

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teilvorhaben VisiConsult X-ray Systems & Solutions GmbH

Anschrift und Kontakt:

VisiConsult X-ray Systems & Solutions GmbH
Brandenbrooker Weg 2-4
23617 Stockelsdorf

Projektleiter

Dr.-Ing. Frank Herold
f.herold@visiconsult.de
T +49 451 2902860

Verbundvorhaben: Enabl3D – Effiziente Qualitätssicherungsmethode für bionisch optimierte und ressourcenschonende 3D-Druck-Bauteile; Teilvorhaben Effiziente µCT-Technologie

Förderkennzeichen: 03LB5000B

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 - 31.07.2023

Teil I: Kurzbericht

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer neuen Methode zur effizienten Qualitätssicherung von bionischen Metall-3D-Druck-Leichtbauteilen für die Luftfahrt, Automobil- und Medizintechnik. Die sich daraus ergebenden Kosten- und Zeit-Ersparnisse sollen neue Anwendungspotentiale für 3D-Druck erschließen und dadurch einen signifikanten Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten.

Basis der zu entwickelnden QS-Methode sollte die intelligente Kombination von Eindringprüfung, Prozessmonitoring und µCT bilden (vgl. Abbildung 1):

- Mittels Eindringprüfung werden die tatsächlichen Materialeigenschaften (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Duktilität, Anisotropie) direkt am Bauteil gemessen
- Die hochauflösenden Prozessmonitoring-Daten sollen dazu dienen, die Prozessstabilität nachzuweisen und dadurch die lokal gemessenen Eigenschaften aufs Gesamtbau Teil zu übertragen. Zusätzlich können ggf. kritische Bereiche identifiziert werden.
- Mittels µCT-Untersuchungen werden die als kritisch identifizierten Bereiche zerstörungsfrei überprüft

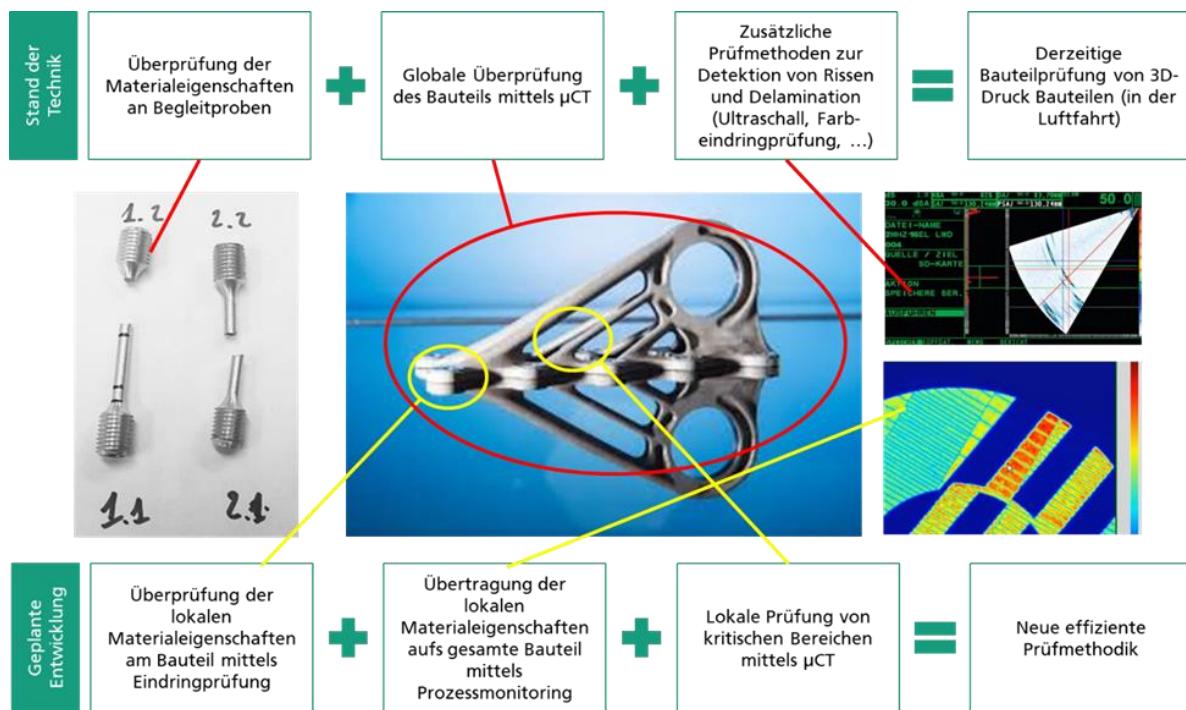


Abbildung 1: Schematische Darstellung vom Stand der Technik und der neuen Prüfmethodik.

VisiConsult entwickelte im Rahmen seines Teilvorhabens ein roboterbasiertes µCT-System zur lokalen Prüfung von kritischen Bereichen und zur Extraktion realer Defekte. Alternativ dazu ist es möglich, das gesamte Bauteil zu scannen und alle kritischen Defekte zu segmentieren. Insbesondere lag ein Fokus auf der Detektion von Bindefehlern (Lack-of-Fusion Defekten (LoF)). Ein Industrieroboter wurde als Manipulator des Bauteils eingesetzt und ermöglicht komplexe Trajektorien über die klassischen zirkularen Scans hinaus. Zur Simulation der Zustände der Röntgenquelle, des Roboters als Manipulator, der AM-Komponente und des digitalen Matrixdetektors (digital detector array (DDA)) wurde ein Digitaler Zwilling des realen Systems entwickelt. Die Simulationen der Röntgenbildgebungskette werden mit der Röntgensimulationssoftware aRTist der BAM durchgeführt, was die softwareseitige Erzeugung realistische Bilder ermöglicht.

Mit Hilfe des Digitalen Zwillings und seines Modells des Systems, einschließlich des zu scannenden Bauteils, wird für die definierte Detailregion (region of interest (ROI)) eine Basismenge von Blickrichtungen (z. B. eine gleichmäßig abgetastete Kugel) erzeugt. Zur Reduktion von Scanzeit und Optimierung der Durchstrahlbarkeit wird diese Anzahl der Projektionen danach minimiert, sodass nur die Projektionsrichtungen verwendet werden, die den optimalen Informationsgewinn bieten.

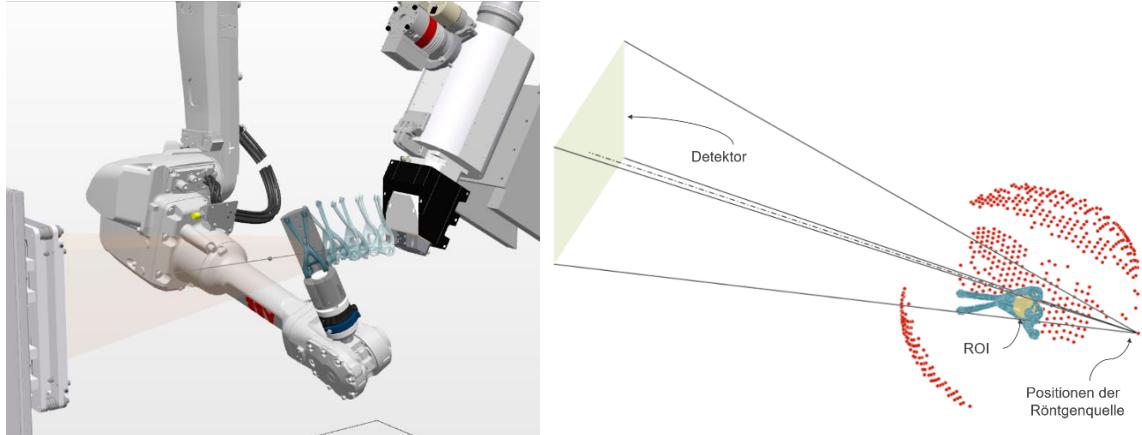


Abbildung 2: (links) Visualisierung des Digitalen Zwillings, (rechts) Optimierung der Blickrichtungen zur CT-Rekonstruktion.

LoF bedeutet, dass sich lokal im Bauteil loses Pulver befindet, welches beim 3D-Druckvorgang nicht aufgeschmolzen wurde. Daher ist der Kontrast zum Vollmaterial gering. Unter der Annahme, dass das lose Pulver die Röntgenstrahlung stärker streut als das umgebende Material, wurden zur Optimierung der Detektion von LoF phasenkontrastmotivierte Filter verwendet sowie verschiedene CT-Rekonstruktionsverfahren untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass ein algebraischer Ansatz in Kombination mit einem speziellen Filter vorteilhaft ist.

Darüber hinaus hat VisiConsult die Verformung der gefertigten Bauteile nach dem Druck mit den Soll-Daten aus dem CAD-Modell verglichen und die geometrische Transformation bestimmt, sodass insbesondere die Positionen der gefundenen Defekte dem beim 3D-Druck geltenden Koordinatensystem zugeordnet werden können. Diese Information ist für die Korrelation der Monitoringdaten des 3D-Drucksystems mit den Defekten aus den realen Bauteilen nötig.

Zusätzlich entwickelte der Partner Fraunhofer IAPT ein Verfahren, das mithilfe der In-Situ-Prozessüberwachung den Nachweis der Integrität des gesamten Bauteiles ermöglicht und mit größeren Unsicherheiten verbundene Vorhersagen über die Hochrisikobereiche liefert. Der Partner Imprintec entwickelte ein System und eine Methodik zum Antasten der AM-Beiproben, um aus der lokalen Eindringprüfung auf die allgemeinen Materialeigenschaften zu schließen. Diese werden in der von Imprintec entwickelten Simulation benötigt, um unter Berücksichtigung kritischer Poren auf die individuellen Bauteileigenschaften zurückzuschließen.

Zusammenfassend wurde ein Verfahren zur Qualitätsbewertung additiv gefertigter Bauteile entwickelt, das eine Kombination aus den drei oben genannten Entwicklungen darstellt: Das In-Situ-Monitoring liefert die Information, wo CT-Scans durchgeführt werden müssen. Diese werden robotergestützt durchgeführt und ermöglichen die Extraktion der kritischen Bauteilfehler. Mit Hilfe der Eindringprüfung werden die allgemeinen Materialeigenschaften bestimmt und in Kombination mit den mittels CT gefundenen Defekten durch Simulation auf die individuellen Bauteileigenschaften geschlossen.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Teilvorhaben VisiConsult X-ray Systems & Solutions GmbH

Anschrift und Kontakt:

VisiConsult X-ray Systems & Solutions GmbH
Brandenbrooker Weg 2-4
23617 Stockelsdorf

Projektleiter

Dr.-Ing. Frank Herold
f.herold@visiconsult.de
T +49 451 2902860

Verbundvorhaben: Enabl3D – Effiziente Qualitätssicherungsmethode für bionisch optimierte und ressourcenschonende 3D-Druck-Bauteile; Teilvorhaben Effiziente µCT-Technologie

Förderkennzeichen: 03LB5000B

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 - 31.07.2023

Teil II: Eingehende Darstellung

1. Durchgeführte Arbeiten relevanter Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten im Kontext der ursprünglichen Vorhabensbeschreibung ausführlicher dargestellt.

1.1 NDT-Untersuchung mittels μ CT

Der Partner Fraunhofer IAPT hat eine Vielzahl an Proben mit unterschiedlichen Materialkennwerten und Defekten gefertigt, die alle mittels μ CT (Mikro-Computertomographie) untersucht wurden. Die Proben wurden in sieben Baujobs mit jeweils unterschiedlichen Fragestellungen gedruckt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Baujobs und deren Analyse eingegangen.

Die rekonstruierten Volumendaten aus der μ CT repräsentieren die örtliche Verteilung der Absorptionskoeffizienten in Bezug auf das Material des Prüfobjekts. Um eine hinreichende Auflösung zu erreichen, sollte die Voxelgröße dreimal kleiner sein als die kritische Defektgröße des Bauteils. Die aktuelle Brennfleckgröße der Röntgenröhre sollte kleiner sein als die Voxelgröße.

Daher wurde für alle CT-Aufnahmen, wenn nicht anders beschrieben, ein Bunker-System mit einer 300 kV Mikrofokus Röntgenquelle (X-Ray WorX) mit einer minimalen Brennfleckgröße von etwa 5 μ m verwendet. Der VAREX XRD 3025, ein digitaler Matrixdetektor (digital detector array (DDA)) mit einer aktiven Fläche von 290 x 237 mm und einer Pixelgröße von 100 μ m, befindet sich in einem fixierten Abstand zur Röntgenröhre. Das zu untersuchende Objekt kann auf einer linearen Manipulatoreinheit beliebig zwischen Röntgenröhre und Detektor positioniert werden, wodurch Vergrößerungen von bis zu 33 und damit eine Auflösung im rekonstruierten Volumen von bis zu 3 μ m erreicht werden können.

Die ersten vier Baujobs dienten dazu, die angewendeten Techniken zu testen und zu optimieren, Baujob fünf bis sieben bildete die Datenbasis für die Projektpartner.

Anmerkung: Die Rekonstruktion des CT-Volumens erfolgte mit Hilfe der Software VG Studio Max (Volume Graphics GmbH, Heidelberg/Deutschland). Des Weiteren wurde VG Studio Max verwendet für die in den nachfolgenden Abschnitten erwähnte Registrierung und Porenanalyse.

1.1.1 Baujob 1: Evaluierung der μ CT für AM-Bauteile

Selektives Laserschmelzen oder pulverbettbasiertes Schmelzen (engl. Laser Powder Bed Fusion: LPBF) und direkte Energieablagerung (DED) sind zwei gängige Methoden, die aktiv in der Additiven Fertigungsindustrie (AM) verwendet werden. Obwohl diese Techniken darauf abzielen, Teile von guter Qualität herzustellen, weisen die hergestellten Teile eine unterschiedliche Anzahl von Mängeln auf, hauptsächlich das Vorhandensein von Poren. Die Porenfehler entstehen aufgrund zahlreicher Parameter, die die Stabilität dieser AM-Technik beeinflussen. Sie können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden: 1. Gasinduzierte Porosität (Gasporen, auch als Keyhole-Poren bekannt) 2. Porosität aufgrund mangelnder Verschmelzung (Lack-of-fusion LoF). Ersteres erzeugt charakteristisch sphärische Hohlräume, die auf das Vorhandensein von eingeschlossenem Gas zwischen den Pulverpartikeln zurückzuführen sind. Letzteres erscheint in heterogenen oder unregelmäßigen Formen und entsteht durch unzureichendes Schmelzen der Schichten, was wiederum auf die Instabilität der Prozessparameter zurückzuführen ist. Diese Mängel beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften eines hergestellten Teils erheblich. Es ist daher unerlässlich, die Teile effektiv und effizient zu charakterisieren.

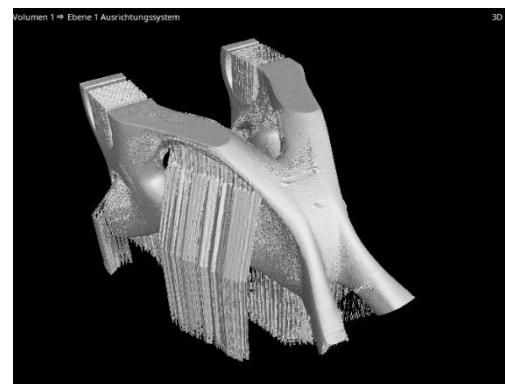
Um Unregelmäßigkeiten in einer Probe zu finden, wird eine Porenanalyse durchgeführt. Anhand des ersten Baujobs wurde die Auflösung und die Art der Porenanalyse festgelegt. In der Porenanalyse soll der Defekttyp dargestellt werden, hier wird unterschieden zwischen LoF-Defekten und Gasporen. Die

Segmentierung der Defekte wird durch einen adaptiven Threshold festgelegt, nach der Segmentierung findet eine Filterung der Poren nach Größe statt, hier wurden Poren ausgeschlossen die kleiner als drei Voxel in äquivalentem sphärischem Durchmesser sind, um eine robuste Detektion zu gewährleisten. Der äquivalente sphärische Durchmesser eines unregelmäßig geformten Defekts ist der Durchmesser einer perfekten Kugel mit dem äquivalenten Volumen V .

Anhand eines komplexen Bauteils (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde die Fähigkeit des μ CT-Systems getestet zwischen LoF- und GA-Defekten zu unterscheiden.



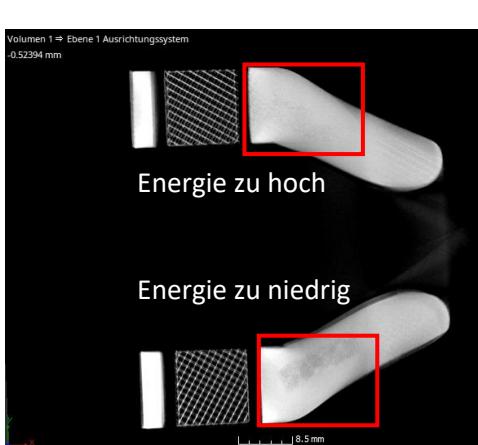
a) Komplexes AM-Bauteil



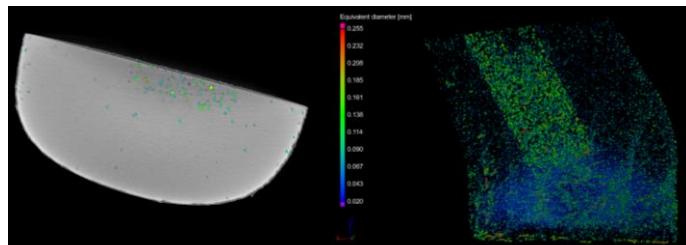
b) 3D Darstellung des rekonstruierten Volumens

Abbildung 1: Foto eines komplexen AM-Bauteil aus TiAl6V4 (a), das mit einer Auflösung von $10 \mu\text{m}$ gescannt wurde. Die 3-dimensionale Darstellung des rekonstruierten Volumens ist in (b) zu sehen.

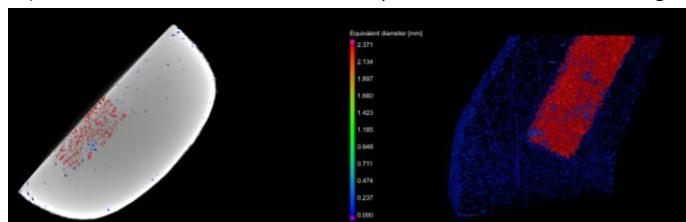
Gasporen sind typisch bei einer zu hohen Energiedichte während des LPBF-Prozesses, während LoF-Defekte entstehen, wenn die Energiedichte zu gering ist, um das Pulver zu schmelzen. In der Probe aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** wurden daher zwei Bereiche mit zu hoher und zu niedriger Laserenergie gedruckt, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen ist. Wie zu erwarten, treten die detektierten Poren im Bereich der zu hohen Energiedichte vereinzelt auf (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** b) und weisen eine deutlich höhere Sphärizität auf im Vergleich zu den Poren im Bereich der niedrigen Energiedichte (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** c). In diesem Bereich sind die Poren lang gestreckt und treten teilweise in zusammenhängenden Clustern auf, was typisch für LoF Defekte ist. Dies ist auch am unterschiedlichen Äquivalenzdurchmesser in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** b/c zu sehen.



a) Schnittbild durch die relevante Ebene des Bauteils



b) Schnittbild und 3D Ansicht der mit Gasporen im Bereich zu hoher Energie



c) Schnittbild und 3D Ansicht mit LoF-Defekten im Bereich zu niedriger Energie

Abbildung 2: Detaillierte Ansicht und Porenanalyse im Bereich des Bauteils, in dem mit unterschiedlicher Laserenergie gedruckt wurde.

Weiterhin wurden verschiedene Proben mit realen und künstlichen Fehlern, sowie unterschiedlichen internen Strukturen in Baujob 1 gedruckt und untersucht. Es wurden Vergleiche zu theoretischen Simulationen angestellt und die Qualität intern gedruckter Objekte analysiert. Die Analyse von Baujob 1 hat gezeigt, dass das μ CT-System in der Lage ist Poren bis zu einer Größe von etwa 10 μ m zu detektieren und auch die Art des Defektes zu unterscheiden. Es eignet sich außerdem, um die Qualität und Maßhaltigkeit interner und externer Strukturen zu verifizieren.

1.1.2 Baujob 2: Korrelation von μ CT-Daten und metallografischen Untersuchungen

In Baujob 2 wurden mehrere Zylinder mit wiederum zylindrischen Markern gedruckt, die dazu dienen sollten, die Probenausrichtung reproduzierbar zu bestimmen und somit die Zuordnung der detektierten LoF Poren zwischen den Volumen und auch Schliffen zu optimieren. Abbildung 3 zeigt an einem dieser Zylinder, dass bei der Gold Standard Porenanalyse viele Poren nicht detektiert werden können und Ziel in diesem Arbeitspaket war die Entwicklung und Analyse verschiedener Algorithmen und Filter, um die Detektion von LoF zu optimieren. Da der Kontrast zwischen geschmolzenem und nicht geschmolzenem Pulver sehr gering sein kann, ist nicht auszuschließen, dass einzelne Poren eventuell kaum bis gar nicht im Schnittbild des rekonstruierten Volumens zu erkennen sind. Daher wird für eine objektive Bewertung der Qualität der Detektionsalgorithmen eine unabhängige Referenz benötigt. Als Referenz wurden Schliffproben angefertigt und mikroskopische Aufnahmen der polierten Schlifffläche erzeugt.

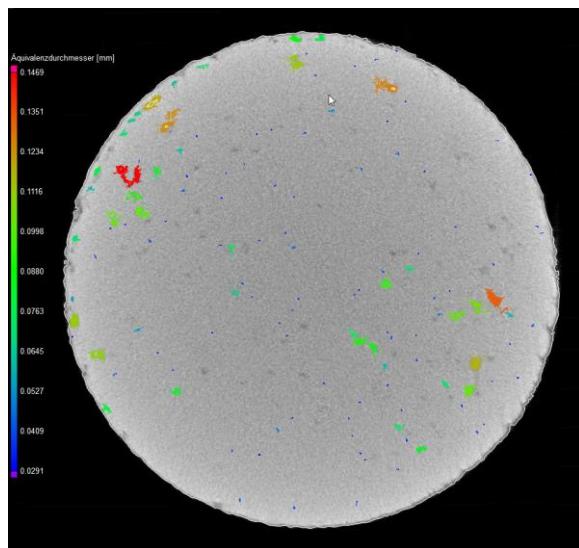


Abbildung 3: Gold Standard Porenanalyse.

Um nun die Referenzporen im Mikroskopbild mit den detektierten Poren zu vergleichen, muss zunächst die richtige Ebene im CT-Volumen gefunden werden. Da der Schliff- und Polierprozess nicht präzise genug ist, um die Ebene eindeutig im Volumen anhand von Koordinaten zu identifizieren, wurde je ein CT-Scan vor und nach den Schliffprozess aufgenommen. Die zylindrischen Marker im Bauteil ermöglichen eine Registrierung der beiden Volumina aufeinander, wodurch im originalen, vollständigen Volumen die Schlifffläche gefunden werden kann (siehe Abbildung 4).

Diese Schlifffläche muss nun erneut auf das Mikroskopbild registriert werden, um die korrekte Rotation und Skalierung zu finden. Dazu wurde die Fourier-Mellin Transformation implementiert und das Ergebnis ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen.

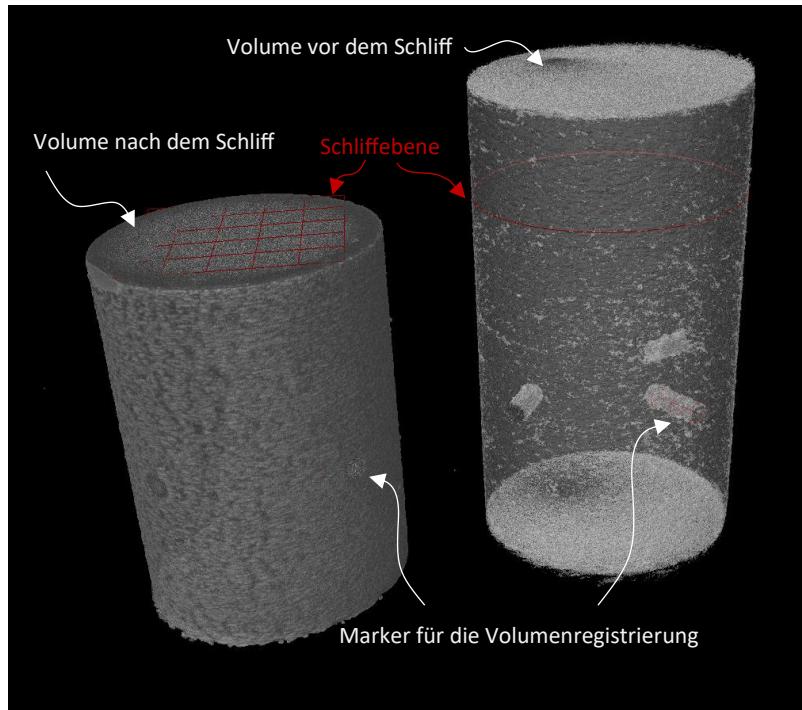
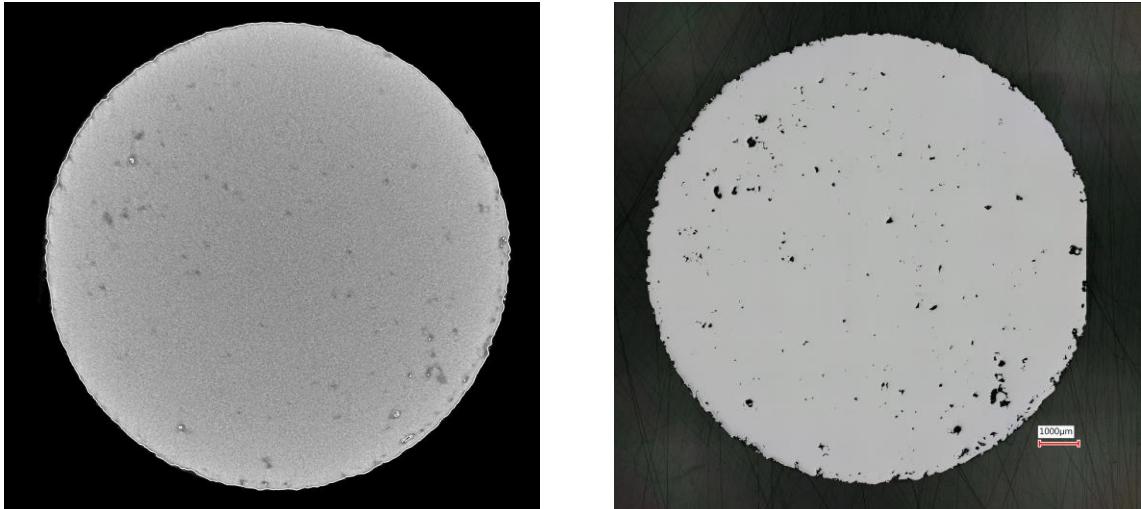


Abbildung 4: Prozess der Volumenregistrierung zur Identifikation der Schliffebene.



a) Mikroskopisches Bild der Schliffebene

b) Auf das Mikroskopbild registrierte Schicht des CT-Volumens

Abbildung 5: Registrierung der Schicht im CT-Volumen (a) auf das mikroskopische Bild der Schliffebene (b).

Für eine verbesserte Detektion der LoF Defekte wurden zunächst verschiedene Entrausch- und Texturanalyse-Methoden angewendet, aber wie bereits erläutert, besteht die Gefahr aufgrund des geringen Dichteunterschiedes die LoF Poren im Absorptionsbild gar nicht zu detektieren. Daher wurde sich hauptsächlich auf Phasenkontrastfilter konzentriert.

Bei der Röntgen-Phasenkontrast-Bildgebung wird versucht neben der reinen Absorption zusätzlich eine Phasenverschiebung der Röntgenstrahlung, die an Grenzflächen entsteht, zu detektieren. So besteht die Möglichkeit, trotz geringer Dichteunterschiede, die Grenzflächen der LoF-Defekte zu erfassen.

Typischerweise werden zusätzliche beugende Gitter verwendet, um die Phasenverschiebung durch Interferenz detektierbar zu machen. Da in dem hier genutzten System die Röntgenstrahlung mit einer Mikrofokus-Röntgenröhre und einer Brennfleckgröße von bis zu $5 \mu\text{m}$ erzeugt wird, kann eine hohe laterale räumliche Kohärenz gewährleistet werden. Das ist die Grundvoraussetzung für Inline- oder auch propagationsbasierten Phasenkontrast, bei dem keine zusätzlichen Wellenfrontmodulatoren benötigt werden, sondern die Phaseninformation direkt im Röntgenbild detektiert werden kann. Die Entstehung der unterschiedlichen Röntgenbilder ist in Abbildung 6 veranschaulicht.

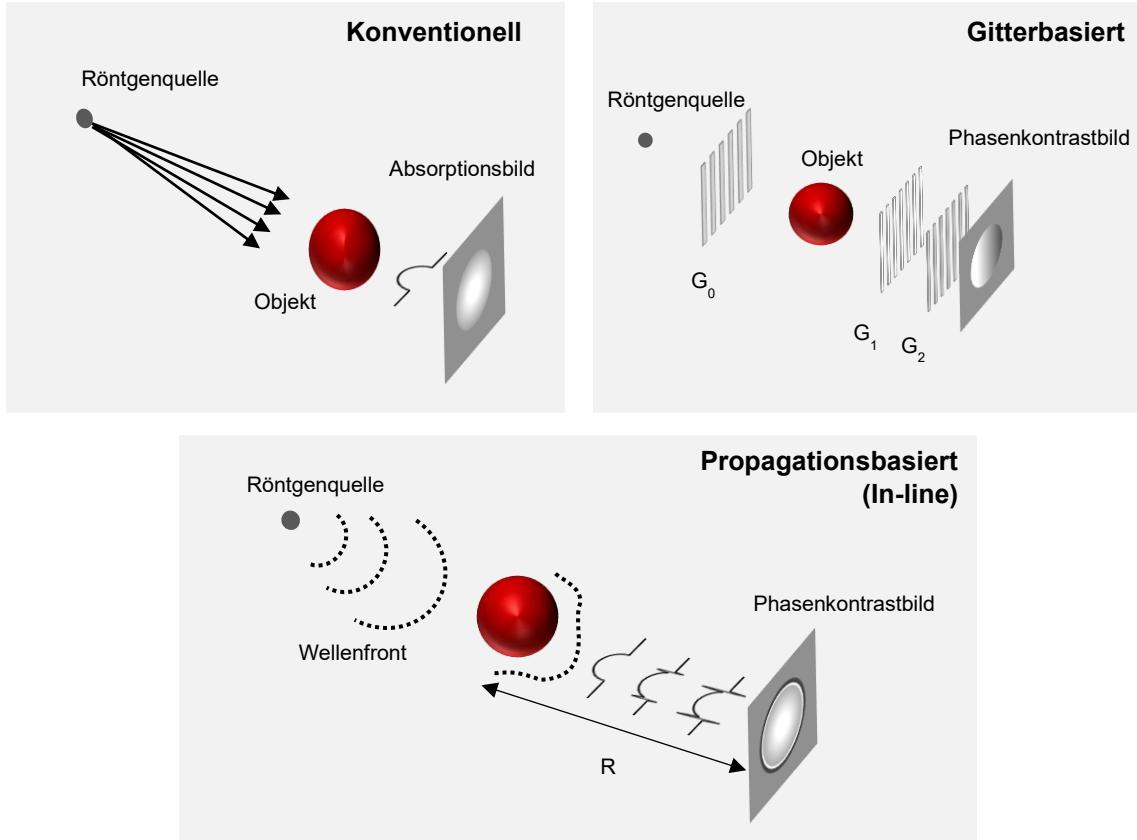


Abbildung 6: Grafische Veranschaulichung der unterschiedlichen Signalentstehung bei konventioneller und auf Phasenkontrast basierender Röntgenbildgebung.

Um die Phaseninformation aus dem Bild zu extrahieren gibt es verschiedene Phasenrückgewinnungsfilter, die vor der Rekonstruktion auf alle Projektionsbilder angewandt werden können [16]. Es wurden verschiedene Filter getestet und im Folgenden werden die Ergebnisse des „Modified Bronnikov's Algorithm“ (MBA) gezeigt.

Neben der klassischen gefilterten Rückprojektion (FDK) wurde für die Rekonstruktion auch eine Algebraische Variante (ART) getestet, um Rauschen zu unterdrücken und den Kontrast zu erhöhen. Nachdem die Projektionsbilder gefiltert und rekonstruiert wurden, wurde die korrekte Schicht durch die bereits beschriebene Registrierung extrahiert und mit dem Mikroskopbild verglichen. Um die Performance der Filter zu testen wurden die Defekte immer mit demselben adaptiven Schwellenwertfilter segmentiert und die folgenden Parameter wurden für ein Segmentierungsranking gerechnet:

1. Gefundene Defekte
2. Gefundene Defektpixel
3. Hausdorff-Distanz (HD): maximaler Abstand zweier Defektgrenzen

4. Dice Score Koeffizient (DSC): Überlappungsbereich von zwei binären Masken aus der Segmentierung. Dafür gilt

$$DSC(A, B) = \frac{2(A \cap B)}{(A+B)} * 100$$

Abbildung 7 zeigt die registrierte Schliffebene nach unterschiedlicher Vorfilterung und Rekonstruktion und es wird deutlich, dass die Iterative Rekonstruktion eine Rauschunterdrückung erzielt und sich der Kontrast der Defekte durch die Vorfilter zu verbessern scheint. In der Grafik in Abbildung 8 ist das Segmentierungsraking mit den vier berechneten Parametern dargestellt.

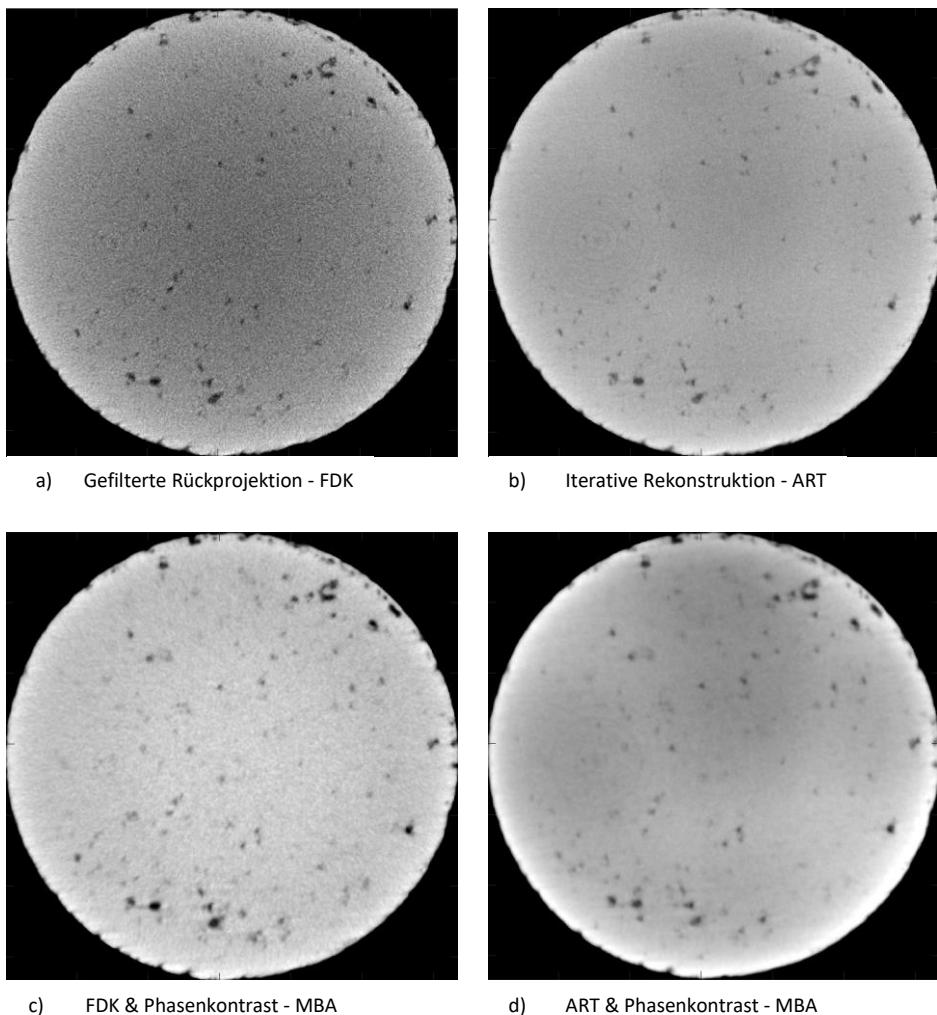


Abbildung 7: Registrierte Schliffebene nach unterschiedlicher Vorfilterung und Rekonstruktion

Der subjektive Eindruck der Schnittbilder aus Abbildung 7 wird durch Auswertung der Segmentierung bestätigt. Durch die Anwendung von ART und Phasenkontrast Vorfiltern lassen sich alle berechneten Güteparameter der Segmentierung verbessern. Es werden deutlich mehr Defekte und Defekt-Pixel korrekt gefunden und Falsch-Positive werden reduziert, was sich in der verringerten Hausdorff-Distanz (HD) widerspiegelt.

Es wird allerdings noch keine optimale Segmentierung erreicht. Nicht gefundene Defekte sind meist klein (etwa 7 Pixel) und gruppieren sich in einer Region, was auf eine unzureichende Registrierung hindeuten könnte.

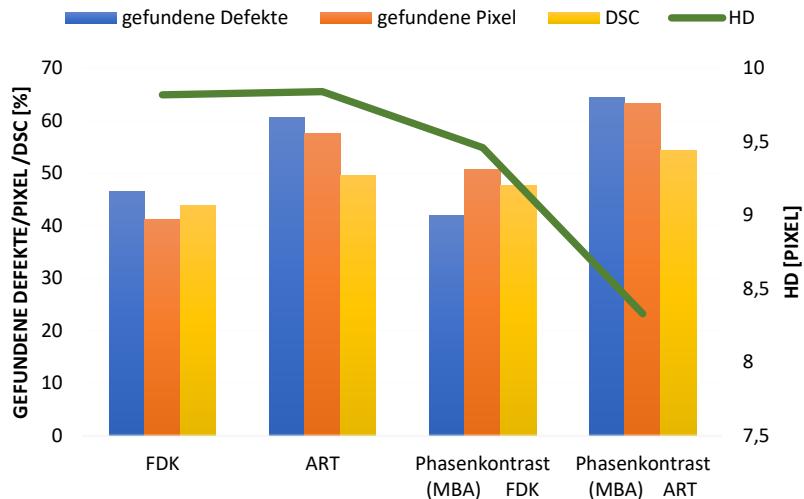


Abbildung 8: Segmentierungsranking der verschiedenen Filter und Rekonstruktionsvarianten

Daher sollte im weiteren Verlauf des Projektes an einer Optimierung der gedruckten Marker für eine bessere Volumenregistrierung gearbeitet werden.

Zusätzlich kann die Hardware optimiert werden, z. B. durch den Einsatz direktkonvertierender Detektoren. Teile aus diesem Arbeitspaket wurden bereits veröffentlicht [1,3-5].

1.1.3 Baujob 3: Korrelation von Materialeigenschaften und Defekten im Bauteil

In Baujob 3 wurden Zugproben gedruckt, um im Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 die mechanischen Kennwerte der Ti6Al-4V (Titan Grade 5) Proben zu bestimmen. Es wurden 17 Proben untersucht die sowohl liegend als auch stehend und zum Teil mit optimalen und nicht optimalen Parametern gedruckt wurden. Alle Proben wurden einmal vor und nach dem Zugversuch mittels μ CT untersucht, um aus den detektierten Defekten eventuell Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften bzw. auf das unterschiedliche Verhalten im Zugversuch zu ziehen. Abbildung 9 zeigt das Ergebnis des Zugversuches.

Die geprüften Proben 1 - 18 haben im Mittelwert eine Streckgrenze $R_{p0,2}$ von 1032 MPa und eine Zugfestigkeit R_m von $\bar{x} = 1097$ MPa. Im Schnitt liegt eine Bruchdehnung A_{25mm} von 13,2% vor. Eine Ausnahme stellt die Probe 10 dar, diese erreicht eine Bruchdehnung A_{25mm} von 7,6%. Die Sonderfallprobe erreicht eine Streckgrenze $R_{p0,2}$ von 1206 MPa und eine Zugfestigkeit R_m von 1315 MPa. Die Bruchdehnung liegt bei 2,7%.

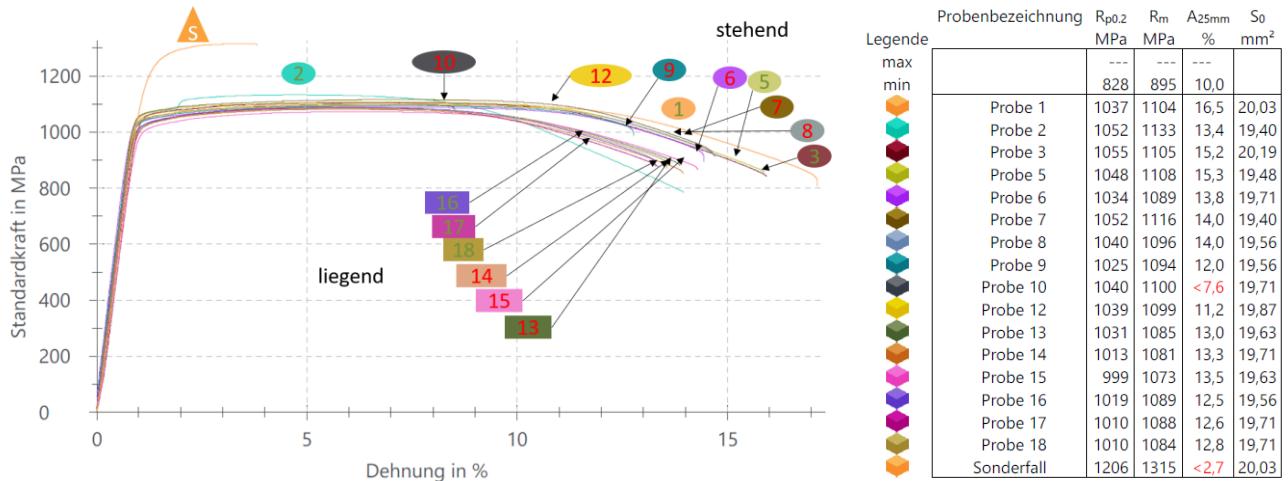


Abbildung 9: Prüfergebnis des Zugversuches nach DIN EN ISO 6892-1

In Abbildung 10 ist die Bruchdehnung der Proben in Abhängigkeit von der Porendichte dargestellt. Um die Porendichte zu bestimmen wurden im rekonstruierten Volumen die Poren in Volume Graphics segmentiert und das Verhältnis des Volumens aller Poren zum Gesamtvolumen der Probe gebildet. Die Porendichte wurde außerdem noch lokal in einem definierten Bereich um die Bruchstelle berechnet. Es ist zu erkennen, dass die suboptimal gedruckten Proben eine lokale und globale geringere Porendichte aufweisen als die optimal gedruckten Proben. Weiterhin ist auffällig, dass Probe 10, die eine deutlich geringere Bruchdehnung hat als alle anderen Proben, auch eine auffällig höhere lokale Porendichte hat im Vergleich zu ihrer globalen Porendichte. Ansonsten ist kein eindeutiger Trend bzw. eine eindeutige Abhängigkeit zwischen Porendichte und Bruchdehnung festzustellen, einzig das Verhältnis aus lokaler zu globaler Porendichte scheint einen leicht linearen Trend zu haben.

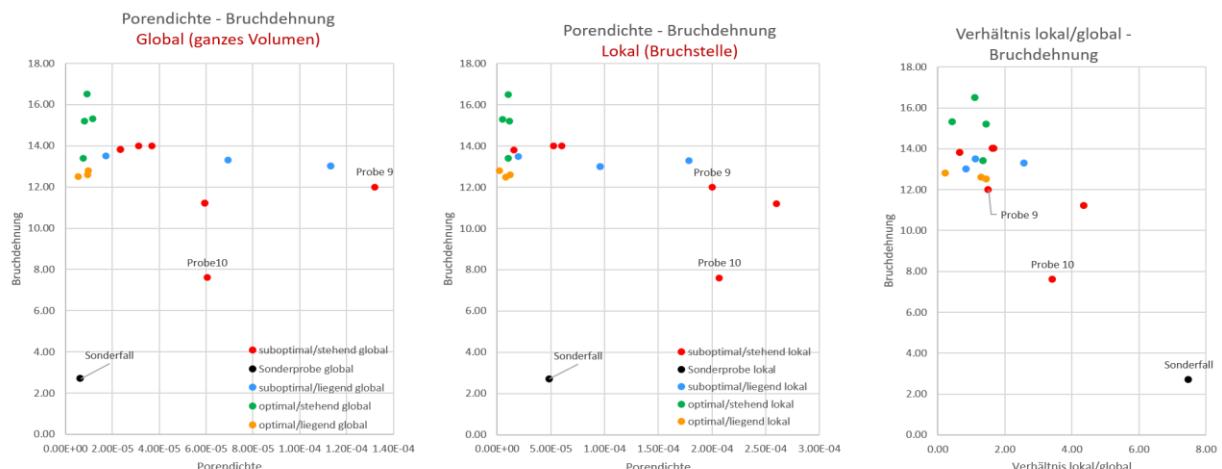


Abbildung 10: Analyse der globalen und lokalen Porendichte in Abhängigkeit von der Bruchdehnung

Da die Analyse der Porendichte allein keinen eindeutigen Zusammenhang mit den Materialeigenschaften zeigt, wurden zusätzlich die Bereiche, in denen der Riss aufgetreten ist auf Cluster von Poren oder andere Auffälligkeiten untersucht. Die Proben wurden dazu einmal vor den Zugversuch mittels µCT gescannt und zusätzlich noch einmal nach dem Zugversuch. Eine präzise, automatische Registrierung ist aufgrund der Verformung durch den Zugversuch nicht möglich. Die beiden Volumina wurden daher manuell, basierend auf markanten Poren und Porencluster zueinander

ausgerichtet wie in Abbildung 11 zu sehen ist. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass sich die Poren im Rissbereich vergrößert und teilweise zusammengeschlossen haben. Auch linienförmige Cluster waren häufig im Rissbereich zu finden. Diese Cluster wurden mithilfe eines eigens implementierten Algorithmus auf ihre Häufigkeit, Länge und ihren Abstand zur Oberfläche untersucht. Hier wurden bei Probe 10 (wie im rot markierten Bereich in Abbildung 11 zu sehen) und der Sonderfallprobe, die beide eine niedrigere Bruchdehnung aufweisen, Porencluster mit deutlich geringem Abstand zum Rand in der Rissregion gefunden, im Vergleich zu den anderen Proben. Aufgrund der geringen Probenanzahl konnte allerdings keine statistisch zuverlässige Aussage über eine Abhängigkeit von Clusterhäufigkeit oder Clusterlänge mit den Materialeigenschaften getroffen werden.

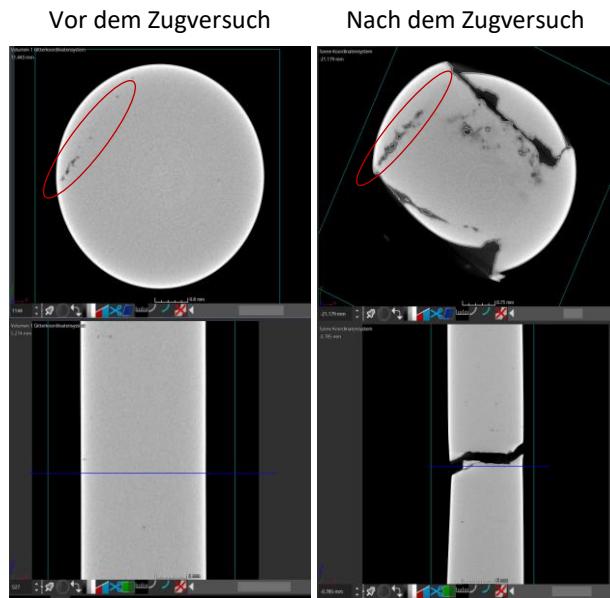


Abbildung 11: Volumen der Probe 10 vor (links) und nach (rechts) dem Zugversuch.

Dennoch haben die Versuche an den Zugproben gezeigt, dass nicht nur die absolute Größe einzelner Poren oder die Porendichte in einer Probe einen Einfluss auf Materialeigenschaften haben, sondern vielmehr auch Porencluster und vor allen deren Lage in Betracht gezogen werden müssen.

1.1.4 Baujob 4: Auswertung geeigneter Marker für den Registrierungsprozess

Dieser Baujob bestand aus zehn zylinderförmigen Proben die mit verschiedenen Markern versehen wurden. Anhand dieses Baujobs wurde festgestellt welche Marker am besten für eine erfolgreiche Registrierung in VG Studio Max geeignet sind. Zwischen dem originalen CAD-Modell und dem rekonstruierten CT-Volumen des gedruckten Objektes kann ein Unterschied festgestellt werden der zum Beispiel auf schrumpfen der gedruckten Probe während des Abkühlungsprozess zurückzuführen sein könnte. Da die genaue Position der Defekte zurückführbar sein muss auf die theoretischen Positionen im originalen CAD-Modell, ist die Registrierung des CT-Volumen auf das CAD-Modell von entscheidender Bedeutung. Eine eindeutige Registrierung ist jedoch bei symmetrischen Bauteilen nicht möglich, weshalb verschiedene Marker getestet wurden um die Eindeutigkeit zu gewährleisten. Marker waren entweder gedruckte Erweiterungen oder Aussparungen in der Titanprobe. Für diese Auswertung wurde ausschließlich eine rigide Transformation verwendet.

Es stellte sich heraus, dass gedruckte sowie ausgesparte Kalotten (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) für die Registrierung ungeeignet waren, da die Größe der Kalotten zu klein gewählt wurde, um ein geeignetes Geometrieelement an diese anzupassen. Außerdem ist der Einfluss dieser Aussparungen auf den Druckprozess unbekannt. Zylinderförmige Marker wie sie zum Beispiel in Abbildung 4 zu erkennen sind, können besser durch zylinderförmige Geometrieelemente gefüllt werden. Jedoch hat sich herausgestellt, dass insbesondere längere Zylinder beim Druckprozess in ihrer Achse verkippen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), wodurch die Registrierung anhand dieser Marker nicht geeignet ist. Dieser Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verwendung von Markern bei symmetrischen Bauteilen unabdingbar ist. Marker die an der Oberfläche der Proben angebracht sind, sind außerdem besser geeignet als innenliegende Marker. Da Ziel des Projektes die Untersuchung der Druckeigenschaften ist, sollten außerdem Marker gewählt werden, die

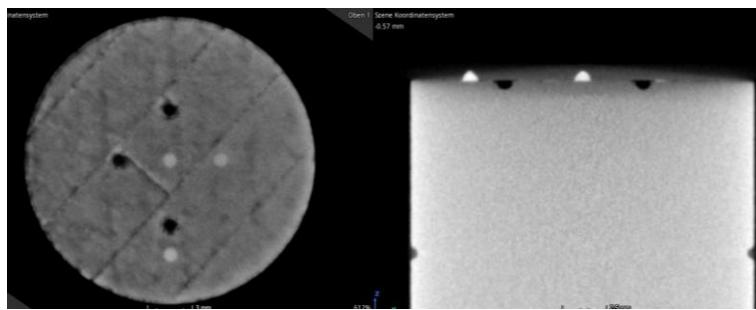


Abbildung 13: Rekonstruiertes μ CT-Volumen der 3D gedruckten Probe mit Kalotten als Marker

nur einen geringen Einfluss auf die Qualität des Drucks haben.

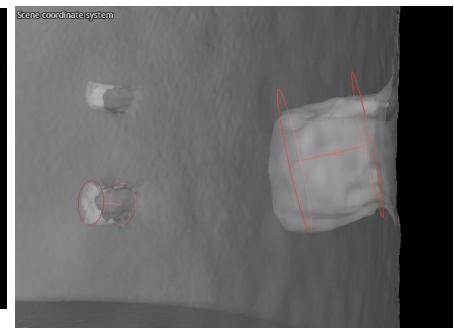


Abbildung 12: Rekonstruiertes μ CT-Volumen der 3D gedruckten Probe mit zylinderförmigen Markern und gefüllten Geometrieelementen

1.1.5 Baujob 5: Porenanalyse und nicht-regide Registrierung des μ CT-Volumen der gedruckten Probe auf das originale CAD-Modell

Baujob 5 besteht aus 18 zylinderförmigen Ti6Al-4V Zugproben, die sich zusammen setzen aus sechs vertikal, sechs horizontal und sechs diagonal gedruckten Proben. Anhand dieser Proben wurde die Registrierung die schon im vorherigen Baujob getestet wurde, weiter ausgeführt und verbessert. Da bei der Probe durch den Druckprozess Abweichungen in der Geometrie zu dem originalen CAD-Modell entstehen, welche nicht durch eine rigide Transformation wie Skalierung oder Rotation dargestellt werden können, wurde diesmal auch eine nicht-regide Transformation durchgeführt, wodurch die Abweichungen zwischen CAD-Modell und dem rekonstruierten gedruckten Volumen besser berücksichtigt werden konnten. Da es sich um eine symmetrische Probe handelt, wurden Marker auf eine Oberfläche der Probe gedruckt, was sich wie im vorherigen Abschnitt erläutert, als sinnvoll herausgestellt hat. Um die Defekte im Objekt zu klassifizieren wurde zunächst eine Porenanalyse durchgeführt. Das Volumen sowie die Poren wurden in ein Oberflächennetz (Mesh) überführt.

Die beiden Netze wurden zu einem Mesh kombiniert und dieses wiederum wurde auf das CAD-Modell registriert. Die Umwandlung in ein Oberflächennetz ist nötig, da die nicht-regide Transformation nur auf einem Oberflächennetz und nicht auf dem μ CT-Volumen selbst funktioniert. Im Laufe dieses Arbeitsauftrages wurde die Pipeline sowie die Parametereinstellungen für die nicht-regide Transformation optimiert. Damit die Oberflächennetze aufeinander registriert werden können, war es wichtig diese vorab zu vereinfachen sowie Ausreißer oder Lücken zu entfernen.

In Abbildung 14 ist eine Schnittebene des rekonstruierten Volumens der gedruckten Probe dargestellt. Außerdem ist in dunkelgrün das zugehörige Oberflächennetz sowie in rosa das Ergebnis der nicht-

regiden Transformation dieses Netzes dargestellt, wobei das originale CAD-Modell der Probe als Referenzobjekt diente. Das Oberflächennetz der registrierten Poren sowie der registrierten Oberfläche wurde den Projektpartnern als Datenbasis zu Verfügung gestellt.

1.1.6 Baujob 6/7: Porenanalyse und nicht-regide Registrierung des μ CT-Volumen der gedruckten Probe auf das originale CAD-Modell



Abbildung 14: Rekonstruiertes μ CT-Volumen der 3D gedruckten Probe mit erzeugtem Mesh (dunkel grün) und auf das CAD-Modell registrierte Mesh (rosa).

Baujob 6 besteht aus insgesamt 73 Ti6Al-4V Würfeltürmen, die jeweils aus drei oder vier aufeinander gesetzten Würfeln bestanden. Diese Türme wurde ebenfalls für den im vorherigen Abschnitt beschriebenen Registrierungsprozess verwendet. Als Referenz dienten die CAD-Modelle der einzelnen Würfel (siehe Abbildung 15 a). Dies stellte für die Registrierung eine besondere Herausforderung dar, da man vorab die einzelnen Würfel aus dem rekonstruierten Würfelturm herausschneiden musste. Insbesondere wies der untere Würfel durch den Druckprozess eine Fehlstelle auf, was die nicht-regide Transformation stark beeinflusst (siehe Abbildung 15 c). Durch dieses Arbeitspaket wurde die Erkenntnis erlangt, dass das originale CAD-Modell zu dem gedruckten Modell passen muss, ohne die Notwendigkeit das Oberflächennetz des rekonstruierten Volumens manipulieren zu müssen, um eine gute Registrierung zu vollziehen.

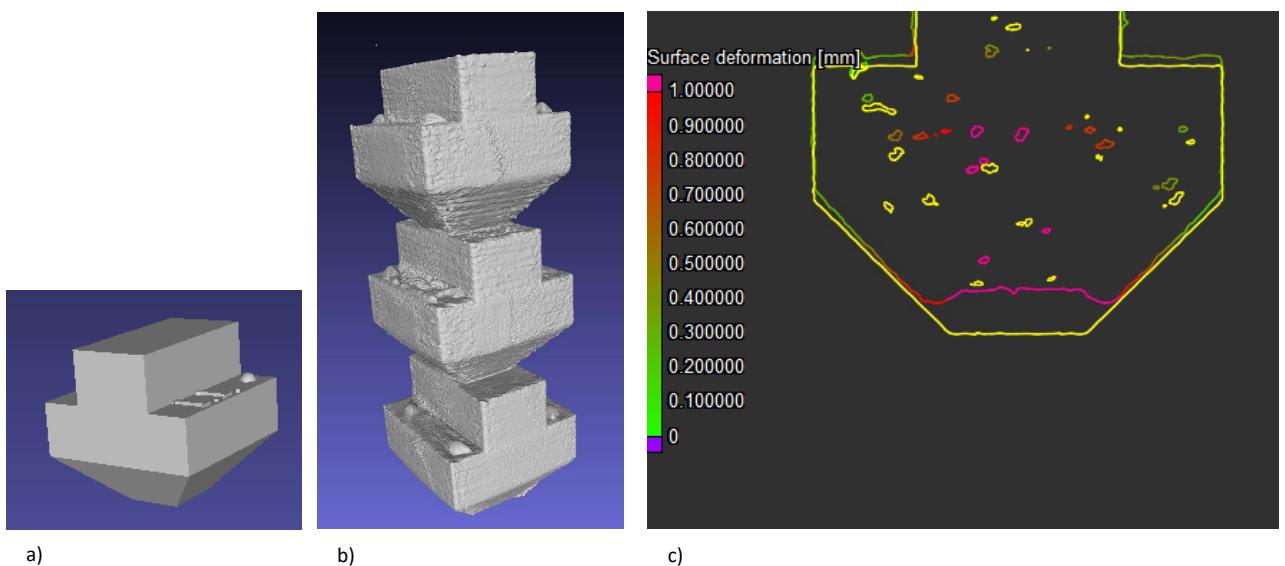


Abbildung 15: Registrierung der Würfeltürme. a) Originales CAD-Modell. b) Aus dem rekonstruierten Volumen des gedruckten Würfelturm erzeugtes Oberflächennetz. c) Nötige Oberflächendeformation des rekonstruierten μ CT-Volumen (bunt) für eine Registrierung auf das originale CAD-Modell.

Baujob 7 bestand aus 18 Ti6Al-4V Zugproben, wie schon bei Baujob 3 erläutert, sollen diese Zugproben dem Zweck die mechanischen Kennwerte in einem Zugversuch zu bestimmen dienen. Die Proben wurden ebenfalls gescannt und eine Porenanalyse durchgeführt.

Die Oberflächennetze der Poren und des äußeren Materials wurde den Projektpartnern für weitere Zugversuche zu Verfügung gestellt. Anders als bei Baujob 5 und 6 wurden diese Daten nur mit einer regiden Transformation aufbereitet. Es wurden nur die Poren im mittleren Bereich der Probe beachtet da diese für die Zugversuche am relevantesten sind.

1.2 Optimierung von μ CT-Einstellungen

Unabhängig von den einzelnen Baujobs war Ziel dieses Teilverhabens die μ CT-Untersuchung zu optimieren, um einerseits die als kritisch identifizierten Bereich zerstörungsfrei lokal prüfen zu können (Region of Interest (ROI)- Scan), um Zeit, Kosten und Energie bei der Qualitätssicherung zu sparen. Andererseits sollte durch die Optimierung und die Entwicklung eines geeigneten Manipulators die Durchstrahlung der Probe aus unterschiedlichen Richtungen, über den klassischen zirkularen Scan hinaus, ermöglicht werden, um eine sichere Detektion von LoF-Defekten zu gewährleisten.

Um beides zu erreichen, wurde in diesem Teilverhaben ein Industrieroboter (ABB, IRB2600) zur Manipulation der Bauteile verwendet. Der Roboter wurde in demselben Bunker-System wie bereits in Abschnitt 1.1 beschrieben, betrieben. Um eine gezielte Region lokal im Bauteil zu prüfen, musste zunächst eine geeignete Trajektorie basierend auf dem Modell des Bauteils und der Koordinaten eben jener Region gefunden werden

1.2.1 Digitaler Zwilling des Roboter-CT-Systems

Ein digitaler Zwilling des Systems (siehe Abbildung 16) wird für die Trajektorienplanung verwendet. Es wird die gleiche Steuerungs- und Analyse-Software, d.h. die grafische Benutzeroberfläche (GUI), wie im realen System verwendet. Daher wird der Bediener keinen Unterschied feststellen, wenn er mit dem echten System oder dem digitalen Zwilling interagiert. Für den digitalen Zwilling werden die Zustände der Röntgenquelle, des Roboters als Manipulator, der additiv hergestellten Komponente und des Detektors im Hintergrund simuliert. Simulationen der Röntgenbildgebungskette werden unter Verwendung von BAM's aRTist durchgeführt [17], was es ermöglicht, realistische Bilder softwarebasiert zu erstellen.

Unter Verwendung des digitalen Zwillings mit seinem Modell des Systems, einschließlich des zu scannenden Teils, wird ein Basis-Set von Betrachtungsrichtungen erzeugt (z.B. eine gleichmäßig abgetastete Kugeloberfläche). Der Roboterarm darf nicht durchdrungen werden und Kollisionen sollten vermieden werden, daher wird eine spezifische Teilmenge von Betrachtungsrichtungen ausgeschlossen. Aus dem Rest wird eine Reihe von Bildern simuliert, aus denen automatisch die optimale Trajektorie berechnet wird. Die gefundene Trajektorie kann in der Simulation überprüft werden, bevor sie dann verwendet wird, um das Objekt im echten System zu scannen.

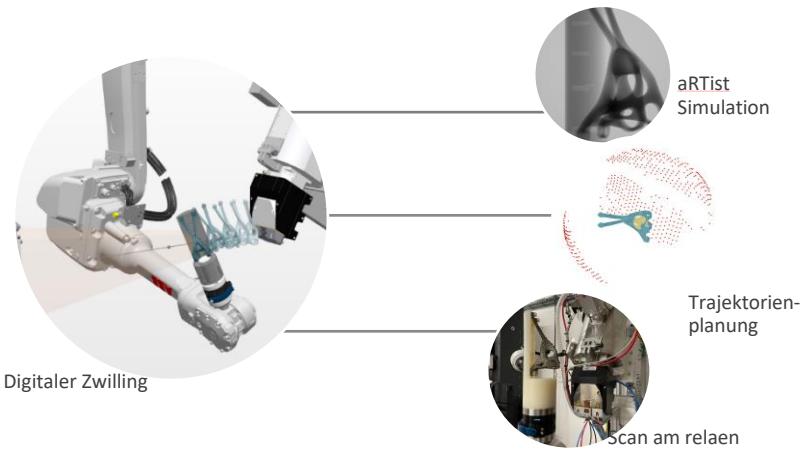
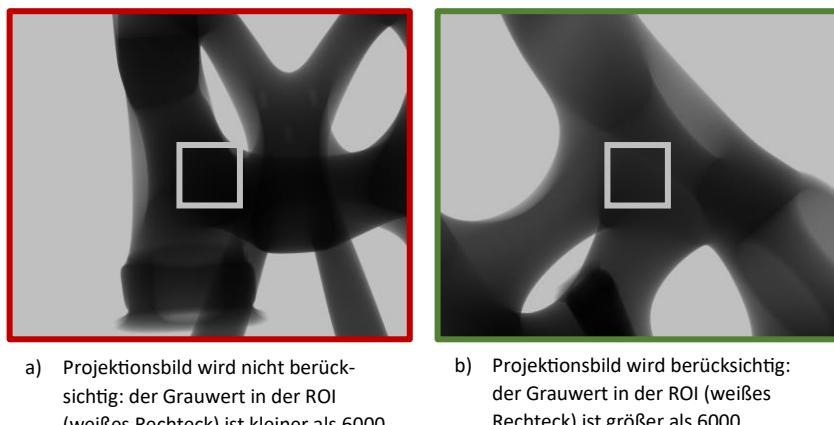


Abbildung 16: Visualisierung des digitalen Zwillinges.

1.2.2 Trajektorienplanung

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die ROI-CT (Region of Interest-Computertomographie) nur auf einigen Regionen der AM-Komponente durchzuführen, in denen das Monitoringsystem des 3D-Druckers potenzielle Defekte wie Poren, Einschlüsse oder LoFs erkannt hat. Insbesondere LoFs sind schwer zu erkennen, je dicker das Material ist. Daher werden die Projektionsrichtungen ausgewählt, die aufgrund der Bauteilgeometrie die geringste Abschwächung aufweisen. Darüber hinaus werden nur optimale Projektionen ausgewählt, um eine maximale Datenkomplettierung für die Rekonstruktion zu gewährleisten, indem eine erweiterte Tuy-Bedingung angewendet wird, die mittels einer lokalen und quantitativen Beschreibung der Vollständigkeit der Projektionsdaten erfolgt.

Ähnlich dem von Herl et al. vorgeschlagenen Algorithmus [18] wird ein objektunabhängiges Tuy-basiertes Maß für die Datenkomplettierung mit einer bildbasierten Abschwächungsbewertung kombiniert. Das Tuy-basierte Maß beschreibt den Winkelabstand jeder Betrachtungsrichtung zum nächsten Normalenvektor einer gültigen Radon-Ebene. In jedem Optimierungsschritt wird aus einem Basisset von Projektionsrichtungen jene Betrachtungsrichtung ausgewählt, die das durchschnittliche gemeinsame Tuy-Kriterium für die aktuelle Trajektorie am meisten optimiert. Hier wird eine gewünschte Iterationsanzahl als Abbruchkriterium gewählt. Ein definierter Wert für das Tuy-Kriterium wäre ebenfalls möglich.



a) Projektionsbild wird nicht berücksichtigt: der Grauwert in der ROI (weißes Rechteck) ist kleiner als 6000

b) Projektionsbild wird berücksichtigt: der Grauwert in der ROI (weißes Rechteck) ist größer als 6000

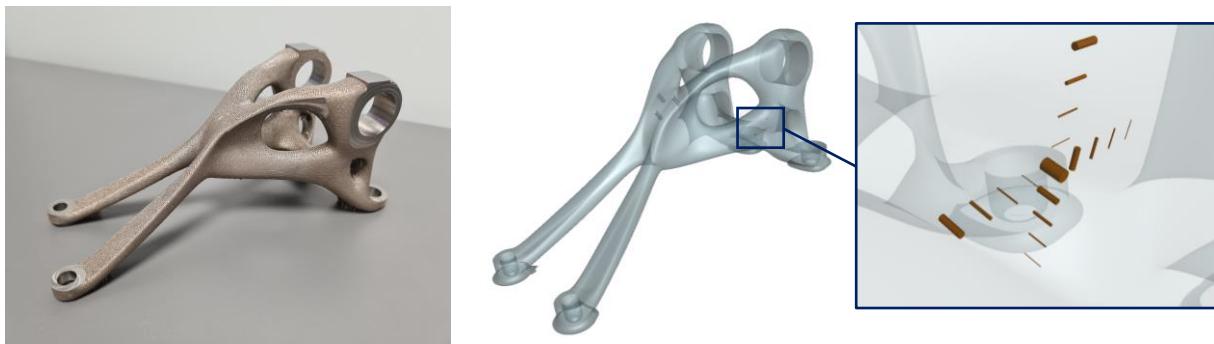
Abbildung 17: Beispielprojektionsbilder zur Visualisierung der bildbasierten Abschwächungsbewertung.

Darüber hinaus werden in dieser Optimierung nur Projektionsrichtungen berücksichtigt, die nützliche Informationen beitragen, was wie folgt festgestellt wird: Im simulierten Projektionsbild wird eine Region um jeden projizierten ROI-Voxel definiert, in der überprüft wird, ob die Intensität jedes Pixels kleiner ist als der erlaubte Mindestintensitätswert. In diesem Fall ist die durchstrahlte Länge im Bauteil zu groß und damit Abschwächung zu stark und das Projektionsbild wird nicht in Betracht gezogen, da

es keine sinnvollen Informationen hinzufügt. Zwei Beispielprojektionsbilder sind in Abbildung 17 gezeigt.

1.2.3 Simulationsstudie

Für eine erste Bewertung des Planungstools werden simulierte Daten verwendet. In einem Modell eines echten Titanlegierungs-AM-Bauteils sind eine Reihe luftgefüllter Zylinder eingebaut, um Defekte zu imitieren, wie sie in Abbildung 2 zu sehen sind. Die Zylinder sind in orthogonale Gruppen orientiert, sie haben jeweils eine Höhe von 1,2 mm und einen variierenden Durchmesser von 40 bis 640 μm . Das Bauteil selbst hat ungefähr die folgenden Abmessungen: 158 x 59 x 68 mm. Für die Simulation wird das CT-System so genau wie möglich dem realen System nachgebildet, wie zu Beginn von Kapitel 1.1 beschrieben. Ein Fokus-Objekt-Abstand (FOD) von 210,4 mm wurde gewählt, um eine Voxelgröße von 20 μm zu erreichen, unter Berücksichtigung eines festen Fokus-Detektor-Abstands (FDD) des Systems von 1052 mm. Aufgrund der willkürlichen Trajektorien werden Volumina mithilfe der Standardmethode der simultanen algebraischen Rekonstruktionstechnik (Basic-ART) der Cera API (Siemens Healthcare GmbH) rekonstruiert.



a) Foto von einem AM-Teil aus Titanlegierung

b) Oberflächenmodell des Teils mit künstlichen Defekten

Abbildung 18: Oberflächenmodell, das in der Simulation verwendet wird, neben dem echten AM-Teil.

1.2.4 Ergebnisse der Simulationsstudie

Es werden eine zirkuläre und zwei gleichmäßig sphärische Trajektorien für zwei verschiedene ROI am zuvor beschriebenen komplexen Bauteil mit jeweils 4000 Projektionen als Referenz simuliert. Die Trajektorien sind in Abbildung 19 (a, b und d) visualisiert. Von den 4000 Projektionen werden die optimalen 500 für die beiden ROIs ausgewählt. Die Position der ROIs ist in Abbildung 19 als gelbe Kugel dargestellt, obwohl die tatsächliche ROI ein rechteckiges Gebiet mit Abmessungen von 12 x 12 x 12 mm ist. Abbildung 19 verdeutlicht für zwei verschiedene ROIs, dass die Lage der ROI aufgrund der komplexen Form des Objekts einen großen Einfluss auf die optimale Trajektorie hat. In Abbildung 20 sind Schnittebenen der rekonstruierten ROI-Volumina dargestellt, die sich auf die künstlichen eingebrachten Zylinder konzentrieren. Sowohl für die zirkuläre als auch für die gleichmäßig sphärische Trajektorie wird die Sichtbarkeit und Schärfe insbesondere des kleinsten Zylinders drastisch reduziert, wenn anstelle aller 4000 Projektionen nur 500 verwendet werden. Bei Verwendung der optimierten Trajektorien an beiden verschiedenen Stellen wird die Sichtbarkeit und Schärfe des kleinsten Zylinders im Vergleich zu den Referenz-Trajektorien mit derselben Anzahl von Projektionen verbessert. Die Rekonstruktion unter Verwendung der optimierten Trajektorie der ersten ROI zeigt einige Artefakte, insbesondere an den Seiten der Zylinder und zwischen ihnen. Diese Artefakte sind für die zweite ROI nicht sichtbar (vergleiche **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** c und e). Die Trajektorie (in Abbildung 19 c) zeigt, dass die Projektionsbilder hauptsächlich aus drei Richtungen aufgenommen werden, was nicht ausreicht für eine artefaktfreie Rekonstruktion.

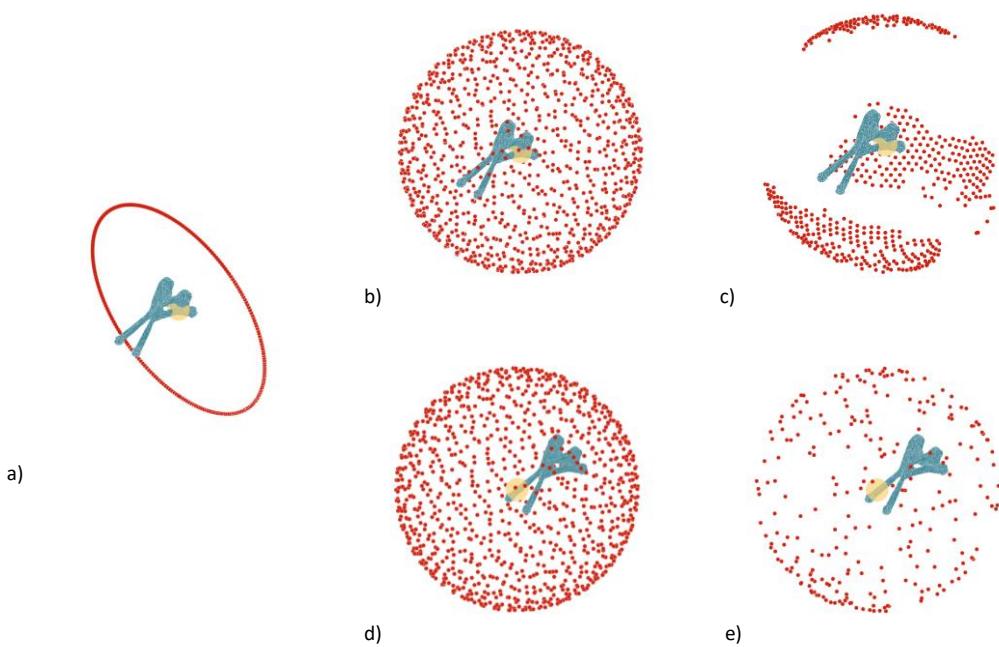


Abbildung 19: Visualisierung der Trajektorie der Röntgenquelle (in Rot) um ein komplexes Teil (in Blau) für eine spezifizierte ROI (gelber Bereich). Für eine standardmäßige zirkuläre Trajektorie (a), eine gleichmäßig sphärische Trajektorie (b) sowie optimale Trajektorie für die zweite ROI (d und e).

In diesem Fall könnten die für die Optimierung verwendeten Parameter angepasst werden, um einen besseren Kompromiss zwischen Datenkomplettierung und Abschwächungsbewertung zu finden. Die sichtbaren streifenartigen Artefakte in Abbildung 20 werden nicht durch unzureichende Datenkomplettierung verursacht, sondern sind eine Nebenwirkung der algebraischen Rekonstruktion, wenn nur ein Teil des Objekts rekonstruiert wird. Die Artefakte verschwinden, wenn das gesamte Volumen des Objekts rekonstruiert wird. In der aktuellen Implementierung des ART-Algorithmus muss das komplette Volumen mindestens zweimal in den RAM-Speicher passen, um rekonstruiert zu werden, was die erreichbare Auflösung begrenzt. Hier wurde ein Kompromiss gewählt, um eine Visualisierung des kleinsten Zylinders mit einer Voxelgröße von $40 \mu\text{m}$ zu gewährleisten, während gleichzeitig ein ausreichend großes Volumen gewählt wurde, um die streifenartigen Artefakte auf ein Minimum zu beschränken.

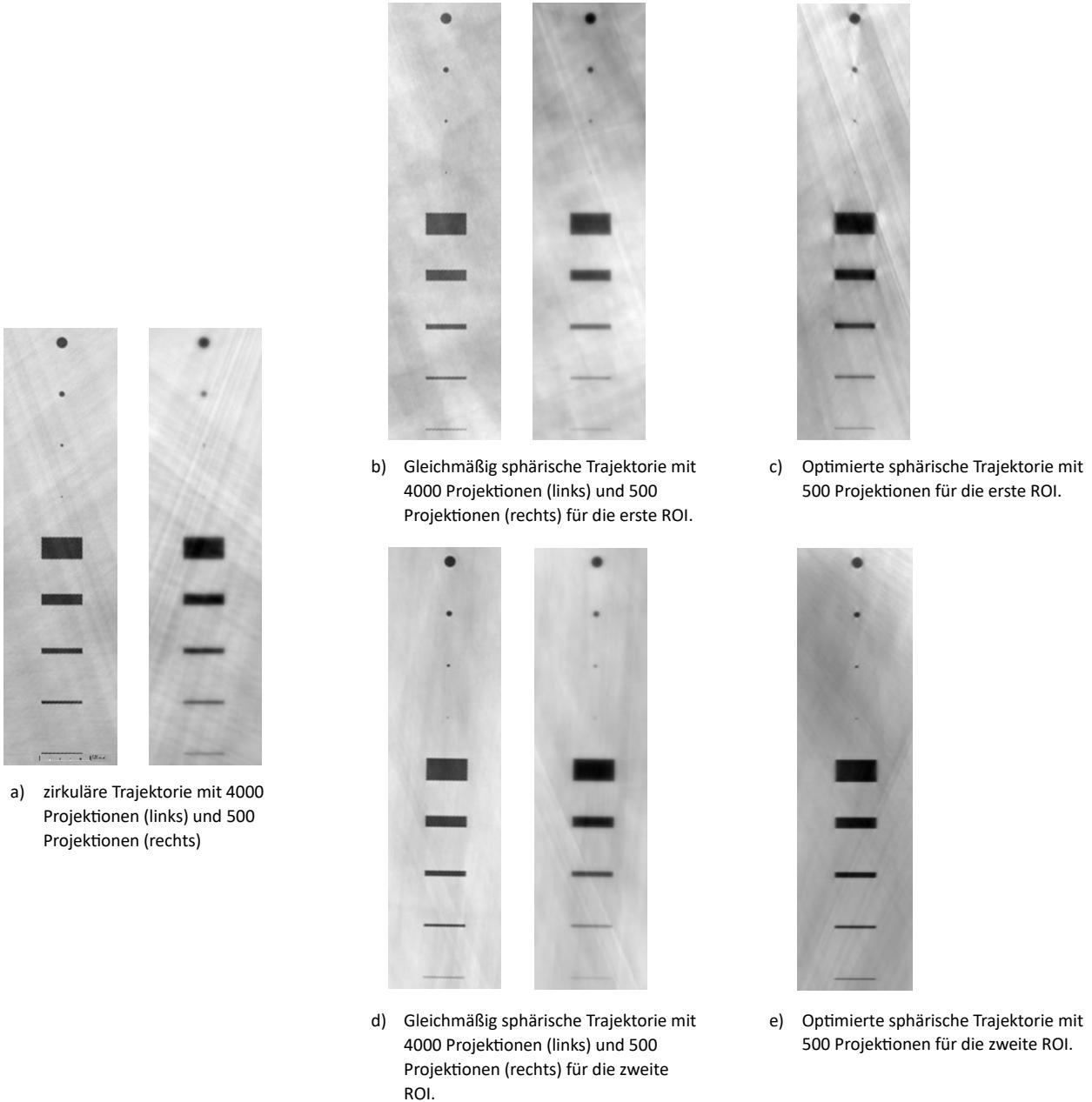
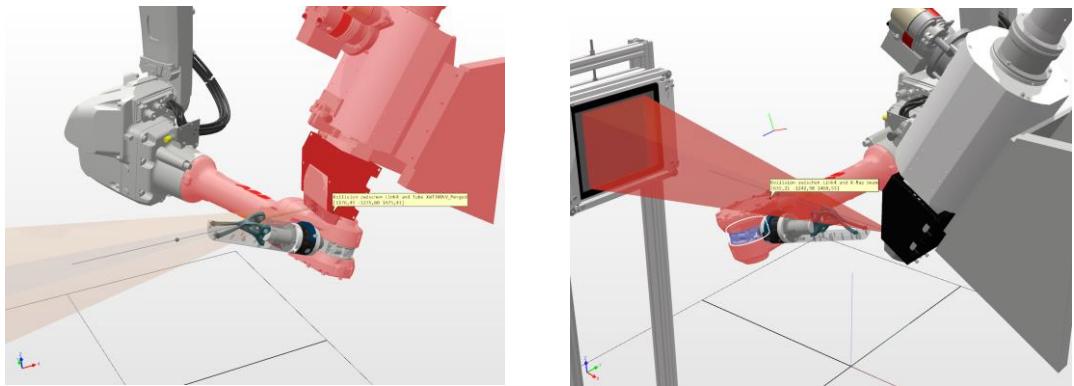


Abbildung 20: Für jede Trajektorie wird die Schnittebene des rekonstruierten Volumens an der spezifizierten ROI gezeigt. Für die kreisförmige (a) und gleichmäßig sphärische (b und d) Trajektorie werden Volumina mit 4000 Projektionsbildern (links) bzw. 500 Projektionsbildern (rechts) rekonstruiert. Die optimalen 500 Projektionen werden jeweils für jede ROI von Abbildung 19 verwendet (c und e).

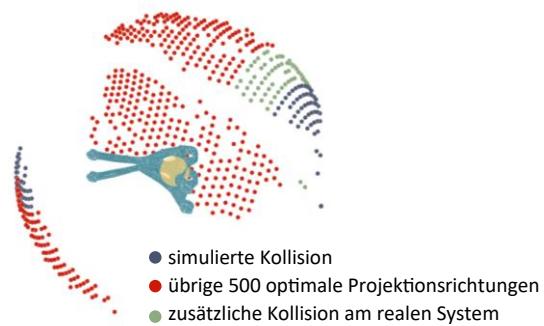
1.2.5 Adaption ans reale System

Für alle bisherigen Simulationen wurde nur das isolierte Objekt betrachtet. Für die Adaption der in der Simulation gefunden optimalen Trajektorien müssen aber auch die Objekthalterung und die Positionierung des Roboters im Verhältnis zur Röntgenquelle und zum Detektor berücksichtigt werden. Zum einen um Kollisionen zu vermeiden (siehe Abbildung 21 a) und zum anderen, um zu verhindern, dass der Roboterarm den Strahlengang blockiert (siehe Abbildung 21 b). Zur Überprüfung beider Szenarien wurde erneut der digitale Zwilling des Systems genutzt. Mithilfe der Software RobotStudio (ABB Ltd, Zürich, Schweiz) wurden halbautomatisch alle Projektionsrichtungen aus der Trajektorie entfernt, bei der es durch den Roboterarm entweder zur Kollision oder zur Obstruktion des Strahlengangs kommt. Von 784 gefunden optimalen Blickrichtungen verursachen 96 eine Kollision. Die resultierende Trajektorie der somit noch übrigen 500 optimalen Projektionsrichtungen ist in Abbildung 21 c zu sehen, wobei durch zusätzliche Sicherheitszonen im realen System weitere 60 Positionen nicht vom Roboter angefahren werden können.



a) simulierte Kollision des Roboterarm mit der Röntgenquelle

b) Simulation des durch den Roboterarm obstruierten Strahlengangs



c) Visualisierung der optimalen Trajektorie nach der Kollisionsprüfung

Abbildung 21: Veranschaulichung der Kollisionsprüfung.

Um die Qualität der Roboter CT Scans auf einer Kugeltrajektorie besser einschätzen zu können, wurden zunächst Vergleichsscans auf der zirkulären Standardtrajektorie durchgeführt. Mit dem Roboter als Bauteilmanipulator können bei flexibler Vergrößerung Volumen mit vergleichbarer Qualität rekonstruiert werden. Abbildung 22 zeigt zwei Scans, einmal mit der Standard-Rotationsachse des CT-System und einmal mit dem Roboter als Bauteilmanipulator. Die Schnittbilder beider Volumina zeigen sowohl einen vergleichbaren Kontrast und Bildschärfe, als auch eine sehr ähnliche Sichtbarkeit der Poren in der Probe.

Neben der rein qualitativen Auswertung der CT-Volumina wurden auch quantitative Messungen zur räumlichen Auflösung (MTF - Modulation Transfer Function) und Kontrastsensitivität (CDF - Contrast Discrimination Function), sowie deren Verhältnis, durchgeführt. Die Analyse wurde nach ASTM E1441/1695 in VG Studio durchgeführt. Während sich im mittel ein identisches Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis von etwa 16 ergibt, sind sowohl die räumliche Auflösung als auch die Kontrastsensitivität bei dem Scan mit dem Standard Manipulator um mehr als 24% besser. Die liegt vermutlich aber an einer nicht idealen Kalibrierung des Roboters, da zwischen diesen Scans ein Unterschied des Abstandes von Röntgenquelle und Objekt von 3 mm berechnet wurde. Dies führt zu unterschiedlichen Voxelgrößen in den resultierenden Volumina, was die Vergleichbarkeit der Scans limitiert.

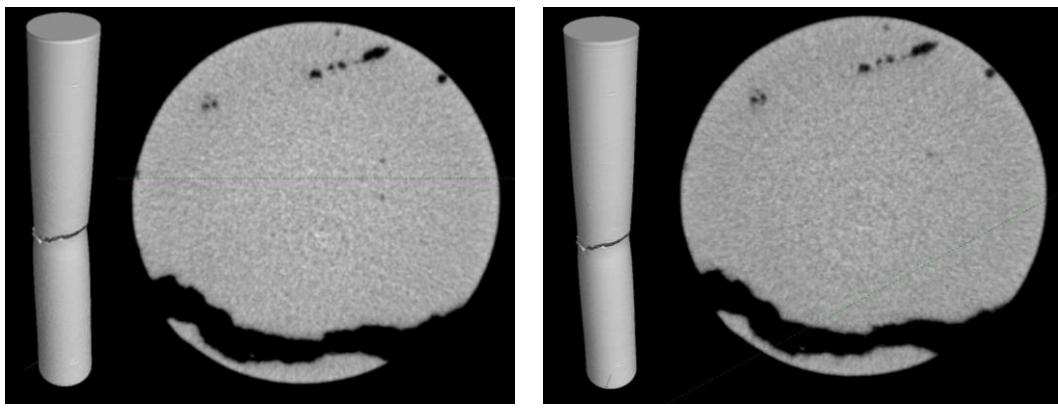


Abbildung 22: Vergleich-Scans der Standard-Rotationsachse (a) und des Roboters (b) als Bauteilmanipulator

Die Kalibrierung und Genauigkeit des Roboters sind bei den komplexeren Trajektorien von besonderer Bedeutung. Für den klassischen Kreisscan bieten die Rekonstruktionsprogramme eine robuste bildbasierte Geometriekorrektur. Diese funktioniert allerdings nicht für komplexere Trajektorien. Für diese müssen für jede Projektionsrichtung die genaue Position und Orientierung von Röntgenquelle, Detektor und Objekt in Form einer Projektionsmatrix an die Rekonstruktion übergeben werden. Da der Roboter allerdings nur eine absolute Positioniergenauigkeit von 0.2 mm erreichen kann, sind die Positionsangaben des Roboters nicht präzise genug für eine artefaktfreie Rekonstruktion.

Es kann sich aber die deutlich präzisere Wiederholgenauigkeit von 0.02 mm und ein Kalibrierscan zu nutzte gemacht werden. In dem Kalibrierscan wird mit einem bekannten Phantom (Beispiel in Abbildung 23) die gleiche Trajektorie abgefahren, die im zweiten Scan auch für das Objekt benutzt werden soll. Mit Hilfe des Phantoms kann in jeder Projektionsrichtung die Position des Objektes bestimmt werden und dann für eine korrekte Rekonstruktion des eigentlichen Objektes benutzt werden. Diese Methode des Phantom based alignment (PBA) wird in der API von Siemens Cera angeboten und ist in Abbildung 23 veranschaulicht.

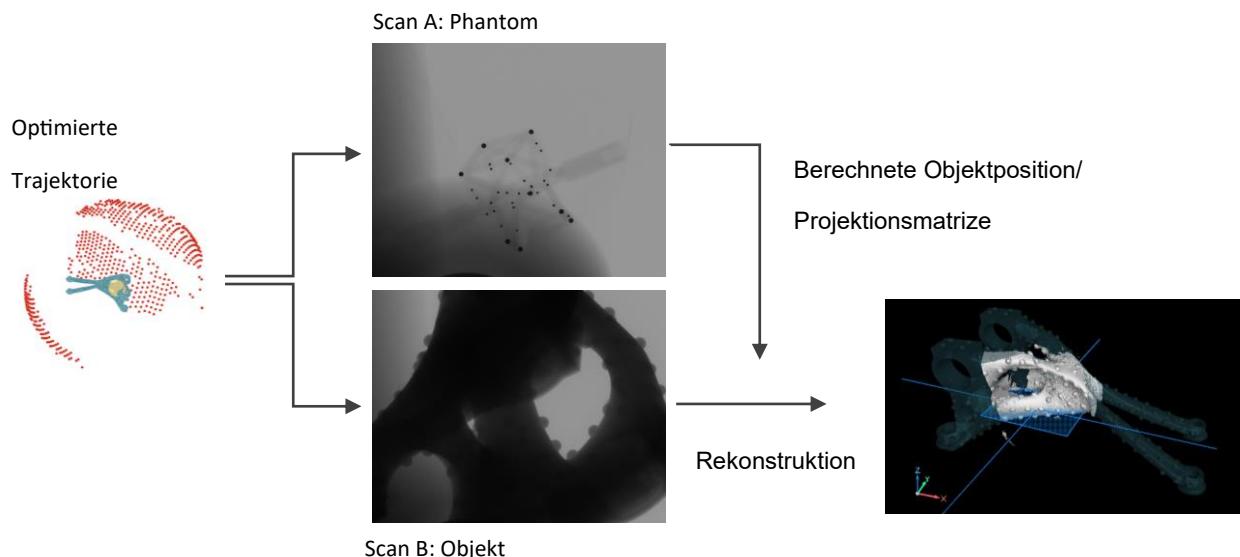


Abbildung 23: Visualisierung der Rekonstruktion komplexer Trajektorien mithilfe des Phantom based alignments (PBA)

Abbildung 24 zeigt das Ergebnis der Rekonstruktion. Zum Vergleich ist ebenfalls die kreisförmige Trajektorie mit deutlich mehr Projektionsbildern gezeigt. Den Volumen ist außerdem das CAD-Modell des Objektes in blau überlagert. Mit der optimierten kreisförmigen Trajektorie lässt sich das Objekt geometrisch korrekt rekonstruieren, wobei deutlich weniger Projektionen im Vergleich zum Standard-

Verfahren benötigt werden. Wie bereits beschrieben, limitiert die Hardware die Größe des rekonstruierten Volumens im Zusammenhang mit der Voxelgröße. Das heißt je feiner aufgelöst das Volumen ist, umso kleiner wird das gesamte Volumen, wodurch sich die Streifenartefakte der iterativen Rekonstruktion verstärken.

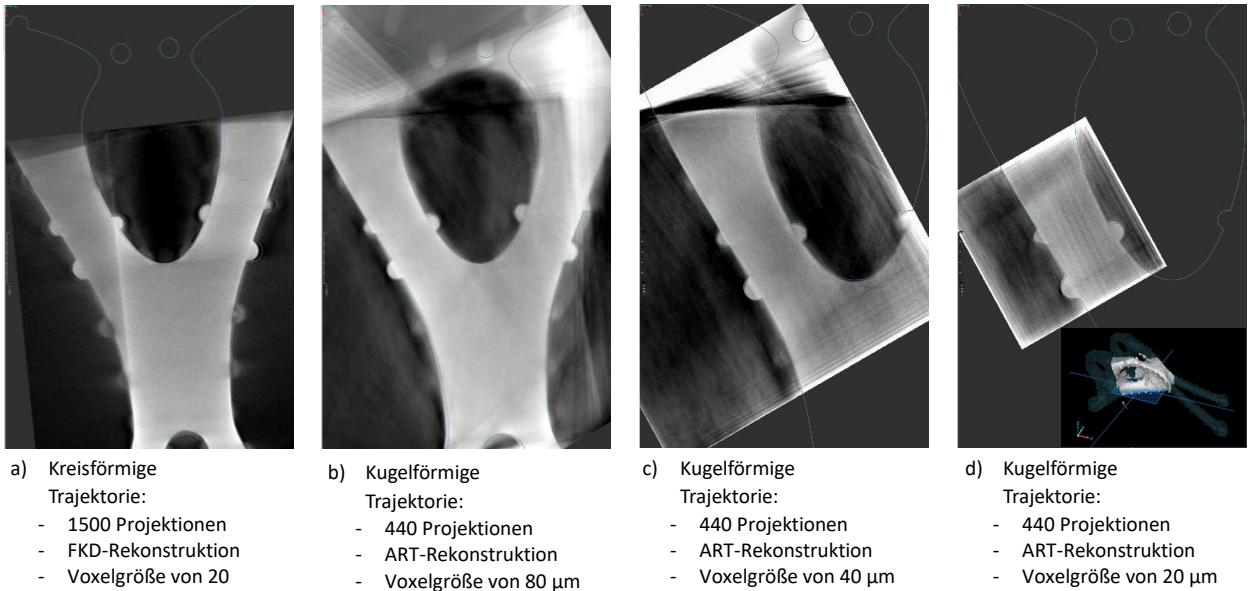


Abbildung 24: Schnitte des rekonstruierten Volumens bei unterschiedlicher Auflösung.

Teile aus diesem Arbeitspaket wurden bereits veröffentlicht [2,6-8].

2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleistete Arbeit entspricht den im Projektantrag dargestellten Teilvorhaben.

Zur Erreichung des Ziels des Gesamtvorhabens war es erforderlich die ROI basierte µCT zu entwickeln und die Detektion von Fehlern, insbesondere LoF, zu optimieren. Der Ansatz ist absolut neuartig und erforderte daher viel Entwicklungsarbeit, um eine zufrieden stellende Evaluierung zu ermöglichen.

3. Voraussichtlicher Nutzen

Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde ein vollständiges Roboter CT entwickelt und implementiert. Dieser Aufbau legt einen fundamentalen Grundstein für die weitere Entwicklung und Forschung an der Trajektorien Optimierung. Mit dem Aufbau konnten die µCT-Aufnahmen der 3D gedruckten Proben erfolgreich aufgenommen und anschließend rekonstruiert werden. Im Rahmen der Datenaufbereitung konnten umfassende Erkenntnisse in der richtigen Parameterwahl für die Porenanalyse sowie der Registrierung erlangt werden.

Der Nutzen der Prüftechnologie liegt in den folgenden Bereichen:

- Absicherung von 3D-gedruckten Bauteileigenschaften
- Somit wird die Einsatzfähigkeit von 3D-Druck Bauteilen in kritischen und sicherheitsrelevanten Anwendungen ermöglicht
- Eine zeit- und kosteneffizientere Bauteilprüfung mithilfe der Prüfmethodik gegenüber dem Stand der Technik

Die konkreten nächsten Schritte sind wie folgt:

- Eine Patenmeldung ist derzeit geplant, in dem die Verfahren der Antragsteller als Kombination angemeldet werden
- Die Standardisierung wird aktuell weiter vorbereitet und demnächst initiiert
- Gespräche mit interessierten Kunden werden derzeit durchgeführt
- Weitere F&E Projekte sind derzeit in der Antragstellung

Der Verwertungsplan wird trotz Einschränkungen (s.u.) wie geplant und wie folgt durchgeführt:

Verwertbares Ergebnis	Notwendige weitere Entwicklung nach Projekt	Zeithorizont
Effiziente Prüfmethode für bionische 3D-Druck Bauteile	Standardisierung der Methode / Erweiterung der statistischen Grundlage	1-2 Jahre
Verbesserte µCT-Technologie für bionische 3D-gedruckte Bauteile	Entwicklung von Software zur automatisierten Messprozess-Steuerung (auf Basis der Monitoring-Daten)	1-2 Jahre

Das Prozessmonitoring konnte nicht als ausreichend leistungsfähig verifiziert werden. Dieser Teil der wissenschaftlichen Arbeiten ist somit bisher nicht erfolgreich. Die wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten nach Projektende sind jedoch weiterhin gut, da dieser Teil der Prüfmethodik die zu untersuchenden Prüfobjekte bestimmt und eingrenzt, die Prüfmethode aber auch ohne das Prozessmonitoring angewendet werden kann. Ein leistungsfähiges Prozessmonitoring kann im weiteren Verlauf ergänzt werden.

Es wurden keine Patentanmeldungen während der Laufzeit des Verbundprojektes von der VisiConsult X-ray Systems & Solutions GmbH durchgeführt. Es sind jedoch kurzfristig Patentanmeldungen im Jahr 2023 für eine Prüfmethodik mit u.a. der Imprintec GmbH geplant, welche aus diesem Projekt entstanden sind.

Die durchgeführten und geplanten Maßnahmen der Verwertung und Veröffentlichung sind weiterhin größtenteils unverändert und lauten wie folgt:

Maßnahme	Zeithorizont	Verantwortlich
Veröffentlichungen von Projektergebnissen auf Konferenzen und in wissenschaftlichen Journals. <u>Ziel:</u> - 5 Konferenzbeiträge - 2 Journal-Paper - 3 Messepräsentationen	Bis zu 2 Jahre nach Projektende	Imprintec, VisiConsult, IAPT
Social-Media-Aktivität (insbesondere LinkedIn) - Halbjährlicher Projektupdate über LinkedIn Kanal der Projektpartner	Während des Projektes	Imprintec, VisiConsult, IAPT
Abschluss-Event zur Präsentation der Projektergebnisse mit Stakeholdern <u>Ziel:</u> mind. 30 Gäste	Wird bis Q1 2024 durchgeführt	Imprintec, VisiConsult, IAPT
Überführung in DIN-Norm (anschließend EN / ISO)	Innerhalb von 2 Jahren nach Projektende	Imprintec, VisiConsult, IAPT, Mitglieder des pbA

Die Social-Media-Aktivitäten wurden wie geplant durchgeführt. Die Abschlusspräsentation hat zum derzeitigen Stand noch nicht stattgefunden, wird aber kurzfristig geplant und umgesetzt. Die weiteren geplanten Maßnahmen werden wie angegeben durchgeführt. Mit den beteiligten Partnern Visiconsult und Fraunhofer IAPT wird in Bezug auf die Produktentwicklung, sowie auf die geplanten Veröffentlichungen und weitere Forschungsaktivitäten wird weiterhin ebenfalls intensiv zusammengearbeitet.

4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Bezüglich der Aufgabenschwerpunkte für dieses Teilvorhaben sind keine FE-Ergebnisse von anderen Stellen bekannt geworden.

5. Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Im Rahmen des Projektes wurden die folgenden Veröffentlichungen von den folgenden Partnern durchgeführt bzw. sind noch geplant:

5.1 VisiConsult

5.1.1 Veröffentlichungen

- [1] Bliedtner, K. (2022). Optimized Detection of Critical Defects in 3D Printed Components Using μ CT. NDE 2021 - Virtual Conference & Exhibition, 09-11 Dec 2021 by Indian Society for NDT (ISNDT). e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 27(4). <https://www.ndt.net/?id=26751>
- [2] Dedyaeva, P., Krohne, K., & Herold, F. (2022). Digital Twin for Region-of-Interest Computed Tomography of Additive Manufactured Components using an Industrial Robot. 11th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2022, 8-11 Feb, Wels, Austria. e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 27(3). <https://doi.org/10.58286/26617>
- [3] Bliedtner, K., Dedyaeva, P., & Herold, F. (2022). Optimierte Detektion von kritischen Defekten in 3D-Druck Bauteilen mittels μ CT. DGZfP Jahrestagung 2022, Kassel, May, Germany. <https://www.ndt.net/?id=27086>
- [4] Bliedtner, K., Meynard, P., & Herold, F. (2022) Segmentation of Lack-of-Fusion-Defects in Additive Manufactured Components using Industrial CT. 5th International Conference on Tomography of Materials and Structures (ICTMS2022) 27. June – 1. July 2022, Grenoble France. Poster.
- [5] Bliedtner, K., Dedyaeva, P., & Herold, F. (2022). Optimized detection of lack-of-fusion defects in 3D printed components using μ CT. Transactions on Additive Manufacturing Meets Medicine, 4(S1), 642. <https://doi.org/10.18416/AMMM.2022.2209642>
- [6] Bliedtner, K., Dedyaeva, P., Krohne, K., & Herold, F. (2023). Automated Trajectory Generation for Region of Interest Computed Tomography using Industrial Robots. 12th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT) 2023, 27 February - 2 March 2023 in Fürth, Germany. e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 28(3). <https://doi.org/10.58286/27711>
- [7] Dedyaeva, P., Bliedtner, K., & Herold, F. (2023). Verifikation potentieller Defekte in kritischen Regionen von 3D-gedruckten Bauteilen mittels robotergestützter Mikro-Computertomographie. DGZfP Jahrestagung 2023, Friedrichshafen, May, Germany. <https://www.ndt.net/?id=28589>
- [8] Dedyaeva, P., Bliedtner, K., Krohne, K., & Herold, F. (2023) Digital Twin for Robot Based Computed Tomography. 13th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), 3. -7. July, Lisbon, Portugal
- [9] Bliedtner, K., Dedyaeva, P., & Herold, F. (2023). How Micro-CT improves the printing process of AM components. Transactions on Additive Manufacturing Meets Medicine, 5(S1), 819. <https://doi.org/10.18416/AMMM.2023.2309819>

5.2 Fraunhofer IAPT

5.2.1 Veröffentlichungen

[10] Darstellung der Zwischenergebnisse auf der Formnext 2022

[11] LinkedIn-Post

5.2.2 Geplante Veröffentlichungen

[12] ein weiterer LinkedIn-Post

[13] eine digitale Darstellung des Projektes auf der Formnext 2023

[14] Paper in "Additive Manufacturing"

5.3 Konsortium (Fraunhofer IAPT, VisiConsult, Imprintec)

[15] Entwurf einer ISO TS der untersuchten, kombinierten Prüfmethode

6. Externe Referenzen

[16] Lohse, L. M., Robisch, A. L., Töpperwien, M., Maretzke, S., Krenkel, M., Hagemann, J., & Salditt, T. (2020). A phase-retrieval toolbox for X-ray holography and tomography. *Journal of Synchrotron Radiation*, 27(3), 852-859.

[17] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), aRTist - Analytical RT Inspection Simulation Tool. <http://www.artist.bam.de/>, 2023 (aufgerufen 27 Oktober 2023).

[18] G. Herl, J. Hiller, and A. Maier, Scanning trajectory optimisation using a quantitative Tuybased local quality estimation for robot-based X-ray computed tomography, *Nondestructive Testing and Evaluation* 35.3 (2020): 287-303.