (HF) kombiniert additive und konventionelle Fertigungsverfahren. Damit sollen die Vorteile beider Verfahren genutzt werden, um komplexe Bauteilgeometrien effizient herzustellen. Die Prüfkörper sind nicht für alle Messmittel vollständig zugänglich. Eine detaillierte Übersicht zu den Messmethoden und zugehörigen Längenmessabweichungen und Genauigkeiten der verwendeten Messmittel sowie eine Messunsicherheitsbetrachtung ist in dieser Arbeit zu finden.

Bisherige Untersuchungen vergleichen beispielsweise die Leistung verschiedener Computertomographen (CT) mit Blick auf Voxelgrößen, Auflösungen und Simulationen [1]. Zudem gibt es Studien zur Optimierung der Leistungsfähigkeit von AF-Prozessen sowie der Auswahl des Druckverfahrens, um die Maßhaltigkeiten von Geometrien zu verbessern [2, 3]. Die Neuheit der hier vorgestellten Studie besteht darin, hybrid gefertigte Prüfkörper, die einem Standarddruckparameter unterliegen, mit verschiedenen Messgeräteklassen zu untersuchen.

2 Anforderungen und Prüfkörper

2.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Die geometrische Charakterisierung von additiv gefertigten und gegebenenfalls subtraktiv nachbearbeiteten Bauteilen ist eine Herausforderung. So weisen additiv gefertigte Werkstücke rauere Oberflächen auf und können aus komplexen Freiformflächen mit inneren Geometrieelementen bestehen. Bei subtraktiver Nachbearbeitung, etwa durch Drehen, Fräsen oder Schleifen, können zusätzliche Funktionsflächen mit sehr hoher Güte entstehen. Da diese Bauteile häufig als Einzelteile genutzt werden, wird oft auch eine fertigungsbegleitende, kostengünstige und schnelle Prüfung der Bauteile gewünscht. [4, 5]

Um die unterschiedlichen Anforderungen zu berücksichtigen, werden in dieser Studie geeignete Messmethoden zur Qualitätssicherung überprüft. Die Messmethoden reichen von einem Messschieber über einen Messarm, der fertigungsnah eingesetzt wird, bis hin zu taktilen und optischen Koordinatenmessgeräten (KMG), die unter Messraumbedingungen geringe Messunsicherheiten erreichen. Taktile KMG sind eine etablierte Methode, um hochpräzise und zuverlässig zu messen [6].

2.2 Zielstellung

In dieser Studie sollen vergleichbare Angaben zur erreichbaren Güte von Messergebnissen an fertigungsbegleitenden Messgeräten sowie High-End-Messgeräten erzielt werden. Dies soll je nach

Tabelle 1. Prüfkörperübersicht

	Prüfkörperbezeichnung	Material	Fertigungsverfahren
1	Krümmersammler 2.0-KMU	AlSi10Mg	hybrid
2	Krümmersammler 3.0-HybFer	AlSi10Mg	hybrid
3	Krümmersammler 3.0	PA-12	additiv
4	Krümmersammler 3.0	PA-12	hybrid
5	Drehteil	AlSi10Mg	hybrid

**Bild 1** Links: Krümmersammler aus PA-12 und AlSi10Mg. Rechts: Drehteil aus AlSi10Mg. Grafik: PTB Braunschweig

Anwendungsfall eine Nutzung verschiedener Messgeräteklassen ermöglichen.

Verschiedene Messgeräteklassen besitzen unterschiedliche Genauigkeitsklassen, welche die maximal zu erwartende Abweichung eines Messwerts vom wahren Wert der zu messenden Größe festlegen. Weiterhin soll eine Angabe von im Fertigungs- und Messprozess auftretenden Messunsicherheiten an additiv gefertigten Komponenten erfolgen. Dimensionelle Messungen sind für die Optimierung von AF-Prozessen und die damit einhergehende Qualitätssicherung der gefertigten Teile notwendig. [1, 3]

2.3 Anforderungen von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)

Die hybride Fertigung bietet KMU neue Möglichkeiten, insbesondere für die Fertigung kleiner Losgrößen und individueller Bauteile. Dem steht jedoch eine anspruchsvolle Integration der fertigungsbegleitenden Messtechnik in die bestehenden Produktionsprozesse gegenüber. Unter Beachtung der Investitions- und Betriebskosten sollten die Messmöglichkeiten und die Messgenauigkeit nur so gut wie nötig sein, um auf High-End-Messgeräte oder externe Messungen zu verzichten. Externe Messungen über Dienstleister oder Messlaboratorien sind oft mit hohen Kosten verbunden. Bei High-End-Messgeräten handelt es sich um hochauflösende optische und taktile Koordinatenmessgeräte, die in Kapitel 3.1 beschrieben werden. [7, 8]

Es liegen bereits mehrere Studien zu Leistungsbewertungen von Messsystemen in KMU vor. Garengo *et al.* [2] geben einen Überblick über die Forschungsagenda, welche auch heute noch aktuell ist. Schon seit vielen Jahren bekommt die Komplexität der

Managementsysteme von KMU eine zunehmende Bedeutung. Diese bezieht sich auf die damit einhergehenden Herausforderungen, die durch die Einführung und Integration der Systeme in die Unternehmensprozesse hervorgerufen werden. Managementsysteme sollen komplexe Vorgänge einfach darstellen und dabei verschiedene Aspekte beachten, wie die Umwelt, die Qualität sowie die Kosten. Die Leistungsfähigkeit wird dabei mit verschiedenen Systemen gemessen. Einen besonders wichtigen Aspekt stellen die finanziellen und personellen Ressourcen dar. [2]

2.4 Prüfkörper

Gegenstand der Untersuchung sind fünf Prüfkörper, die additiv oder hybrid gefertigt wurden (**Tabelle 1**).

Die Prüfkörper aus der Aluminiumlegierung AlSi10Mg wurden durch selektives Laserschmelzen (PBF/LB-M) an einer „DMG Mori Lasertec 30 SLM 2nd Generation“ und die Prüfkörper aus dem Kunststoff PA-12 durch selektives Lasersintern (PBF/LB-S) an einer „EOS Formiga P110“ gefertigt. Durch die Energie des Lasers wird das Pulver ortsgenau aufgeschmolzen oder gesintert und so Schicht für Schicht das Werkstück aufgebaut. [1]

Die Nachbearbeitung der Prüfkörper 1, 2 und 4 erfolgte durch Fräsen an den vier zusammenlaufenden sowie an den vier kleinen Zylindern und der großen Bohrung im Flansch (**Bild 1** links).

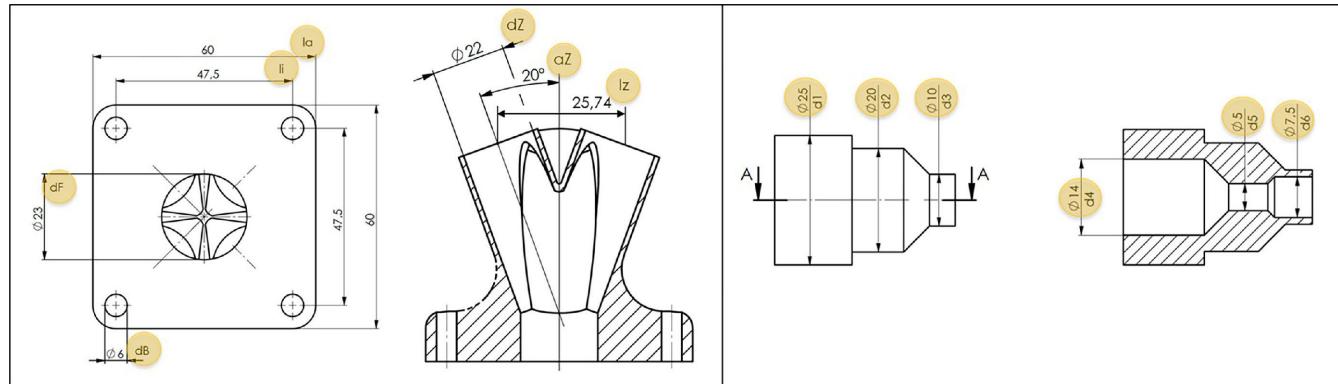
Prüfkörper 3 wurde ausschließlich additiv gefertigt. Die Innenflächen der Zylinder wurden nicht nachbearbeitet, sodass auch hier Oberflächen mit hoher Rauheit vorliegen. Die Rauheiten liegen im Bereich von $R_a = 5 \mu\text{m}$ bis $R_a = 30 \mu\text{m}$ und bei den nachbearbeiteten Oberflächen im Bereich von $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ bis

Tabelle 2. Gemessene Elemente mit zugehörigen Bezeichnungen und Sollwerten für Prüfkörper 1-4.

Element	Bezeichnung	Maße	Sollwert
Ebenen	$l_{a12-34} - l_{a23-41}$	Abstände	60,0 mm
Zylinder	$d_{B1} - d_{B4}$	Zylinderdurchmesser	6,0 mm
Längenprüfkörper	$l_{i12} - l_{i41}$	Abstände	47,5 mm
Zylinder	$d_{Z1} - d_{Z4}$	Zylinderdurchmesser	22,0 mm
Längenprüfkörper	$l_{Z12} - l_{Z41}$	Abstände	25,74 mm
Lagetoleranz	$a_{Z1} - a_{Z4}$	Winkel	20,0°
Zylinder	d_F	Zylinderdurchmesser	23,0 mm

Tabelle 3. Gemessene Elemente mit zugehörigen Bezeichnungen und Sollwerten für Prüfkörper 5.

Element	Bezeichnung	Maße	Sollwert
Außenzylinder	d_1	Zylinderdurchmesser	25,0 mm
Außenzylinder	d_2	Zylinderdurchmesser	20,0 mm
Außenzylinder	d_3	Zylinderdurchmesser	10,0 mm
Innenzylinder	d_4	Zylinderdurchmesser	14,0 mm
Innenzylinder	d_5	Zylinderdurchmesser	5,0 mm
Innenzylinder	d_6	Zylinderdurchmesser	7,5 mm

**Bild 2** Links: Messplan für Prüfkörper 1-4; Rechts: Messplan für Prüfkörper 5. Grafik: PTB Braunschweig

$R_a = 0,5 \mu\text{m}$. Eine detaillierte Beschreibung des Entwicklungs- und Fertigungsprozesses des Krümmersammlers ist in der Studie von Krasniqi et al. zu finden [9]. Die Prüfkörper 1–4 besitzen eine Kantenlänge von 60 mm und eine Höhe von 65 mm.

Bei Prüfkörper 5 handelt es sich um ein Drehteil (siehe Bild 1 rechts). Der Prüfkörper wurde additiv gefertigt und im Anschluss durch konventionelles Drehen an einer Drehmaschine jeweils ein Innen- und ein Außenzylinder nachbearbeitet. Das Drehteil ist 35 mm hoch.

2.5 Messplan

Die gemessenen Elemente für die Prüfkörper sind in **Tabelle 2** und **Tabelle 3** dargestellt.

Bild 2 zeigt anhand technischer Zeichnungen die Messpläne der fünf Prüfkörper mit zugehörigen Maßangaben. Auf die Festlegung von Solltoleranzen wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

3 Messdatenauswertung

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Messprozesse beschrieben und die Messergebnisse veranschaulicht. Die Prüfkörper werden mit fertigungsbegleitenden Messmitteln sowie optischen und taktilen Koordinatenmessgeräten gemessen. Jede Messung wurde fünfmal wiederholt ($n = 5$). Weiterhin wird eine Messunsicherheitsbetrachtung durchgeführt.

3.1 Messprozesse

Die Auswahl an Messverfahren berücksichtigt auch den Einsatz von kostengünstiger und fertigungsbegleitender Messtechnik. Die Vorteile optischer Messsysteme sind etwa die berührungslose und zerstörungsfreie Messung, die vollflächige Erfassung sowie eine Zeiter spart. Taktile Messsysteme können innenliegende Strukturen nicht erfassen, bieten aber Vorteile gegenüber der

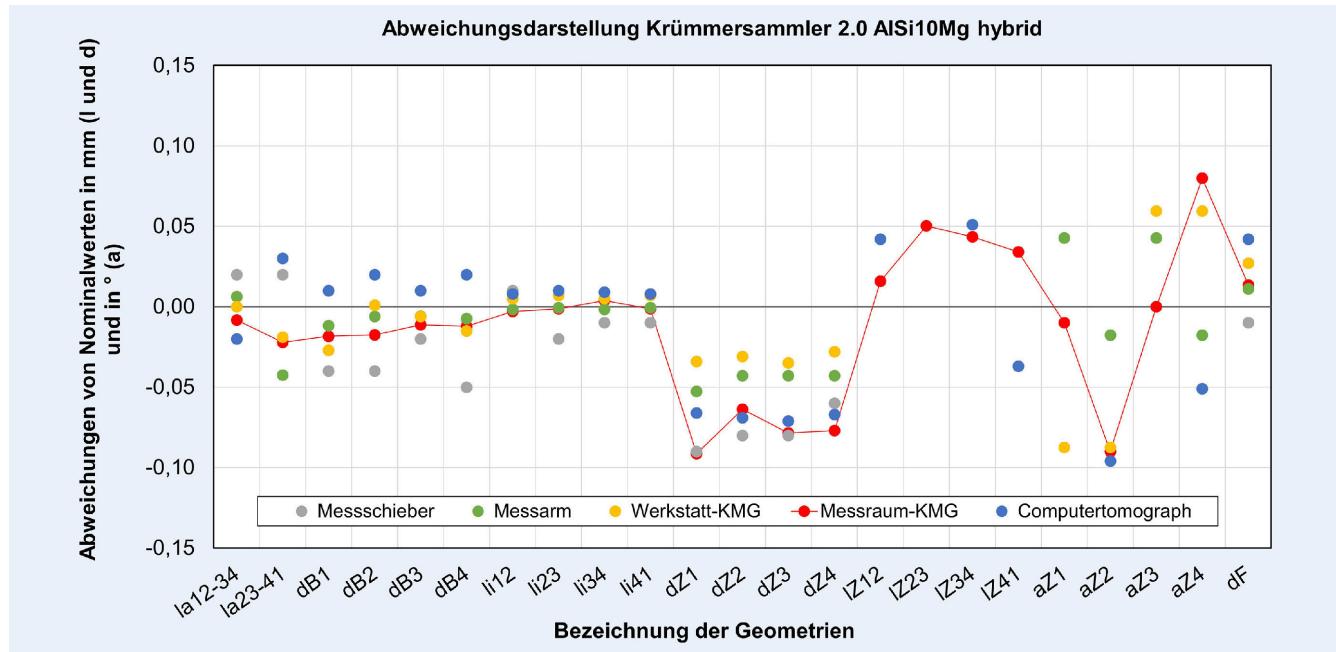


Bild 3 Abweichungsdarstellung Prüfkörper 1 (n=5). Grafik: PTB Braunschweig

optischen Messtechnik. Taktile Koordinatenmessgeräte eignen sich für Hochpräzisionsbauteile, da sie eine hohe Genauigkeit aufweisen. So können Messpunkte beispielsweise auf einen tausendstel Millimeter erfasst werden, was mit optischer Messtechnik bisher nicht möglich ist. [10]

Im Bereich der laufenden Kosten fallen für optische und taktile Messgeräte regelmäßige Wartungen an. Der Tastspitzenverschleiß muss beim taktilen KMG regelmäßig kontrolliert werden. Aufgrund geringer Antastgeschwindigkeiten und geeigneten Tastspitzenmaterialien ist der Verschleiß im Vergleich zu einem 24-Stunden-Betrieb gering. Weiterhin werden für alle Messgeräte Spannwerkzeuge und Halterungen für die Werkstückaufnahme benötigt. Diese werden einmalig als Bausätze angeschafft oder speziell angefertigt. Mattierungssprays kommen bei den Messungen in dieser Studie nicht zum Einsatz.

Messschieber: Holex Digitalmessschieber

Die verwendeten Messschieber weisen eine Ablesegenauigkeit von 0,01 mm auf. Bei diesem Verfahren treten einige Problemstellungen auf. Die Messung der Winkel $\alpha_{Z1} - \alpha_{Z4}$ zwischen der Mittelachse der Prüfkörper 1–4 zu den vier Zylinderachsen sowie die Messung der Abstände $l_{Z12} - l_{Z41}$ zwischen den vier Zylindermittelpunkten ist nicht möglich. Druckbedingt weisen die Prüfkörper an nicht bearbeiteten Flächen hohe Rauheiten auf. Gemessen wurde bei einer Messraumtemperatur von $9 = 21,5^\circ\text{C}$.

Lehren: Grenzlehrdom nach DIN 2245

Mithilfe von Grenzlehrdornen werden Passungen nach verschiedenen Toleranzklassen überprüft. Im Anwendungsbeispiel wurde für Bohrungen die Toleranzklasse H7 nach DIN ISO 286 Auszug Teil 2 vorgegeben. Die Toleranz liegt für den Nennmaßbereich > 3 mm bis 6 mm bei 0 µm bis 12 µm und bei > 18 mm bis 30 mm bei 0 µm bis 21 µm. Die Prüfung gibt Auskunft, ob die

Gutseite in die Bohrung hineinpasst. Gemessen wurde bei einer Messraumtemperatur von $9 = 21,5^\circ\text{C}$.

Messarm: FARO Gage-Plus

Der verwendete Messarm eignet sich für den mobilen Einsatz an Messplätzen und Maschinen. Es liegt keine definierte Antastkraft vor, da per Hand angetastet wird. Die Antastung wird mit einem 3-mm-Zirkonoxid-Kugeltaster durchgeführt. Aufgrund der rauen Oberflächen kann die Antastung in einem Minimum oder Maximum erfolgen (vergleichbar mit einem Berg oder Tal). Der Messarm weist eine Genauigkeit bis zu 0,005 mm auf. Die Anzeigeabweichung für die Längenmessung beträgt $E_L = 5 \mu\text{m} + 8L/1000$ (mit L in mm) und gilt für eine Umgebungstemperatur $9 = 20^\circ\text{C} +/- 2^\circ\text{C}$.

Werkstatt-KMG: Aberlink Axiom too SG 600 CNC

Ähnlich wie beim Messarm erfolgen die Antastungen durch die Tasterkugel in Minima oder Maxima. Die Messung wird per Joystick ausgeführt und anschließend berechnet die Software die Maße. Die maximal zulässige Längenmessabweichung beträgt $MPE_E = 3,5 \mu\text{m} + L/250$ (mit L in mm) und gilt für eine Umgebungstemperatur $9 = 20^\circ\text{C} +/- 2^\circ\text{C}$.

Messraum-KMG: Leitz KMG Reference 600

Im Vergleich zum Werkstatt-KMG erfolgt die Antastung rechnergestützt manuell einprogrammiert oder über das CAD-Modell des Prüfkörpers. Nach der Bestimmung der Werkstücklage wird der Prüfkörper mit verschiedenen Kugeldurchmessern angetastet. Bei diesem Messgerät handelt es sich um das genaueste der Studie.

Das verwendete Normal ist eine Einmesskugel der Firma Leitz (ID: H7281, Ø 29,97651 mm), durch die das Gerät vor jeder Messung beziehungsweise nach jedem Tasterwechsel kalibriert wird. Die Rückführbarkeit ist durch regelmäßige Wartungen

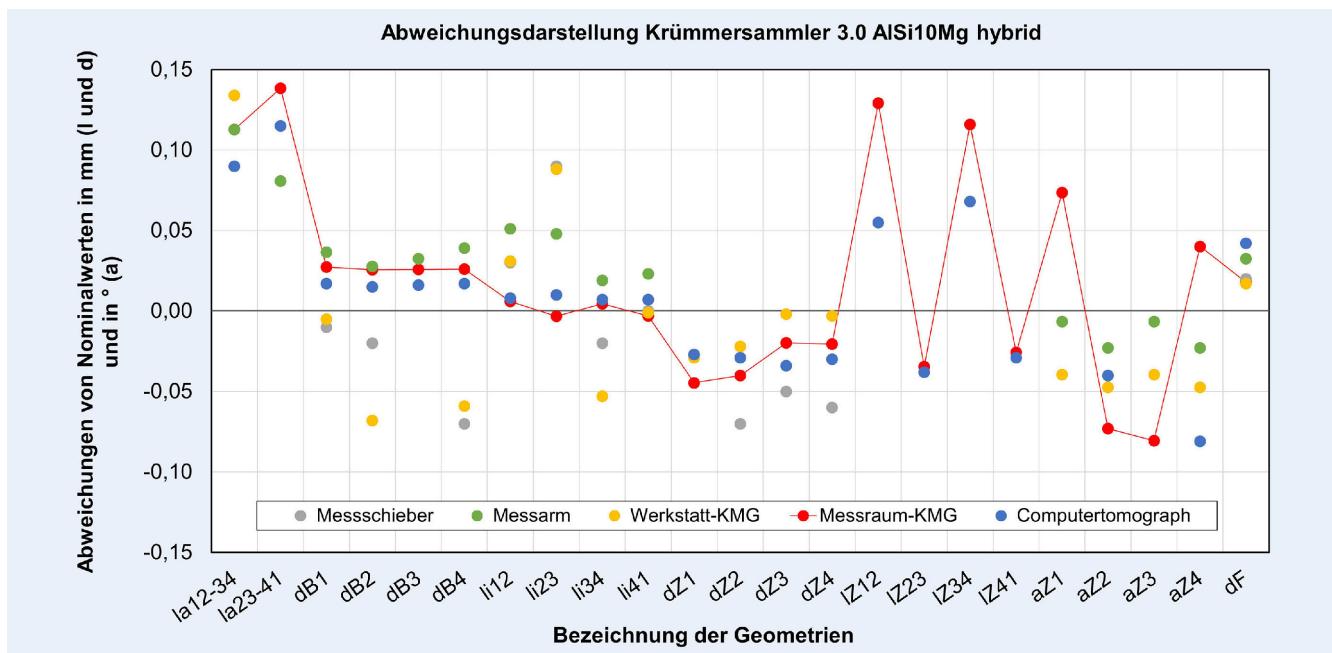


Bild 4 Abweichungsdarstellung Prüfkörper 2 (n=5). Grafik: PTB Braunschweig

durch die Firma Hexagon Metrology mit einem Stufenendmaß als Prüfnormal (ID: 200603S289) gegeben. Die maximal zulässige Längenmessabweichung beträgt $MPE_E = 0,6 \mu\text{m} + L/400$ (mit L in mm) und gilt für eine Messraumtemperatur $\vartheta = 20^\circ\text{C} +/- 2^\circ\text{C}$.

Computertomograph: Werth TomoScope XS 160 kV

Mithilfe der röntgenoptischen Koordinatenmesstechnik werden die Messdaten ermittelt. Die Vorteile dieser Technologie sind die zerstörungsfreie und berührungslose Prüfung sowie ein großes Spektrum an Berechnungsmöglichkeiten. Die Grenze ist bei der Auflösung des Geräts erreicht. Es wurde mit einer Voxelgröße von $41,5 \mu\text{m}$ gemessen. Die eigentliche Auflösung des Geräts, sprich die Längenmessabweichung, liegt bei wenigen Mikrometern. Diese ergibt sich aus den Antastabweichungen der Kalibrierungen des Messgeräteherstellers über Kugel- sowie Mehrkugelnormale. Die Berechnung der Geometrien erfolgte über das Gauß-Prinzip. Die maximal zulässige Längenmessabweichung beträgt $MPE_E = 4,5 \mu\text{m} + L/75$ (mit L in mm) und gilt für eine Messraumtemperatur $\vartheta = 20^\circ\text{C} +/- 2^\circ\text{C}$.

3.2 Messergebnisse des Messvergleichs

Bild 3 bis **Bild 6** zeigen die Messabweichungen der Krümmersammler aus Metall und Kunststoff (Prüfkörper 1 bis 4) zum CAD-Modell (Sollwert).

Die Abweichungen bewegen sich beim Metalldruck im Bereich von $-0,100 \text{ mm}$ bis $+0,150 \text{ mm}$ und beim Kunststoffdruck im Bereich von $-0,500 \text{ mm}$ bis $+0,200 \text{ mm}$. Die geringsten Abweichungen der Prüfkörper 1–4 liegen an den Elementen d_{B1} – d_{B4} und l_{i12} – l_{i41} vor. Die größten Abweichungen weisen die Elemente d_{Z1} – d_{Z4} auf.

Bild 7 zeigt die Messabweichungen des Drehteils aus Metall (Prüfkörper 5) zum CAD-Modell (Sollwert).

Die Abweichungen bewegen sich im Bereich $-0,250 \text{ mm}$ bis $+0,150 \text{ mm}$. Die beiden nachbearbeiteten Zylinder (d_2 und d_4)

weisen die geringsten Abweichungen auf. Die rot durchgezogene Linie markiert die Messung des Messraum-KMGs. Im Vergleich zu Normalen weist das taktile Messraum-KMG die geringsten Messabweichungen auf, gefolgt vom Computertomographen. Bei allen fünf Prüfkörpern sind die Messwerte der nachbearbeiteten Geometrieelementen genauer als bei den rein additiv gefertigten.

Nachbearbeitete Flächen sind besonders bei sicherheitsrelevanten Funktionsbauteilen oder der Erfüllung geringer Form- und Lagetoleranzen von hoher Bedeutung. Durch die konventionelle Nachbearbeitung wird die Oberflächenrauheit verringert. Der Kunststoffdruck weist im Vergleich zum Metalldruck um etwa $0,100 \text{ mm}$ bis $0,300 \text{ mm}$ höhere Abweichungen auf. In dieser Studie lässt sich kein Zusammenhang zwischen den Abweichungen der Zylinder und Längen erkennen. Die Längenabweichungen des KMGs und CTs sind insgesamt am geringsten, die der einfacheren Messgeräte am größten.

Die Abweichungen der Längen l_{Z12} – l_{Z41} lassen sich durch die Berechnung erklären. Um das Maß zu ermitteln, muss auf die Stirnfläche eine Ebene gelegt werden. Diese wird mit der bereits berechneten Mittelachse der Zylinder Z_1 – Z_4 geschnitten. Aus den Schnittpunkten wird das Längenmaß über die Distanz berechnet. Bei den Prüfkörpern 1–4 ähneln sich jeweils die Messwerte von l_{Z12} und l_{Z34} sowie l_{Z23} und l_{Z41} . Die zum Teil hohen Abweichungen der Winkelmessungen a_{Z1} – a_{Z4} lassen sich ebenfalls durch die Oberflächenrauheit sowie Berechnung erklären, die auf mehreren Geometrieelementen beruht.

In dieser Studie wurden keine Solltoleranzen festgelegt, da die Prüfkörper nicht als Funktionsbauteil dienen sollen und daher keine bestimmten Anforderungen für einen Einsatz erfüllen müssen. Ausgehend von den Normen DIN 2768 sowie DIN 2769 liegen alle ermittelten Abweichungen von den Nominalwerten in den Toleranzklassen „fein“ und „mittel“. Der Großteil der Messwerte und den damit verbundenen Abweichungen erfüllt die Vorgaben der Toleranzklasse „fein“. Die bereits genannten Ausreißer beziehungsweise größeren Abweichungen, die unter durch die Messung und Berechnung mehrerer Geometrieelementen zustande

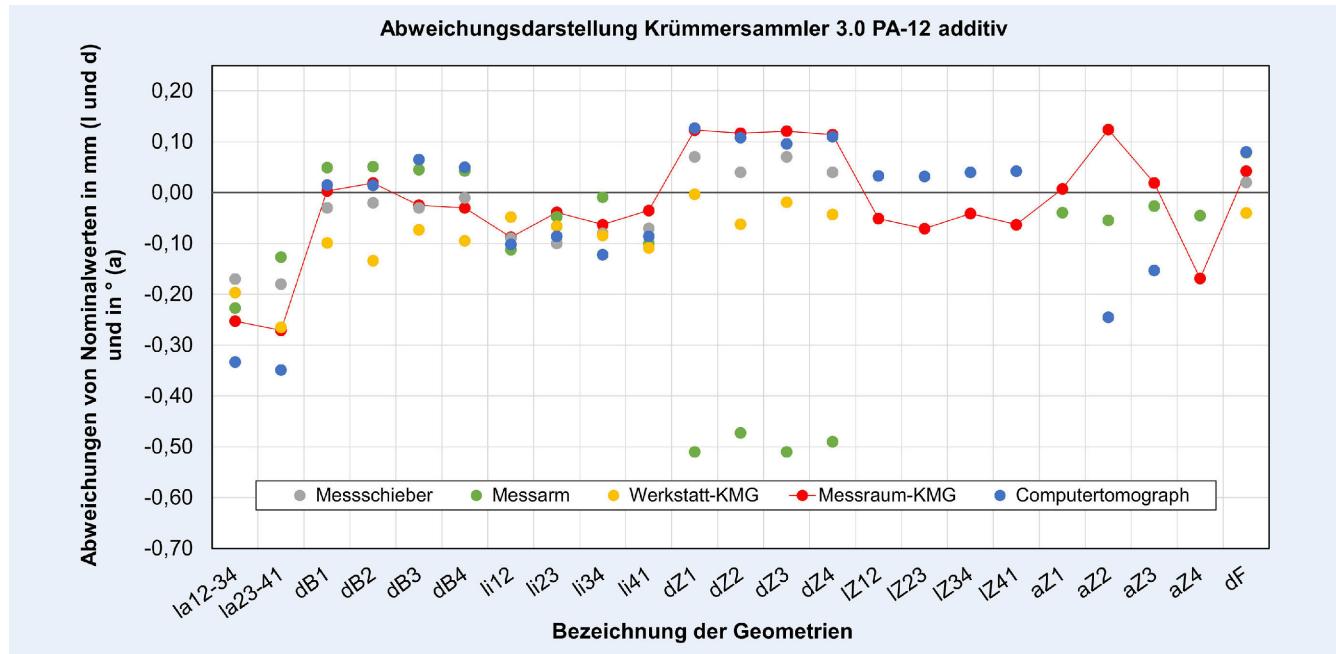


Bild 5 Abweichungsdarstellung Prüfkörper 3 (n=5). Grafik: PTB Braunschweig

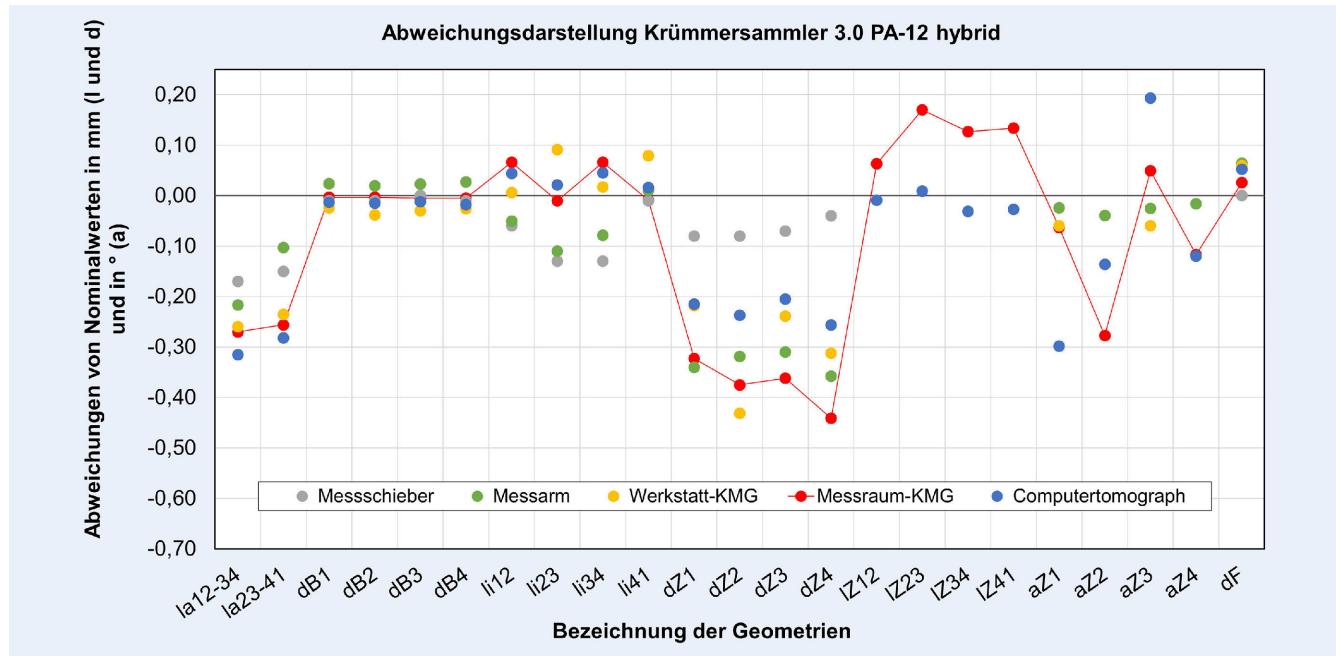


Bild 6 Abweichungsdarstellung Prüfkörper 4 (n=5). Grafik: PTB Braunschweig

kommen, bewegen sich im Bereich der Toleranzklasse „mittel“. [11, 12]

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse des Messvergleichs hinsichtlich Investitions-/Betriebskosten, Zeit, Messgenauigkeit und Messmöglichkeit zusammen.

Ein grüner Kreis spiegelt positive, ein roter Kreis negative Eigenschaften wider. Günstige Messgeräte, wie Messschieber und Lehren, mit denen schnell und einfach gemessen werden kann, besitzen keine hohe Messgenauigkeit und sind in ihren Messmöglichkeiten eingeschränkt. So können innenliegende Strukturen häufig nicht gemessen werden. High-End-Messgeräte, wie etwa taktile und optische Koordinatenmessgeräte, sind zwar teurer in

der Anschaffung, weisen aber eine höhere Messgenauigkeit und mehr Messmöglichkeiten auf. Die Ergebnisse zeigen, dass das taktile Messraum-KMG sowie der Computertomograph die präzisesten Ergebnisse liefern.

Die benötigte Zeit für die Vorbereitung der Messung, den reinen Messablauf und die anschließende Auswertung ist sehr hoch. Der Zeitaspekt bezieht sich in dieser Untersuchung nicht auf Serienfertigungen, sondern auf kleine Losgrößen oder Einzelteile. In einigen Fällen lässt sich die Auswertung für Großserien automatisieren oder beschleunigen, jedoch nicht die Vorbereitung sowie Durchführung des Messvorgangs.

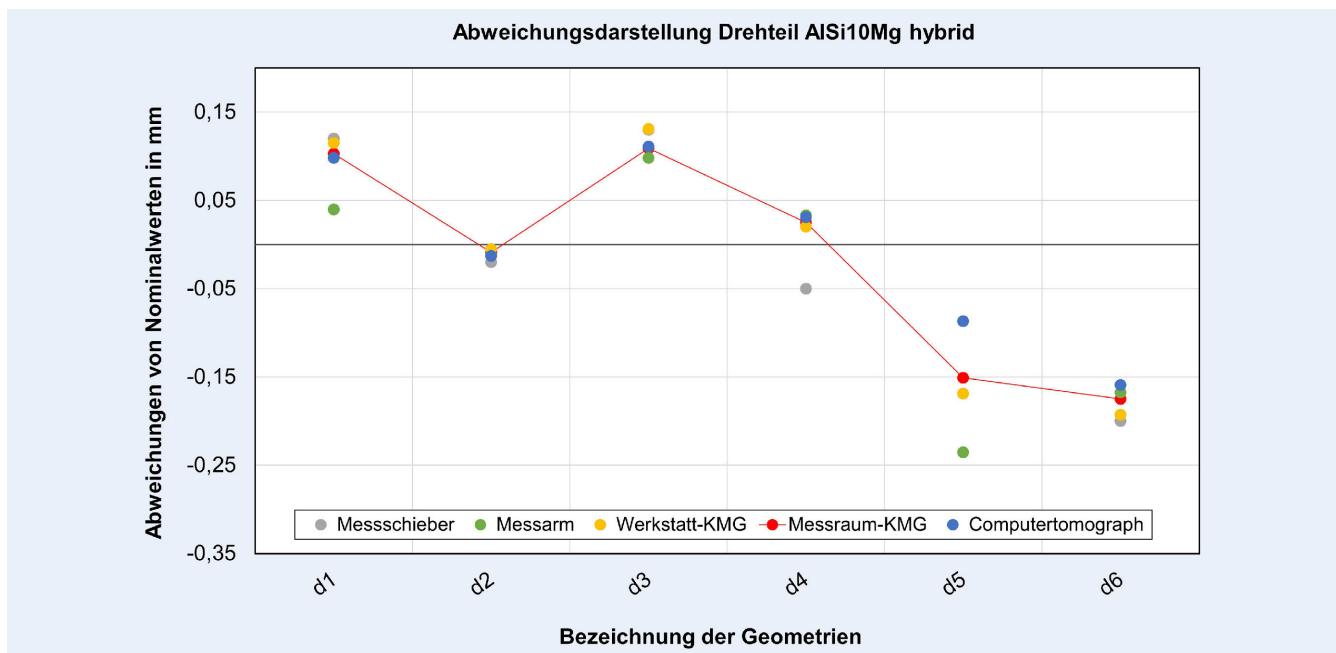


Bild 7 Abweichungsdarstellung Prüfkörper 5 (n=5). Grafik: PTB Braunschweig

Tabelle 4. Zusammenfassung der Messergebnisse.

	Investitionskosten / Betriebskosten	Zeit	Messgenauigkeit	Messmöglichkeit
Messschieber	grün	grün	rot	grün
Lehren	grün	grün	rot	grün
Messarm	gelb	gelb	grün	grün
Werkstatt-KMG	gelb	gelb	grün	grün
Messraum-KMG	rot	rot	grün	grün
Computertomograph	rot	gelb	grün	grün

3.3 Messergebnisse an einem prozessoptimierten Krümmersammler

Im Projekt "QI-Digital" wurde im Zuge der hybriden Fertigungskette eine Prozessoptimierung und Designanpassung des Krümmersammlers vorgenommen. Bild 8 veranschaulicht die Abweichungsdarstellungen verschiedener Modelle des Krümmersammlers bezogen auf das CAD-Modell, das als Grundlage für den Druck dient. Alle Messungen wurden mit dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Computertomographen durchgeführt.

Durch die Veränderung der Druckparameter im additiven Fertigungsprozess konnte die Maßhaltigkeit des Prüfkörpers optimiert werden. Die im Rahmen der Studie erprobten Druckparametersätze können einerseits für eine hohe Maßhaltigkeit, andererseits für optimierte Werkstoffeigenschaften, wie etwa Dichte, Härte, und Zugfestigkeit sorgen. So wurde für den Krümmersammler 3.0 des digitalen Prüfberichts (Bild 8 gelb) eine Zielflächenoptimierung durchgeführt, die Maßhaltigkeit und Werkstoffeigenschaften gleichermaßen berücksichtigt und für den

Krümmersammler 3.0 der hybriden Fertigungskette (Bild 8 rot) die Priorität auf die Maßhaltigkeit legt.

Weiterhin belegt diese Messstudie, dass die Geometrien der Prüfkörper aus AlSi10Mg eine geringere Abweichung im Vergleich zu den Prüfkörpern aus PA-12 aufweisen. Nicht nachbearbeitete Oberflächen oder Geometrien weisen aufgrund der druckbedingten, hohen Rauheit größere Abweichungen als subtraktiv nachbearbeitete Flächen auf.

Krasniqi et al. gehen in ihrer Studie [13] näher auf den Druckprozess des verwendeten Metalldruckers ein. Hierbei werden unterschiedliche Belichtungsstrategien und ein anschließendes Laserpolieren zur Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit untersucht.

4 Messunsicherheitsbetrachtung

Die Messunsicherheit begleitet den gesamten Fertigungsprozess eines Prüfkörpers und hat eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Je geringer die Messunsicherheiten sein sollen, desto höher

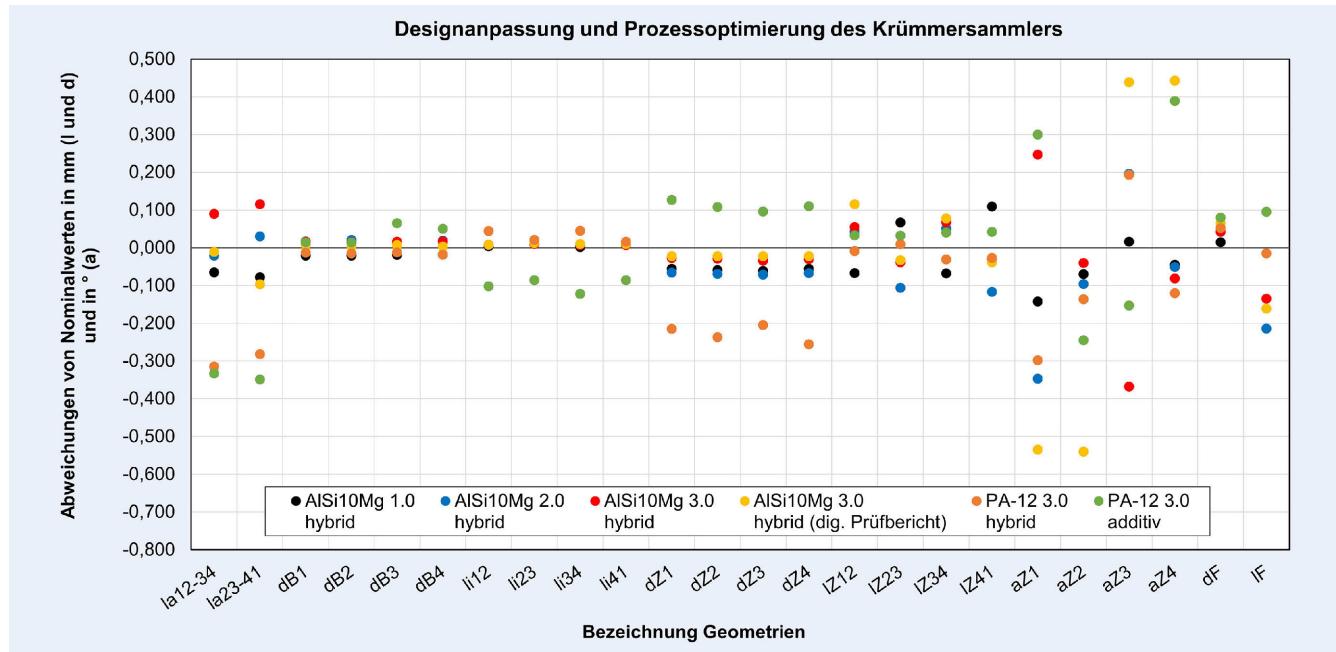


Bild 8 Abweichungsdarstellung der Designanpassung und Prozessoptimierung des Krümmersammlers. Grafik: PTB Braunschweig

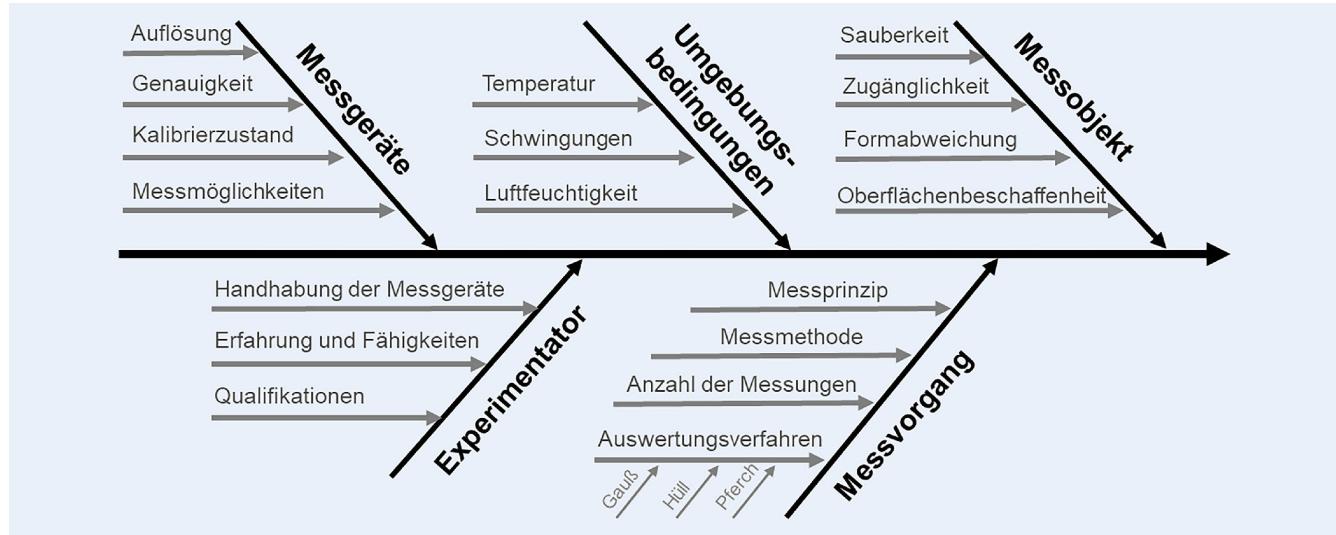


Bild 9 Einflussfaktoren auf die Messunsicherheitsbetrachtung. Grafik: PTB Braunschweig

sind die Fertigungs- und Prüfkosten. Dies führt aber dazu, Rückweisungen der Werkstücke vom Kunden zu minimieren. Um die Messunsicherheit zu ermitteln, muss ein Gesamtsystem betrachtet werden, in dem Teilmessunsicherheiten durch Experimente oder Modellierungen analysiert werden können. So können etwa das Messgerät, der Prüfkörper, die Umgebungsbedingungen sowie der Bedienende Beiträge zur Gesamtmeßunsicherheit liefern. [14]

In dieser Studie wurde als Messaufgabe die Bestimmung der Maßhaltigkeit der einzelnen Geometrieelemente des Prüfkörpers in „mm“ definiert. Der Messwert wurde entweder abgelesen oder errechnet. **Bild 9** stellt die Einflussfaktoren auf die Messunsicherheitsbetrachtung dar.

Neben Umgebungsbedingungen, die sich je nach Fertigungshalle oder Messraum unterscheiden können, spielt auch der Bediener eine entscheidende Rolle. Je mehr Erfahrung und Expertise eine Person mit dem Messmittel besitzt, desto genauer können

Messergebnisse und Auswertungen ausfallen. Zudem weist jedes Messgerät unterschiedliche Messmöglichkeiten und Genauigkeitsklassen auf. Im Fokus steht das Messobjekt. Dieses sollte entsprechend der Anforderungen sauber und zugänglich sein. Eine gute Oberflächenbeschaffenheit fördert genauere Messergebnisse bei berührungslosen und berührenden Messverfahren. [14]

Zur Untersuchung der Messeinflüsse wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Streuung der Messgeräte ist zu vernachlässigen, da die Wiederholungsmessungen zu keinen großen Streuungen und Abweichungen führen. Die Größenordnung der Streuung beträgt beispielsweise am CT ungefähr 5 µm bis 10 µm. Der Restbetrag der Abweichung ist dementsprechend fertigungsbedingt.

Krasniqi et al. haben in ihrer Studie [15] einen Prüfkörper gemäß Norm DIN EN ISO/ASTM 52902 entworfen, auf dem sich verschiedene Geometrieelemente befinden. Diese wurden mittels

taktilem KMG und CT gemessen, um die Maßgenauigkeit und Oberflächeneigenschaften zu bewerten. Der Prüfkörper wurde ebenfalls aus AlSi10Mg additiv gefertigt. In dieser Studie wurde eine vollständige Messunsicherheitsberechnung mit Bestandteilen aus der Kalibrier-, Oberflächen-, System- und Prozessunsicherheit durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die bidirektionale Messungen eine deutlich höhere Abweichung mit einem Versatz von circa 40 µm im Vergleich zu den unidirektionalem Messungen aufweisen. Die Messunsicherheit für bidirektionale Abstände beträgt 56,1 µm. Die größten Anteile stammen von der Oberflächenrauheit und von systematischen Fehlern. Für Vergleichsmessungen wurde das kalibrierte PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt)-Lochplattennormal genutzt. [15]

Die Messunsicherheitsberechnung lässt sich auf diese Studie übertragen. Aufgrund ähnlicher Oberflächenbeschaffenheit fließen die gleichen Faktoren in die taktile und optische Messtechnik ein.

5 Fazit und Ausblick

Im Allgemeinen ist in allen Messsystemen, einschließlich präzisen Koordinatenmessgeräten, eine ähnliche Tendenz der Abweichungen vom Sollwert zu beobachten. Die Abweichungswerte liegen jedoch in unterschiedlichen Bereichen, was die Notwendigkeit standardisierter Mess- und Bewertungsverfahren für die Prüfung und Kontrolle von AF-Teilen verdeutlicht. Insgesamt führen das Messraum-KMG und der Computertomograph zu den geringsten Messabweichungen. Der Metalldruck weist geringere Abweichungen als der Kunststoffdruck auf. Die nachbearbeiteten Flächen sind aber bei beiden Materialien ähnlich gut. Für beide Werkstoffe ist die hybride Fertigung präziser als die rein additive, jedoch hat sie auch einen höheren Zeitbedarf.

Unter Berücksichtigung der geforderten Toleranzen können für eine fertigungsbegleitende und schnelle Überprüfung von Messwerten auch einfache und kostengünstige Messmittel eingesetzt werden. Weitere Vergleichsstudien mit unterschiedlichen Messsystemparametern, verschiedenen AF-Methoden und Materialien wären für die Entwicklung der erforderlichen Prüfverfahren wertvoll. Es ist eine Festlegung von Toleranzen im AF-Bereich für den Einsatz von sicherheitsrelevanten Bauteilen nötig.

Es zeigt sich, dass die rauere Oberfläche im Vergleich zur nachbearbeiteten Oberfläche einen wesentlichen Beitrag zur erhöhten Unsicherheit leistet. Diese und andere Studien belegen, dass für alle Messmethoden, je nach Eignung und Geometrieelement, die Oberflächeneigenschaften von AF-Bauteilen weiterhin untersucht werden müssen und Optimierungsbedarf aufweisen.

Als nächste Schritte können weitere Geometrieprüfkörper additiv gefertigt, Funktionsflächen subtraktiv nachbearbeitet und auf Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit untersucht werden. Eine Anwendung hierfür können Geometrieprüfkörper sein, die zum Beispiel in den Studien von *Krasniqi et al.* erwähnt werden [9, 13, 15]. Die Ergebnisse dieser Studie fließen in das Forschungsprojekt „QI-Digital – Additive Fertigung“ [16] ein.

LITERATUR

- [1] Liu, W.; Chen, X.; Zeng, W.: Comparison of X-ray computed tomography and coordinate-measuring system dimensional measurement for additive manufacturing parts using physical and simulation methods. Measurement 229 (2024) #114414, doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114414
- [2] Garengo, P.; Biazzo, S.; Bititci, U. S.: Performance measurement systems in SMEs: A review for a research agenda. International Journal of Management Reviews Volume 7 (2005) 1, pp. 25–47, doi.org/10.1111/j.1468-2370.2005.00105.x
- [3] Sagbas, B.; Poyraz, O.; Durakbasa, N.: A Comparative Study on Precision Metrology Systems For Additive Manufacturing. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry 7 (2023) 1, pp. 114–123, doi.org/10.46519/ij3dptdi.1206753
- [4] Schmid, M.: Additive Fertigung mit Selektivem Lasersintern (SLS), Prozess- und Werkstoffüberblick. Heidelberg: Springer-Verlag 2015
- [5] Wimpenny, D. I.; Pandey, P. M.; Jyothish Kumar, L.: Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer-Verlag 2017, doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2
- [6] D'Amato, R.; Caja, J.; Maresca, P.; Gómez, E.: Use of coordinate measuring machine to measure angles by geometric characterization of perpendicular planes. Estimating Uncertainty, Measurement 47 (2014), pp. 598–606, doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.027
- [7] Sousa, S.; Aspinwall, E.: Development of a performance measurement framework for SMEs. Total Quality Management and Business Excellence 21 (2010) 5, pp. 475–501, doi.org/10.1080/14783363.2010.481510
- [8] Kirchner, E.: Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung. Heidelberg: Springer-Verlag 2020
- [9] Krasniqi, M.; Brandes, W.; Löffler, F.: Hybride Prozesskette für die additive Fertigung – Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile mithilfe integrierter Referenzgeometrien. vt Werkstatttechnik online 115 (2025) 10, S. 832–840. Düsseldorf: VDI Fachmedien, doi.org/10.37544/1436-4980-2025-10-145
- [10] Zeiss: Taktile und optische Messtechnik: Vorteile, Unterschiede und Anwendungsbereiche. Stand: 2025. Internet: www.zeiss.de/messtechnik/entdecken/themen/taktile-und-optische-messtechnik.html. Zugriff am 04.09.2025
- [11] DIN ISO 2768: Allgemeintoleranzen – Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeingriffung. Deutsche Fassung, Ausgabe 1991–06
- [12] DIN ISO 2769: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Allgemeintoleranzen – Tabellenwerte für geometrische Toleranzen und Toleranzen für Längen- und Winkelgrößenmaße ohne individuelle Toleranzangabe. Deutsche Fassung, Ausgabe 2023–04
- [13] Krasniqi, M.; Löffler, F.; Tutsch, R.: Influence of scanning strategies on dimensional accuracy in laser powder bed fusion. Measurement: Sensors 38 Supplement (2024), #101840, doi.org/10.1016/j.measen.2025.101840
- [14] Marxer, M.; Bach, C.; Keferstein, C.: Fertigungsmesstechnik – Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2021, doi.org/10.1007/978-3-658-34168-8
- [15] Krasniqi, M.; Laquai, R.; Löffler, F.: Measurement Uncertainty and Accuracy of CT and CMM in Additive Manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2025), Einreichung noch nicht veröffentlicht
- [16] Consortium of the QI-Digital Initiative: QI-Digital – Additive Manufacturing. Internet: www.qi-digital.de/en/pilotprojects/additive-manufacturing. Zugriff am 09.09.2025

W i e b k e B r a n d e s , M . S c .
wiebke.brandes@ptb.de

D r . I n g . M e r g i m K r a s n i q i

P r o f . D r . F r a n k L ö f f l e r

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) R
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
www.ptb.de

LIZENZ



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