

diondo

X-ray systems and services

Einsatz von ZfP 4.0 in der industriellen Computertomographie
am Beispiel eines Projektes im Laserauftragsschweißen

Dr. Olaf Günnewig, Dr. Nick Brierley, Karin Chrzan, diondo GmbH

Unsere Erfahrung

Mit mehr als 25 Jahren Erfahrung ist diondo der führende Hersteller innovativer Systeme für die industrielle Computertomographie (CT) in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (zfP).

Unsere Expertise

Durch unsere CT -Scandienstleistung, die sich von Mikro CT bis Linac CT erstreckt, profitieren unsere Kunden von einem ebenso breitbandigen wie tief greifenden Applikationswissen. Dieses und ein umfangreicher, sich ständig erweiternder Baukasten aus Komponenten und Funktionsmodulen führen letztendlich zu innovativen CT - und DR-Systemen.

Unsere Kunden

Führende Automobilhersteller, Zulieferer der Automobil - und Luftfahrtindustrie, Unternehmen der Wachstumsbranchen Maschinenbau, Energie und Elektronik, additive Fertigung als auch renommierte Forschungsinstitute.





diondo dsub μ
Höchstaauflösendes
Sub-Mikro CT-System



diondo d1
Hochauflösendes Sub-
Mikro CT-System



diondo d2
Leistungsstarkes
CT-System



diondo d4
Kompaktes CT-System
für hohe
Materialdichten



diondo d5
Universelles CT-System
mit großer
Anwendungsvielfalt



diondo d7
Hochenergie Linac CT



diondo d!
Sonderlösungen für
individuelle Anwendungen

	diondo dsub μ	diondo d1	diondo d2	diondo d4	diondo d5	diondo d7	diondo d!
Prüfteilgröße	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○
Materialdichte	● ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○
Genauigkeit	-	● ● ● ● ●	● ● ● ● ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○
Auflösung	● ● ● ● ●	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○
Aufstellfläche	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○

Applikation & Dienstleistung

Unser Spektrum von Mikro bis Linac CT



Micro CT

3D Mikro CT Untersuchungen mit höchster Präzision durch 240 kV Mikrofokus -Röntgenquelle, 3K-Flächendetektor und Granitmanipulator für Elektronik, Leichtmetalle und Kunststoffe . Es können Prüfobjekte bis 800 mm Durchmesser und 2000 mm Höhe analysiert werden .



High Energy CT

Flexible Kombination einer 450 kV Röntgenquelle mit 3K-Flächen- und 4K-Zeilendetektor zur effektiven Prüfung dichter Materialien oder größerer Bauteile bis zu 5000 mm Höhe und 1000 mm Durchmesser.

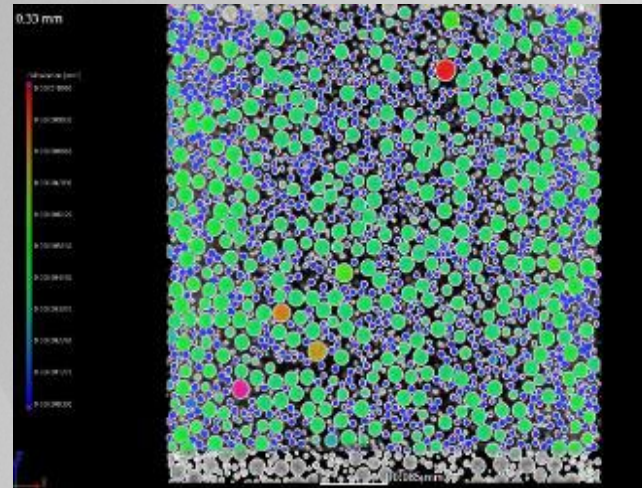


LINAC CT

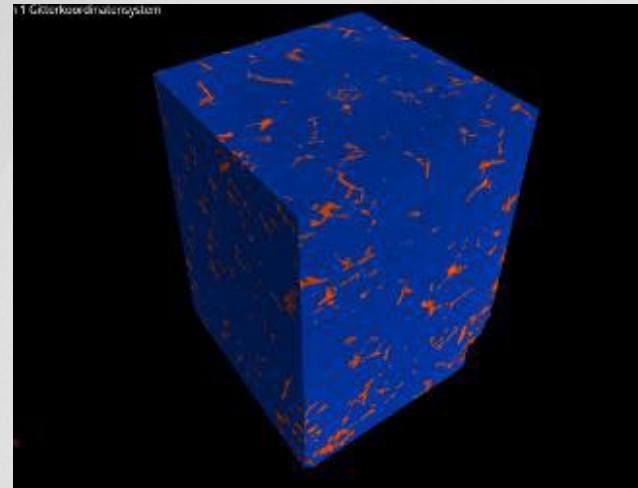
Das 6 MeV Linearbeschleuniger CT System. Aufgrund der hohen Dosisleistung ist die Linac CT perfekt geeignet für die Analyse von Prüfteilen mit höchster Dichte.

Applikation & Dienstleistung

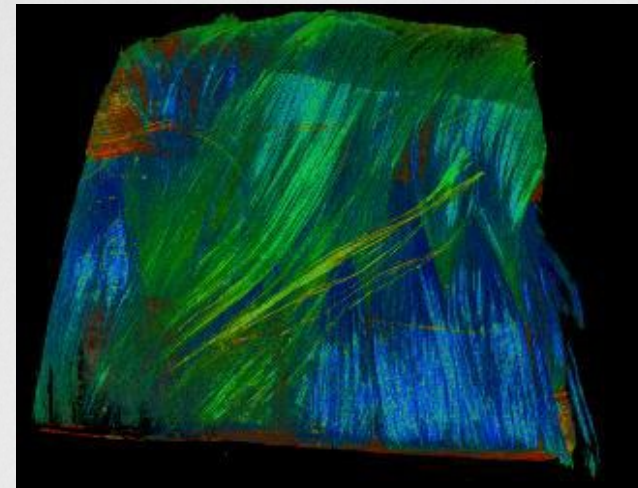
Unser Spektrum von Mikro bis Linac CT



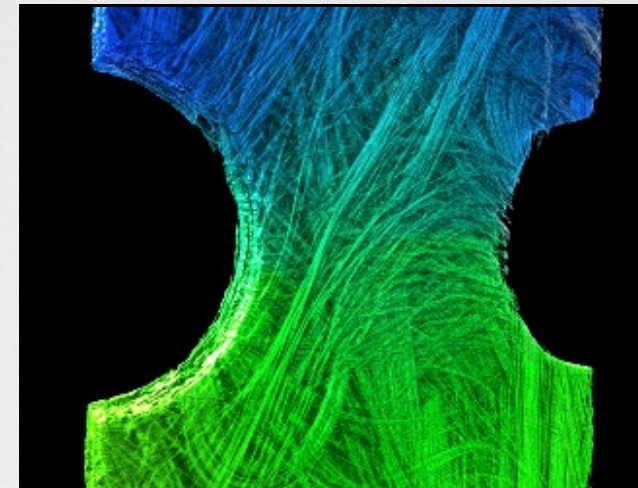
Charakterisierung von AM - Pulver



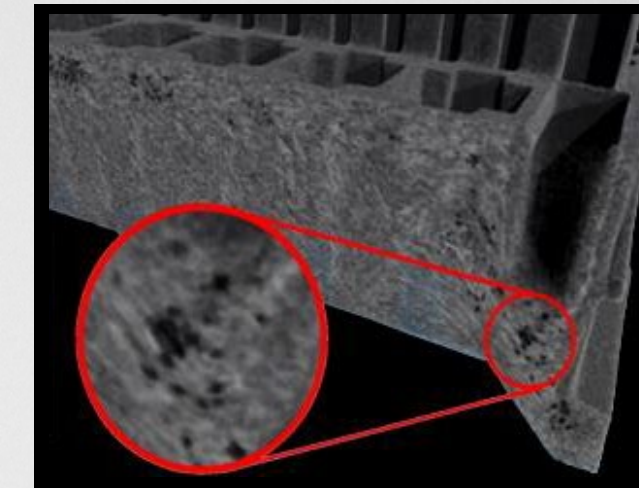
Metallografisches Gefüge von AlSi12



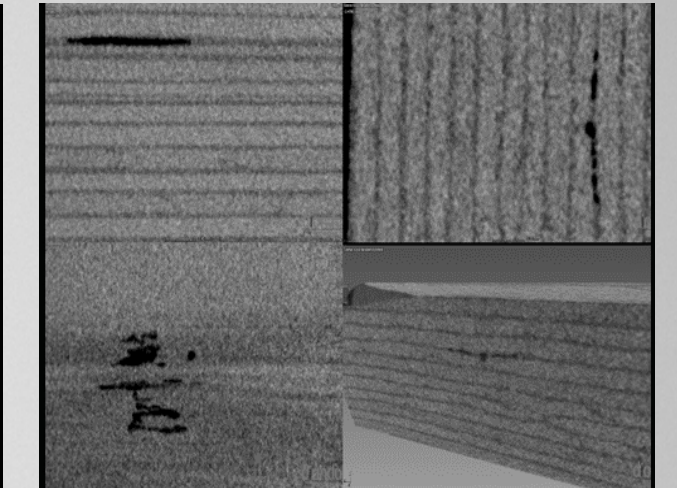
Faserorientierung in Verbundwerkstoff



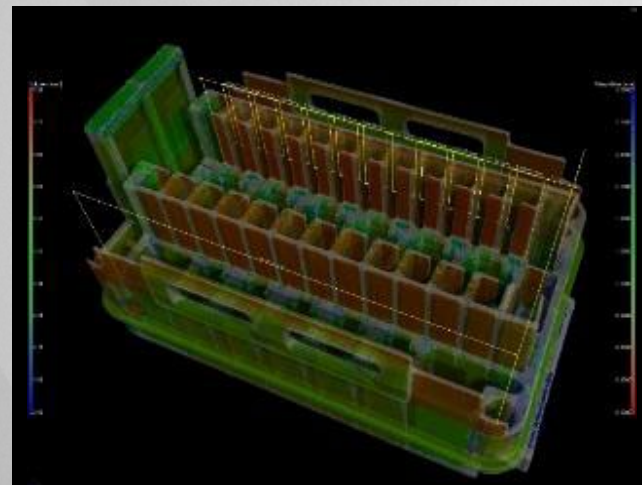
CFK-Bauteil - Digital Volume Correlation



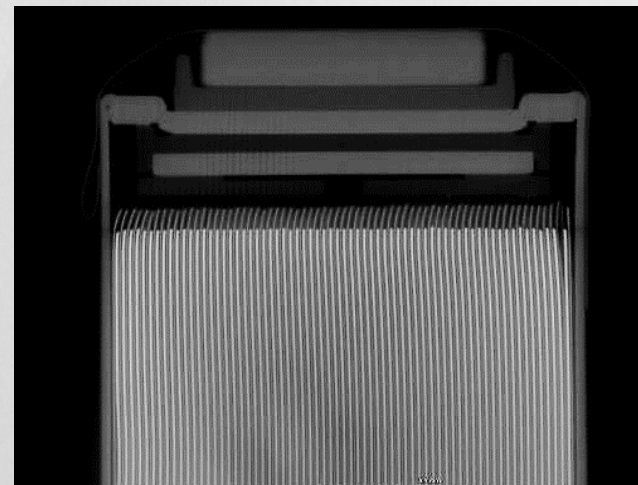
Poren und Fasern in einem Kunststoffbauteil



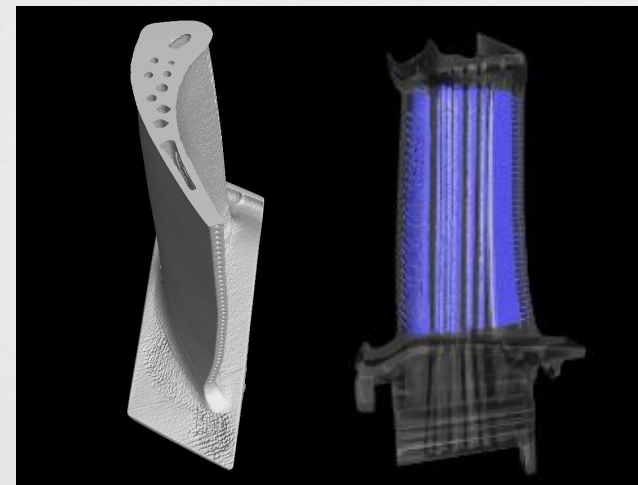
Fehler in einem CFF - Verbundwerkstoff



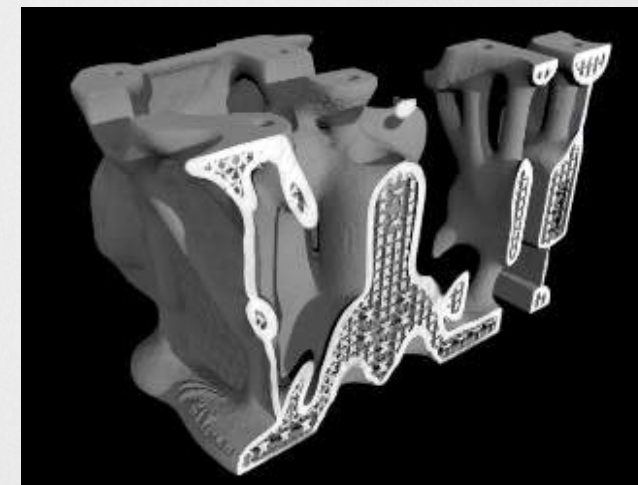
Vermessung eines Kunststoffbauteils



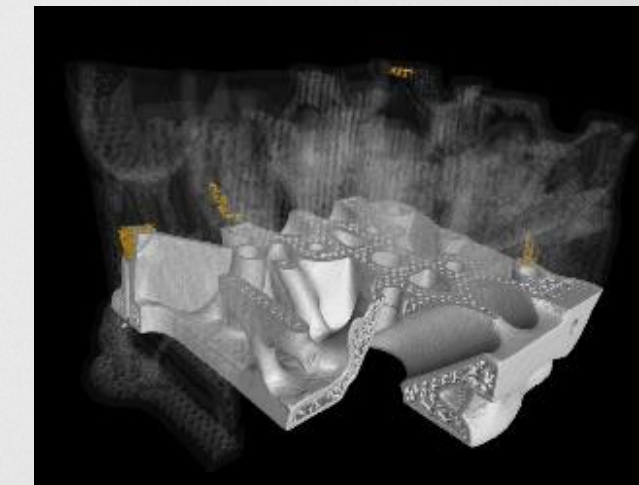
Li-Ionen Batterie eines Elektrofahrzeugs



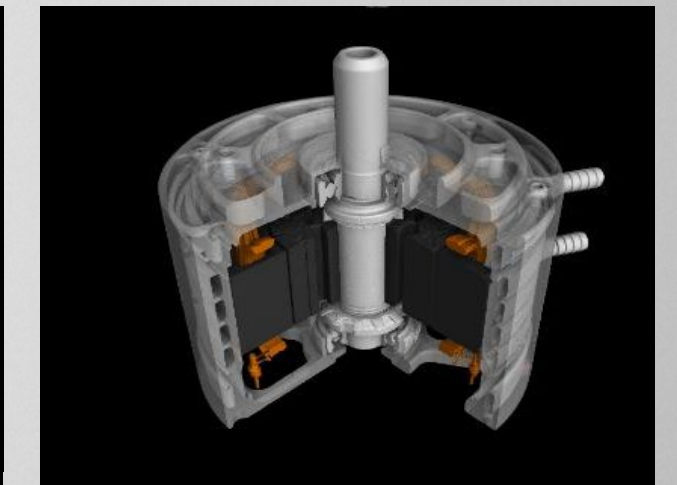
Kühlkanäle in einer Turbinenschaufel



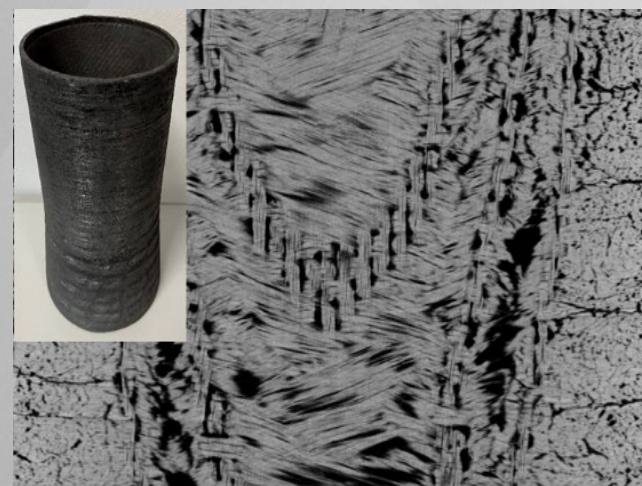
Additiv gefertigtes Metallbauteil



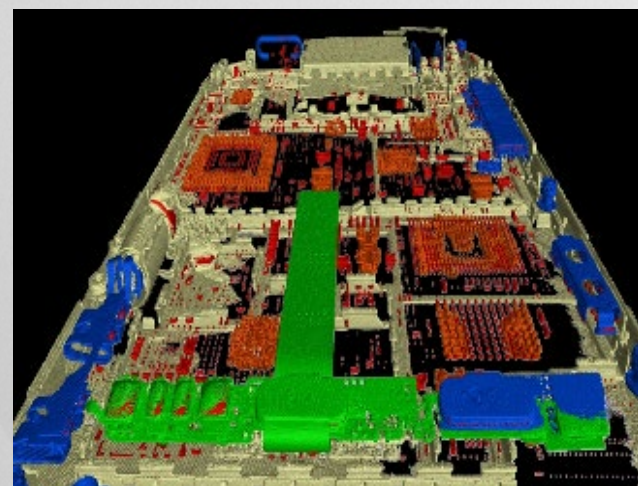
Porendetektion in metallischem AM - Bauteil



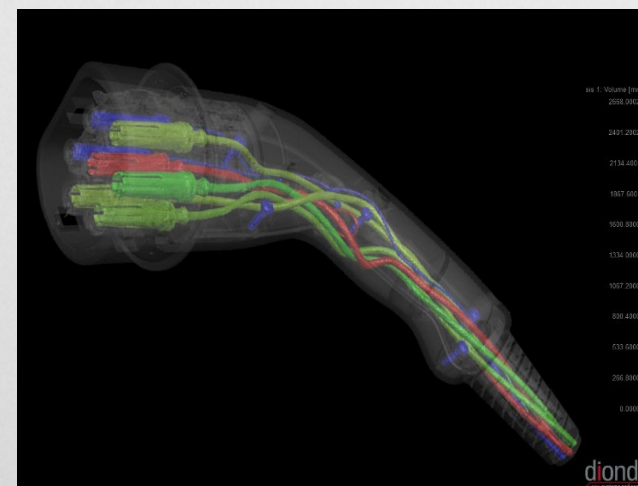
Motor eines Elektrofahrzeugs



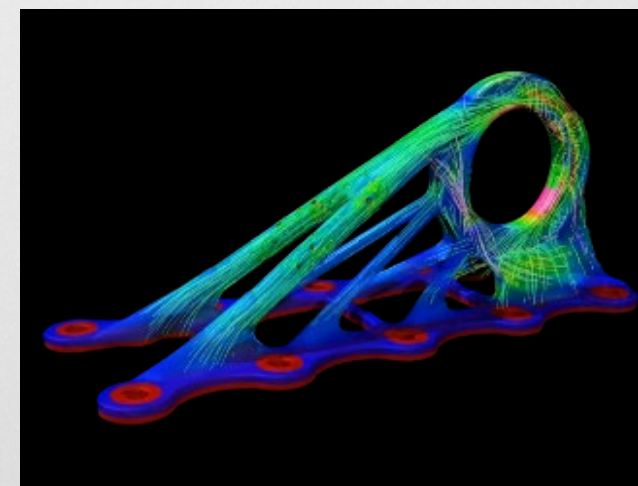
CMC-Verbundwerkstoff - Raketendüse



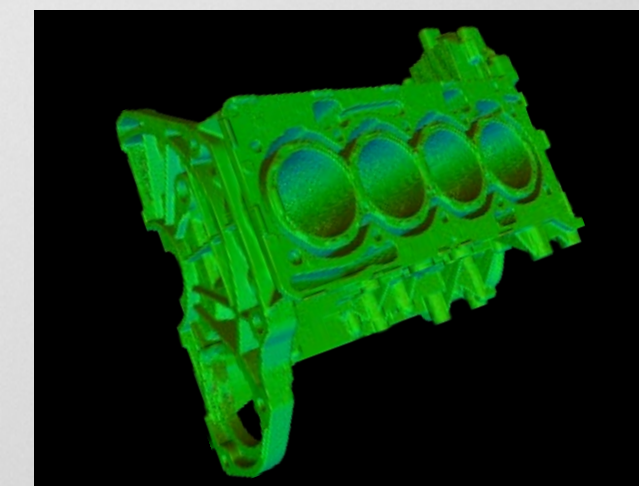
Elektronische Baugruppe



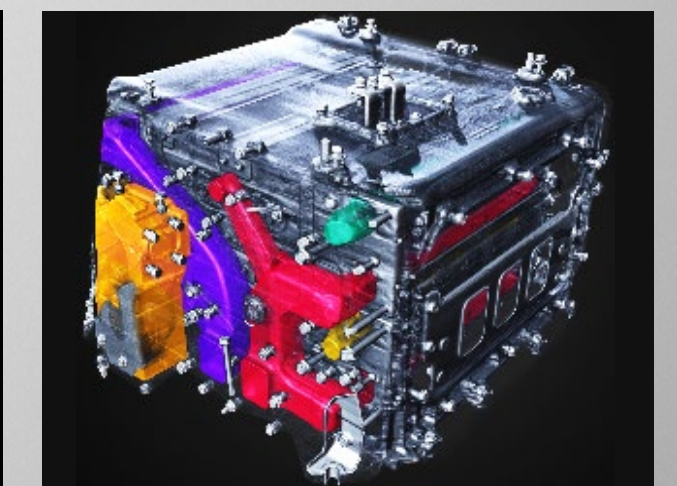
Stecker eines Elektrofahrzeugs



FEM-Simulation basierend auf CT - Daten



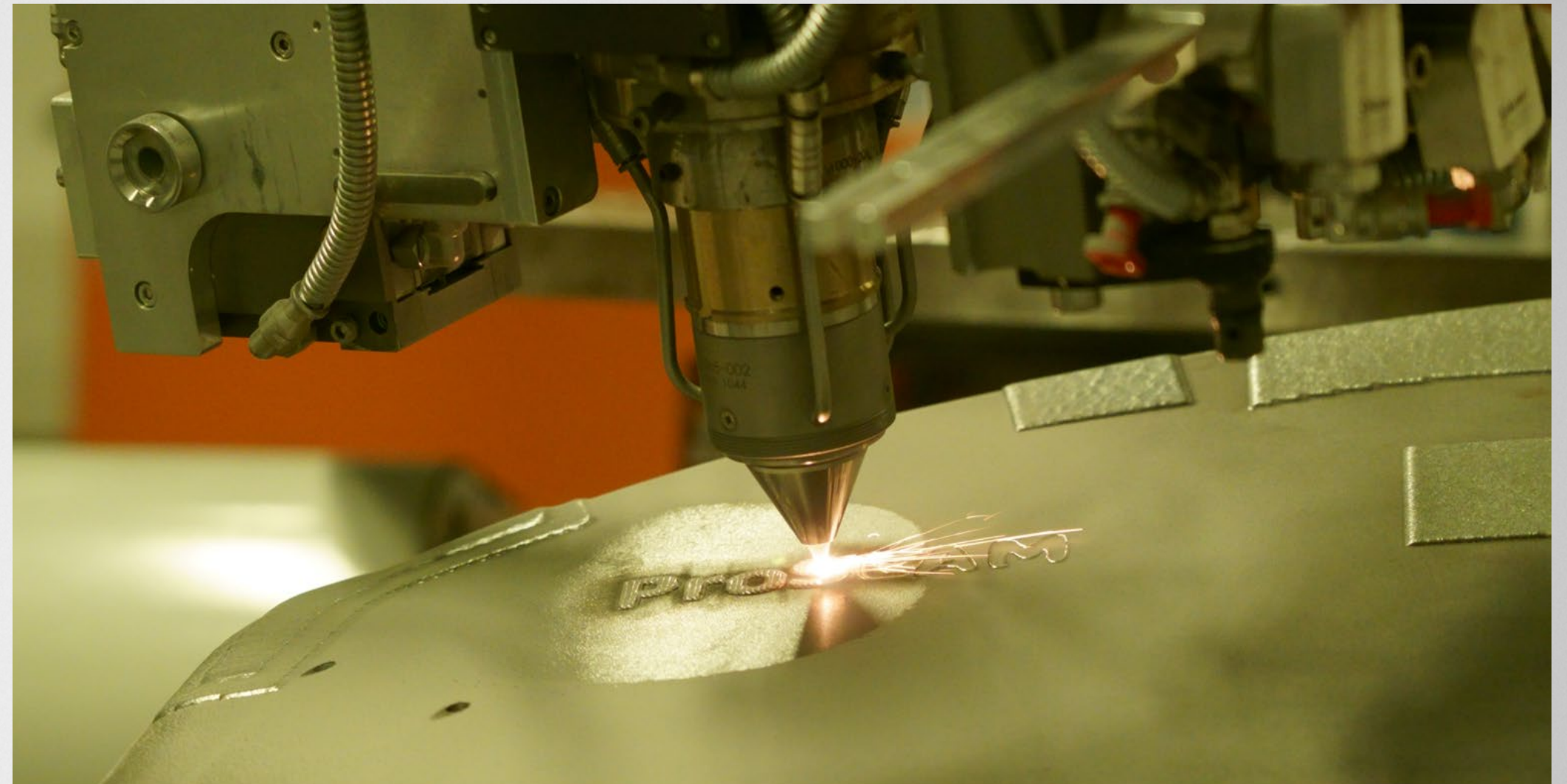
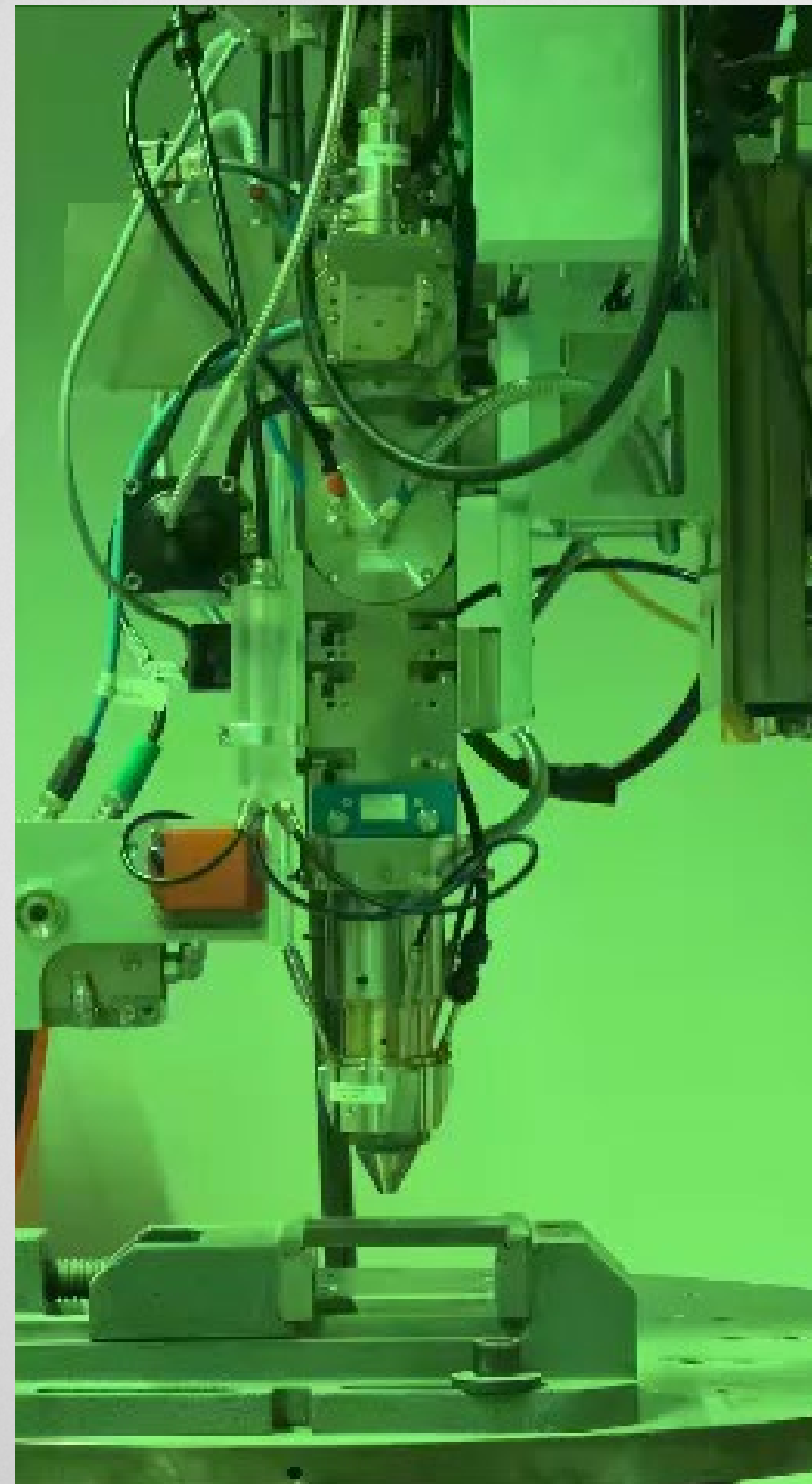
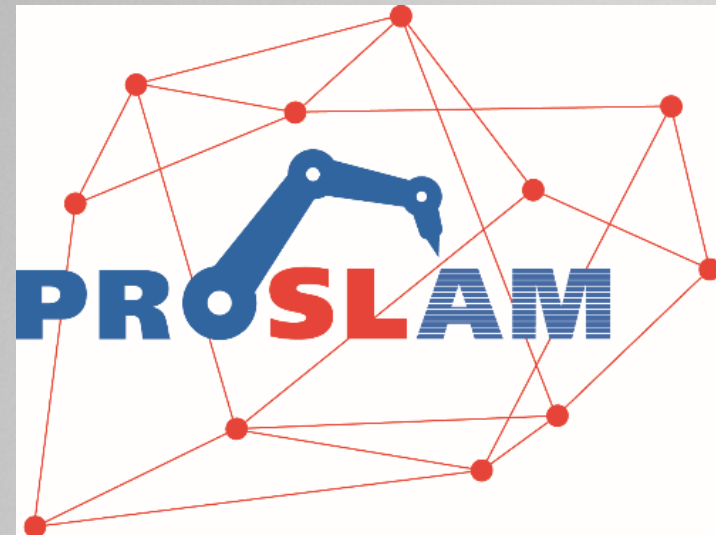
LINAC CT an einem Zylinderkopf



LINAC CT an einer Brennstoffzelle

Hintergrund des ProSLAM-Projektes

Produktion durch selbstlernende additive Fertigungsmethoden



Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert das Projekt ProSLAM im Rahmen der Fördermaßnahme "Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen".

Hintergrund des ProSLAM-Projektes

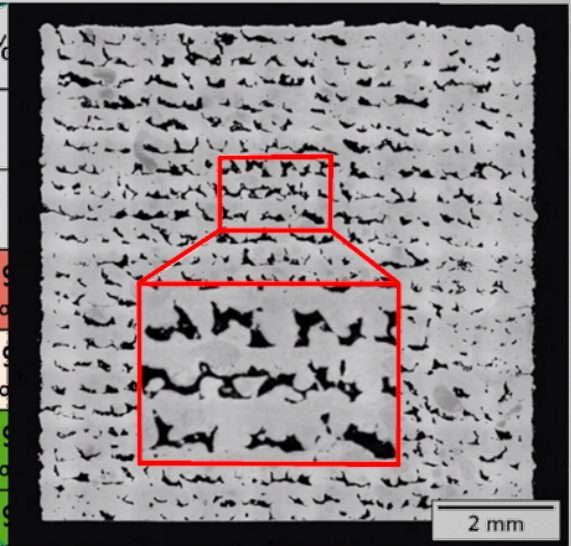
Produktion durch selbstlernende additive Fertigungsmethoden

		Mittlere Bauteildichte ρ [%]							
Laserleistung P_L [W]	125	94,51 $\sigma = 1,28$	93,94 $\sigma = 0,29$	88,05					
	180	97,83 $\sigma = 0,28$	96,98 $\sigma = 1,41$	96,33 $\sigma = 1,75$	95,96 $\sigma = 0,81$				
	285	99,37 $\sigma = 0,56$	99,81 $\sigma = 0,01$	99,69 $\sigma = 0,10$	99,71 $\sigma = 0,18$		97,41 $\sigma = 0,37$		
	385	98,10 $\sigma = 1,70$	98,20 $\sigma = 1,72$	99,62	99,96 $\sigma = 0,04$	99,92 $\sigma = 0,07$	99,85 $\sigma = 0,12$	99,70 $\sigma = 0,04$	99,74 $\sigma = 0,11$
	490		97,32 $\sigma = 1,20$	98,78 $\sigma = 1,14$	99,95 $\sigma = 0,07$	99,91 $\sigma = 0,07$	99,92 $\sigma = 0,09$	99,91 $\sigma = 0,05$	99,87 $\sigma = 0,09$
	565				99,84 $\sigma = 0,14$	99,92	99,93 $\sigma = 0,04$	99,91 $\sigma = 0,06$	99,84 $\sigma = 0,13$
		400	600	800	1200	1400	1600	1800	2000
		Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]							

■ Risse + Anbindungsfehler
 ■ Anbindungsfehler
 ■ Risse
 ■ Gasporosität
 ■ Defektfrei

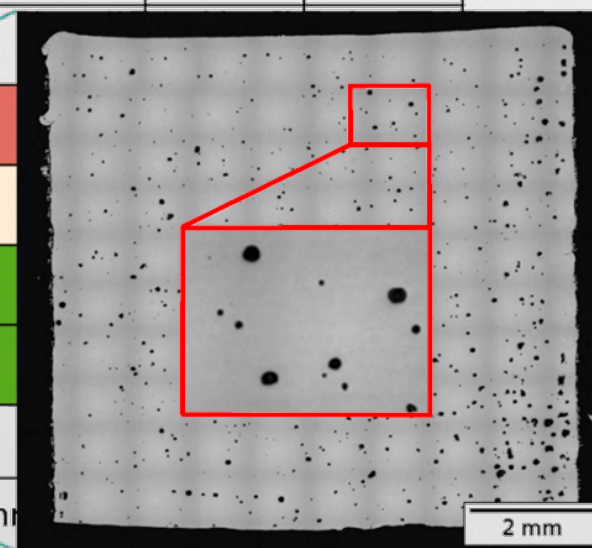
		Mittlere Bauteildichte ρ [%]							
Laserleistung P_L [W]	125	94,51 $\sigma = 1,28$	93,94 $\sigma = 0,29$	88,05					
	180	97,83 $\sigma = 0,28$	96,98 $\sigma = 1,41$	96,33 $\sigma = 1,75$	95,96 $\sigma = 0,81$				
	285	99,37 $\sigma = 0,56$	99,81 $\sigma = 0,01$	99,69 $\sigma = 0,10$	99,71 $\sigma = 0,18$		97,41 $\sigma = 0,37$		
	385	98,10 $\sigma = 1,70$	98,20 $\sigma = 1,72$	99,62	99,96 $\sigma = 0,04$	99,92 $\sigma = 0,07$	99,85 $\sigma = 0,12$	99,70 $\sigma = 0,04$	99,74 $\sigma = 0,11$
	490		97,32 $\sigma = 1,20$	98,78 $\sigma = 1,14$	99,95 $\sigma = 0,07$	99,91 $\sigma = 0,07$	99,92 $\sigma = 0,09$	99,91 $\sigma = 0,05$	99,87 $\sigma = 0,09$
	565				99,84 $\sigma = 0,14$	99,92	99,93 $\sigma = 0,04$	99,91 $\sigma = 0,06$	99,84 $\sigma = 0,13$
		400	600	800	1200	1400	1600	1800	2000
		Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]							

■ Risse + Anbindungsfehler
 ■ Anbindungsfehler
 ■ Risse
 ■ Gasporosität
 ■ Defektfrei



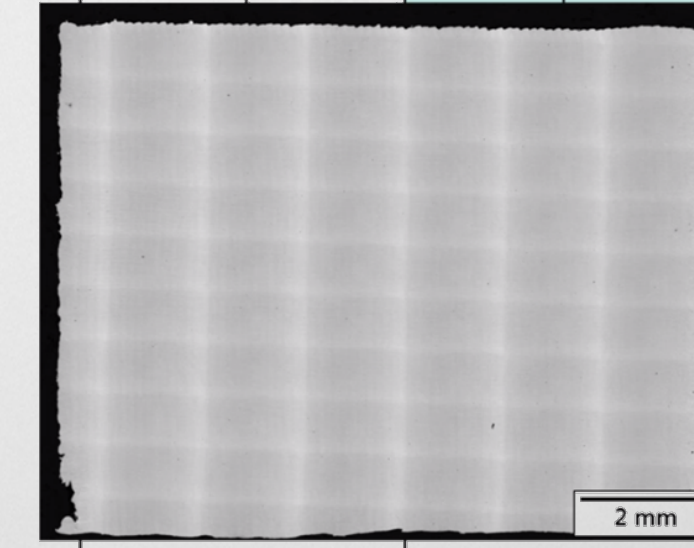
		Mittlere Bauteildichte ρ [%]				
Laserleistung P_L [W]	125	94,51 $\sigma = 1,28$	93,94 $\sigma = 0,29$	88,05		
	180	97,83 $\sigma = 0,28$	96,98 $\sigma = 1,41$	96,33 $\sigma = 1,75$	95,96 $\sigma = 0,81$	
	285	99,37 $\sigma = 0,56$	99,81 $\sigma = 0,01$	99,69 $\sigma = 0,10$	99,71 $\sigma = 0,18$	
	385	98,10 $\sigma = 1,70$	98,20 $\sigma = 1,72$	99,62	99,96 $\sigma = 0,04$	99,92 $\sigma = 0,07$
	490		97,32 $\sigma = 1,20$	98,78 $\sigma = 1,14$	99,95 $\sigma = 0,07$	99,91 $\sigma = 0,07$
	565				99,84 $\sigma = 0,14$	99,92
		400	600	800	1200	1400
		Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]				

■ Risse + Anbindungsfehler
 ■ Anbindungsfehler
 ■ Risse
 ■ Gasporosität
 ■ Defektfrei



		Mittlere Bauteildichte ρ [%]							
Laserleistung P_L [W]	125	94,51 $\sigma = 1,28$	93,94 $\sigma = 0,29$	88,05					
	180	97,83 $\sigma = 0,28$	96,98 $\sigma = 1,41$	96,33 $\sigma = 1,75$	95,96 $\sigma = 0,81$				
	285	99,37 $\sigma = 0,56$	99,81 $\sigma = 0,01$	99,69 $\sigma = 0,10$	99,71 $\sigma = 0,18$		97,41 $\sigma = 0,37$		
	385	98,10 $\sigma = 1,70$	98,20 $\sigma = 1,72$	99,62	99,96 $\sigma = 0,04$	99,92 $\sigma = 0,07$	99,85 $\sigma = 0,12$	99,70 $\sigma = 0,04$	99,74 $\sigma = 0,11$
	490		97,32 $\sigma = 1,20$	98,78 $\sigma = 1,14$	99,95 $\sigma = 0,07$	99,91 $\sigma = 0,07$	99,92 $\sigma = 0,09$	99,91 $\sigma = 0,05$	99,87 $\sigma = 0,09$
	565				99,84 $\sigma = 0,14$	99,92	99,93 $\sigma = 0,04$	99,91 $\sigma = 0,06$	99,84 $\sigma = 0,13$
		800	1200	1400	1600	1800	2000		
		Scangeschwindigkeit v_s [mm/s]							

■ Risse + Anbindungsfehler
 ■ Anbindungsfehler
 ■ Risse
 ■ Gasporosität
 ■ Defektfrei

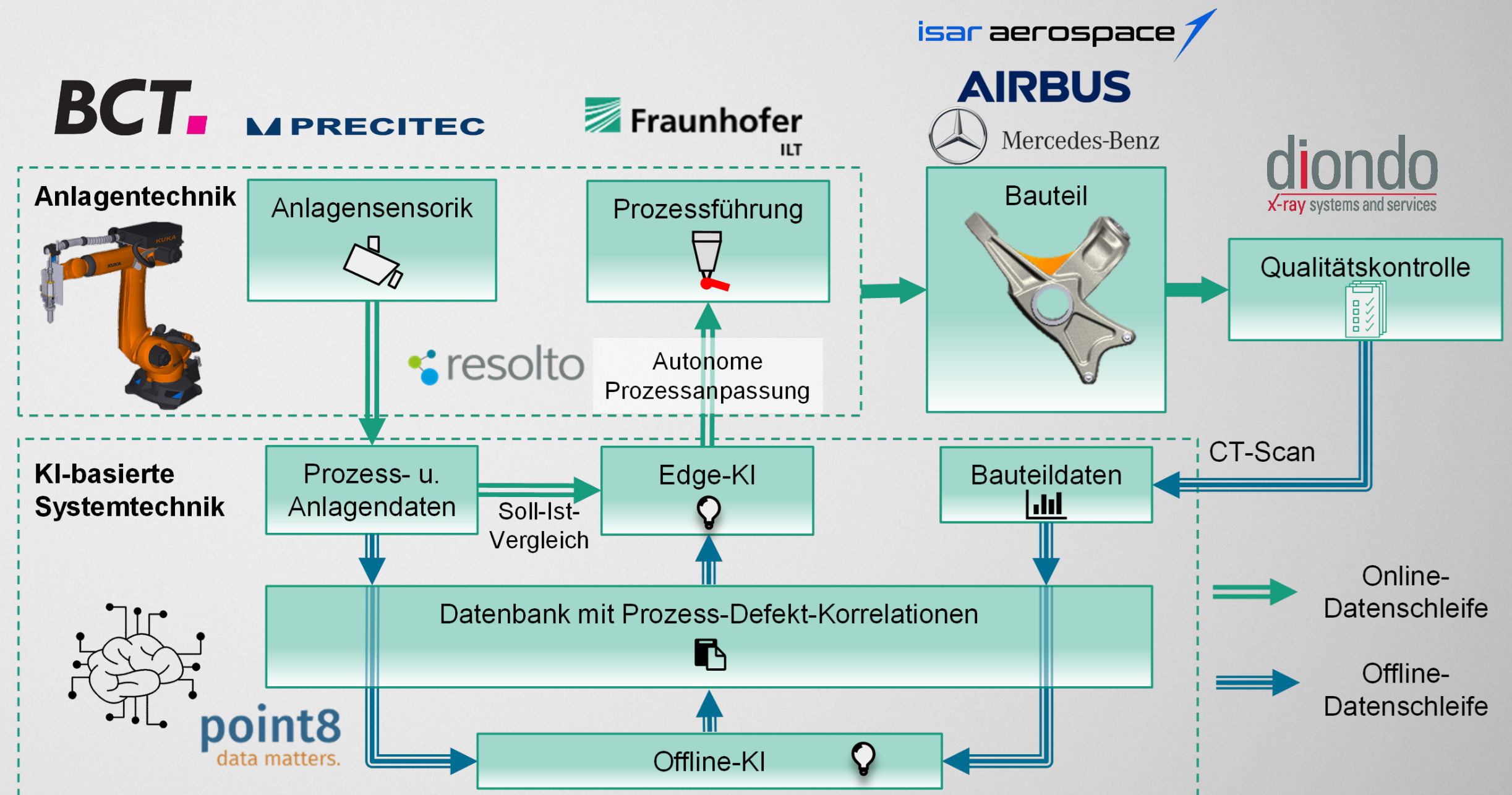


Hintergrund des ProSLAM-Projektes

Produktion durch selbstlernende additive Fertigungsmethoden

Das Forschungsprojekt ProSLAM zielt darauf ab, die Leistung der additiven Fertigung (AM) mit Laserauftragschweißen (LMD) durch die folgenden Maßnahmen zu verbessern:

- Neuartige Prozessüberwachungstechnologie zur Erfassung weiterer (relevanter) Daten während der AM-Herstellung von Bauteilen
- Künstliche Intelligenz (KI) zum Erkennen und Korrigieren von Prozessabweichungen in Echtzeit (Edge-KI)
- Offline-KI zur Herstellung von Korrelationen zwischen der Prozessüberwachung und der Qualität der Teile nach dem Bau, wie sie durch CT bestimmt wird
- Fortschritte in der CT-Technologie für die Endkontrolle nach dem Bau
- Steigerung der Gesamtproduktivität von LMD-basierten AM-Prozessen um ca. 25% durch die Integration der Prozessüberwachung und die KI-Methoden
- Beschleunigung der Prozessentwicklung um 50% durch eine daten- und KI-basierte, Vorhersage von Materialeigenschaften

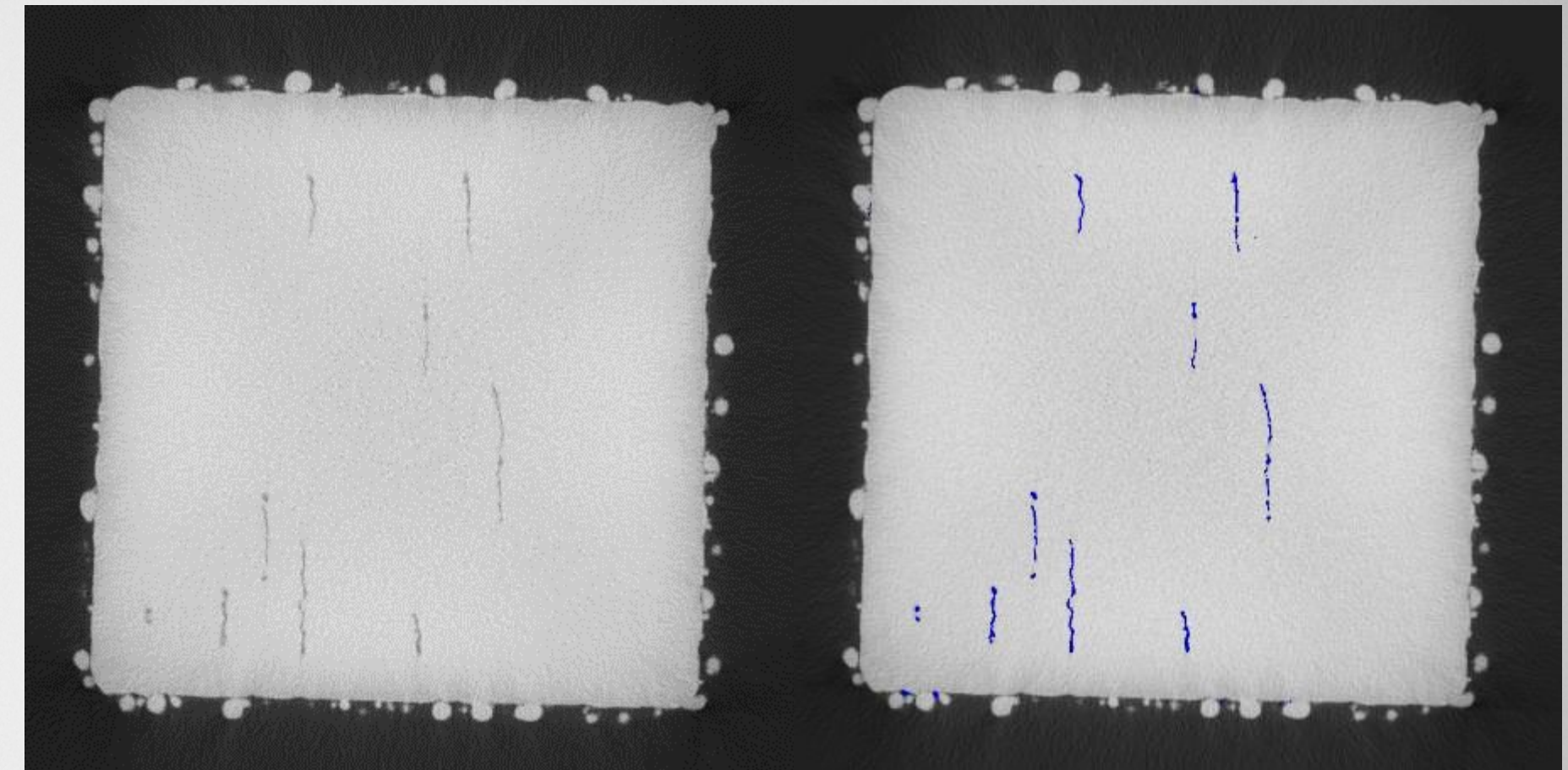


Das Projekt beinhaltet zahlreiche Aspekte von ZfP 4.0!

Aspekte von ZfP 4.0 in dem ProSLAM-Projekt

Bereitstellung von ZfP-Daten aus der Computertomographie für Industrie 4.0 Prozesse

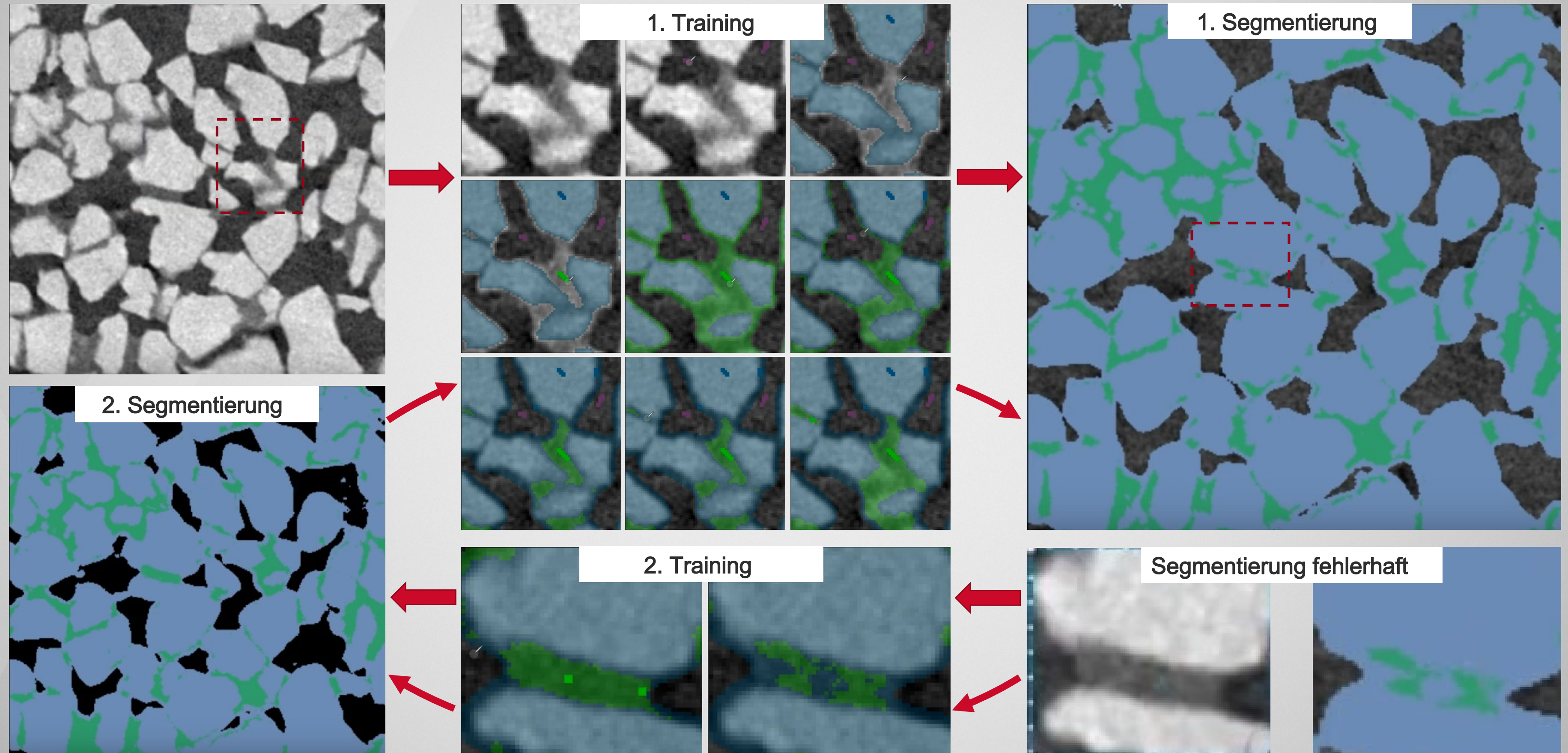
- Ziel: Korrelation der CT-Prüfung nach der Fertigung mit der prozessbegleitenden Überwachung, so dass die während der Fertigung erzeugten In-Situ Daten letztlich genutzt werden können, um die Qualität der LMD-Teile abzusichern und eine „first time right“-Produktion zu ermöglichen.
- Die größten Herausforderungen dabei sind:
 - Datenvolumina / Datenraten in der CT
 - 50-100 GBs CT-Daten auch bei kleinen Bauteilen
 - Registrierung der LMD- und CT-Daten
 - Multi-modal (unterschiedliche Datenquellen und Datenformaten)
 - Zeitlicher und räumlicher Versatz der Daten: Gefahr einer möglichen Veränderung der Probe (z.B. Verzug beim Abkühlen)
- Lösungsansätze:
 - Erzeugung binärer Masken als Fehlerindikatoren und Grundlage für die Korrelation mit der In-Situ-Prozess-Überwachung
 - Für die notwendige Segmentierung werden KI-basierte Verfahren eingesetzt
 - Datenreduktion um >1 Größenordnung
 - Überführung aller Sensordaten in das Koordinatensystem der Nenngeometrie (CAD)
 - Der Registrierungsprozess kann automatisiert werden



KI-gestützte Segmentierung zur Herstellung einer binären Maske (als Overlay rechts dargestellt) am Beispiel eines CT-Schnittbildes durch einen LMD-Testwürfel, der absichtlich mit defektinduzierenden Parametern gebaut wurde.

Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM-Projekt

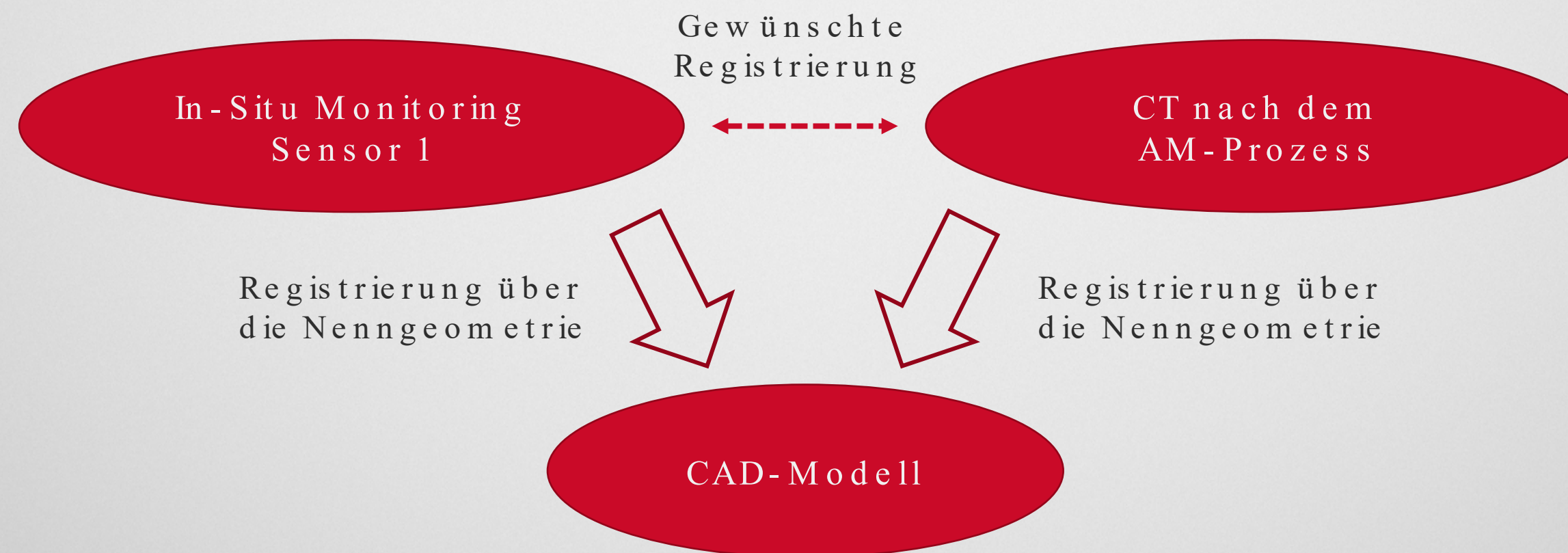
Einsatz von Machine Learning Tools zur Segmentierung von CT-Daten



Aspekte von ZfP 4.0 in dem ProSLAM-Projekt

Registrierung über das CAD-Koordinatensystem

- Ansatz im ProSLAM-Projekt: Die Koordinatentransformation von Inspektions- und Überwachungsdaten in die CAD-Nenngemetrie ermöglicht die Registrierung. Durch die Überführung von zwei Datensätzen in ein drittes, gemeinsames Koordinatensystem sind die Datensätze aufeinander registriert.
- Die Registrierung auf der Grundlage des CAD-Koordinatensystems hat Vorteile, darunter:
 - Nutzung von Vorwissen → Nutzung des CAD-Modells der Probengeometrie
 - Skalierbarkeit → Mögliche Erweiterbarkeit auf beliebig viele Sensor-Kanäle
 - Digitaler Zwilling des individuellen Bauteils → Weiterverwendung von Daten im Lebenszyklus des Bauteils
 - Automatisierung → Automatisierter Ablauf des Datenabgleichs auf Grundlage der vorherigen Punkte

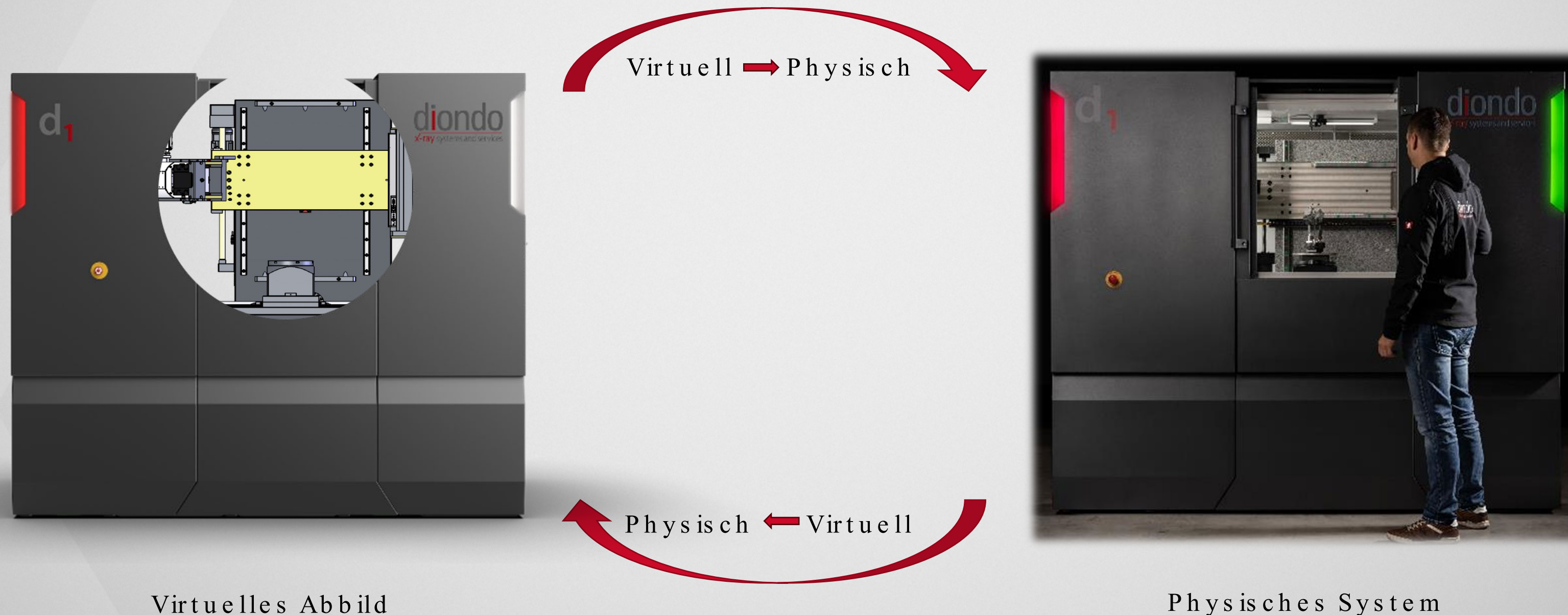


- Es gibt folgende Ansätze zur Überführung der CT-Daten in das Koordinatensystem des CAD-Modells:
 1. Ausrichtung im Anschluss an den CT-Scan durch Best-Fit Anpassung der Soll-Ist-Geometrie
 - Kein Vorwissen erforderlich
 - Starke Abhängigkeit des Ergebnisses von der Qualität des CT-Scans
 - Nicht möglich, wenn nur Abschnitte einer Probe untersucht wurden (ROI CT-Scan)
 - Unbrauchbar für die Planung
 2. Einsatz eines zusätzlichen Sensorsystems
 - Zusätzliche Kosten und komplexe multi-modale Registrierung
 3. Verwendung einer Proben - Halterung mit bekannter Geometrie
 - Geeignet für die Planung
 - Erfordert eine digital spezifizierte bekannte Halterung
 - Genauigkeit ist nicht perfekt
 4. Verwendung von Projektionsdaten
 - Geeignet für die Planung
 - Bedingt eine gute Übereinstimmung des Bauteils mit dem CAD - Modell
 - Rechnerisch anspruchsvolle Lösung

Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM-Projekt

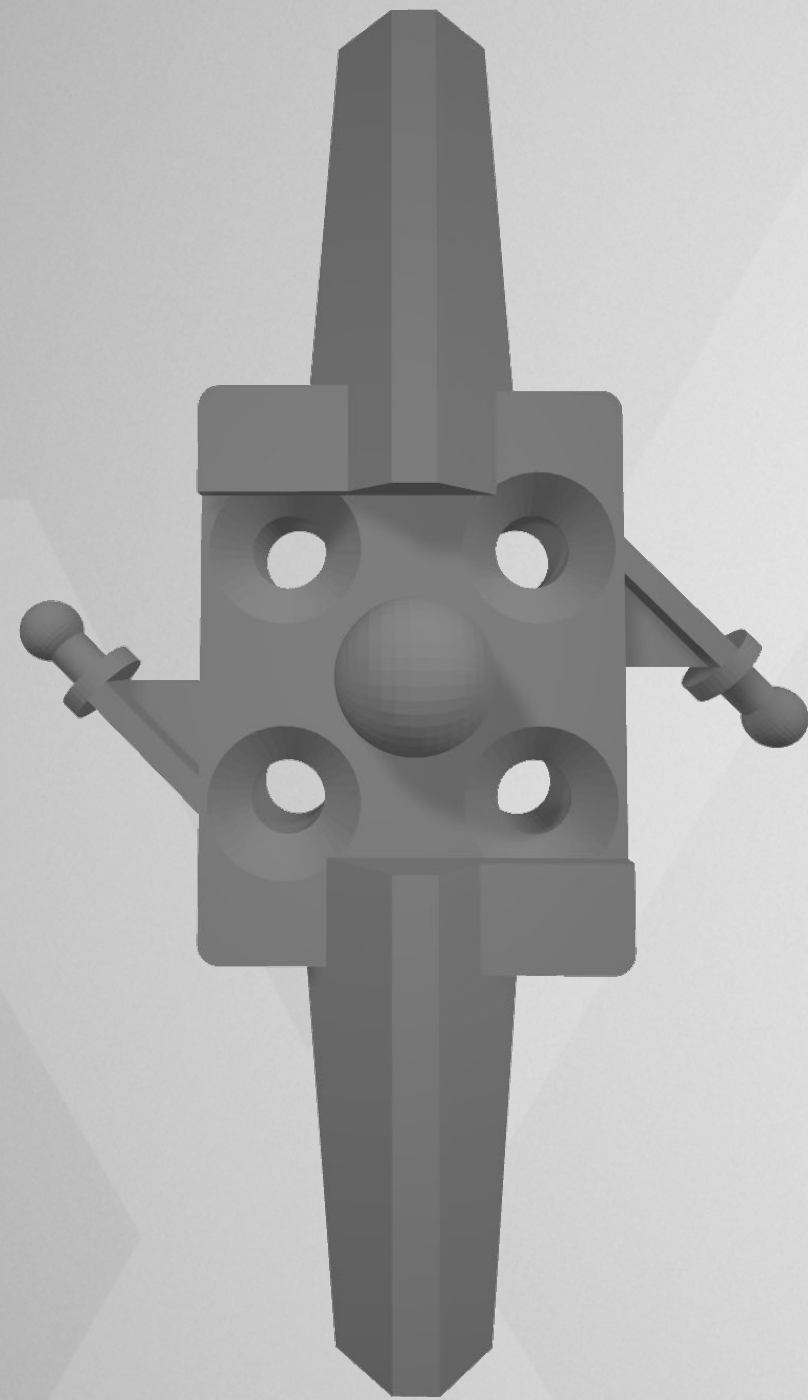
Verbesserte Inspektion durch den Einsatz eines digitalen Zwillings

- Digitaler Zwilling = Physisches System + Virtuelles Abbild des Systems + Datenfluss, der beide Elemente verbindet
- Ultra-realistische Abbildung des physischen Systems mit sehr hoher Echtheitstreue und synchronisierten Daten
- Zu wissen, wo sich ein Bauteil in dem CT-System befindet, ist ein Schlüsselement der physischen \Leftrightarrow virtuellen Synchronisation

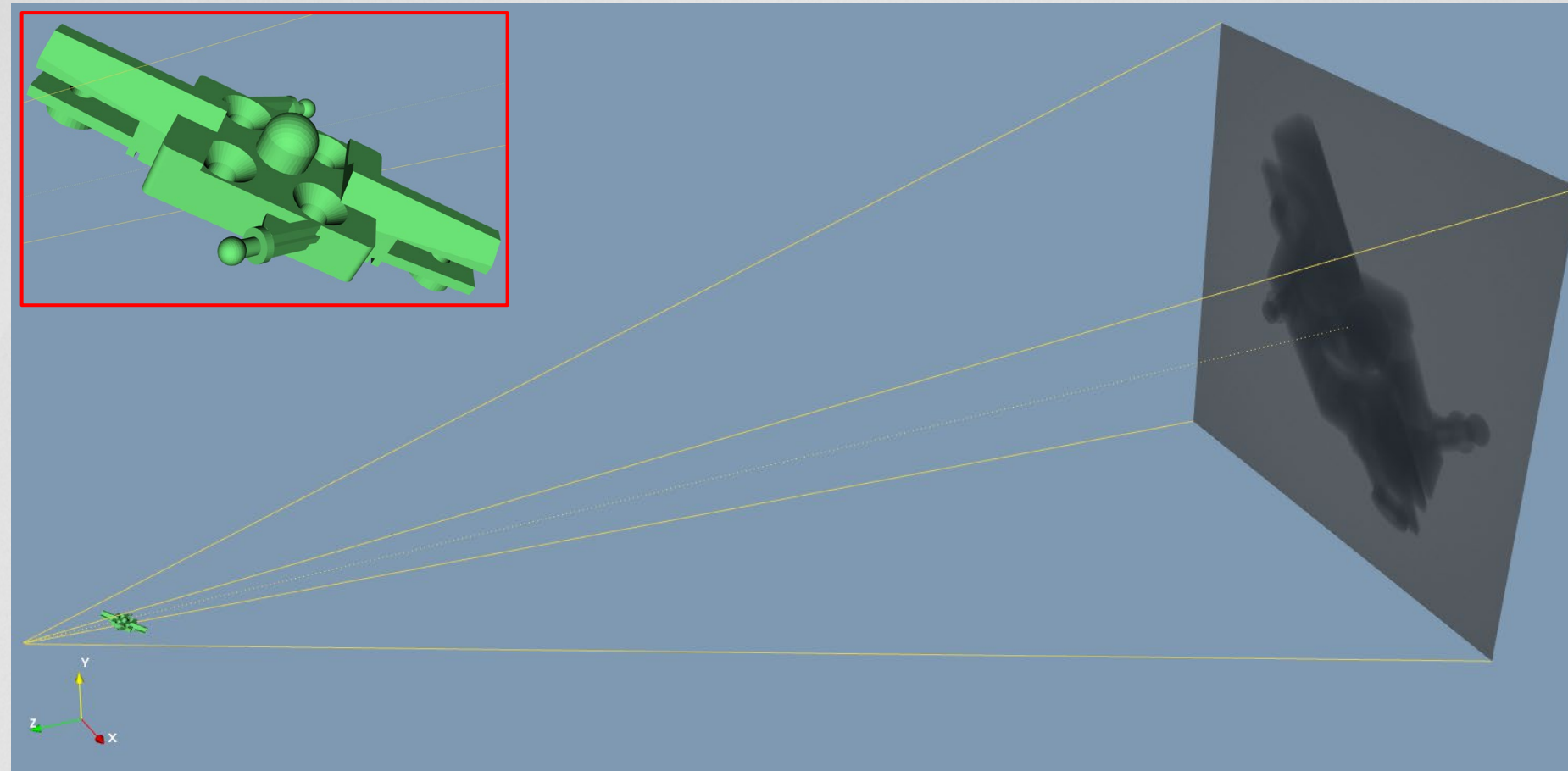


Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM-Projekt

Digitaler Zwilling – Röntgensimulation der CT-Prüfung



CAD-Modell (STL-Format)



Röntgenquelle

Setup Source Scattering Detector

Source spectrum

X-ray tube (General): W, 220 kV, 45°, 4 mm Al

Graph Text

photons

energy / keV

log x log y Lines Grid

Exposure

exposure [mA or GBq] 1

Focal spot

Size [mm] Spot type

X: 1 Y: 1

Setup Source Scattering Detector

Environment

Material air

Assembly List

ID	Name	Material	Display
S	Source		0.75
D	Detector		0.75
1	BladesHolder	Fe	1.0

Transformation of BladesHolder (ID 1, Fe)

XYZ X Y Z

Axis Value Transform

Reference Pos. 1 -1 940

Position Orientation Size

Position	Orientation	Size
1	-27.3748 -118.496 -13.1423	30 6.48742 19.2919

Bauteil / Manipulator

Setup Source Scattering Detector

Geometry

Size [mm] Pixel Res. [mm]

X 417 Y 417

3000 3000 0.139 0.139

Multisampling source dependent

Curvature off

Characteristic

detector type flat panel

scan mode off

Exposure

reference point max

picked position -1.000 -1.000

set to [D or GV] 10000

exposure time [s] 3.61814

of frames to average 1

Parameter Override

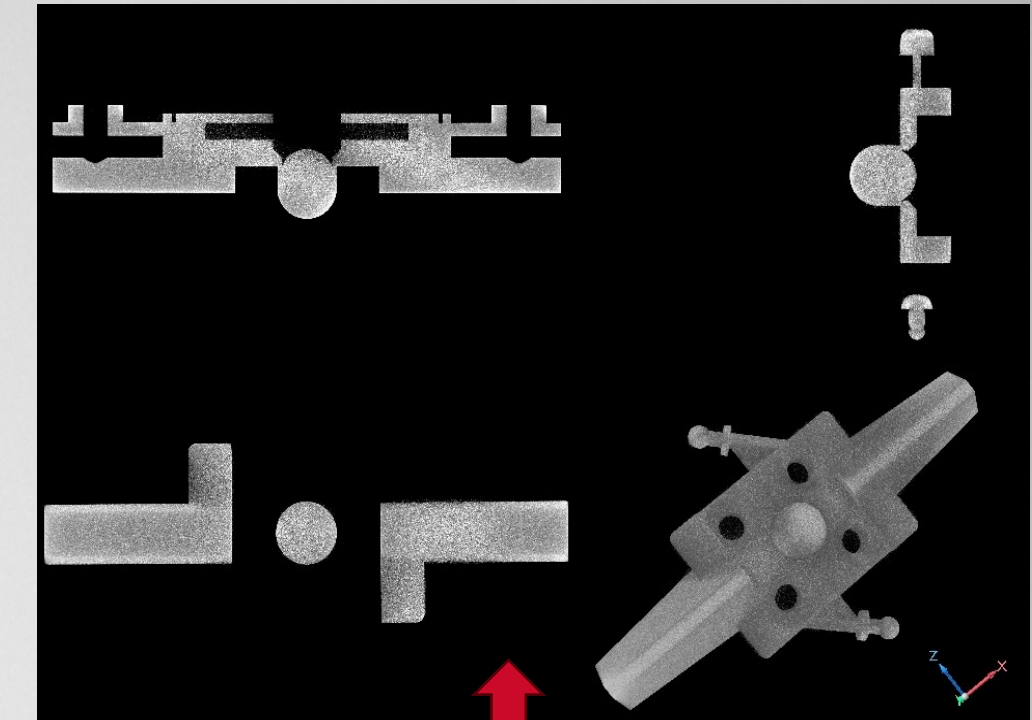
unsharpness 0.23 mm

long range unsharpness 15 mm 0 %

noise factor 1

Flat Field Correction

Detektor



Projektionen + CT-Rekonstruktion

aRTist Image View (3000x3000)

grey values

display range 284 10573

Zoom: Fit

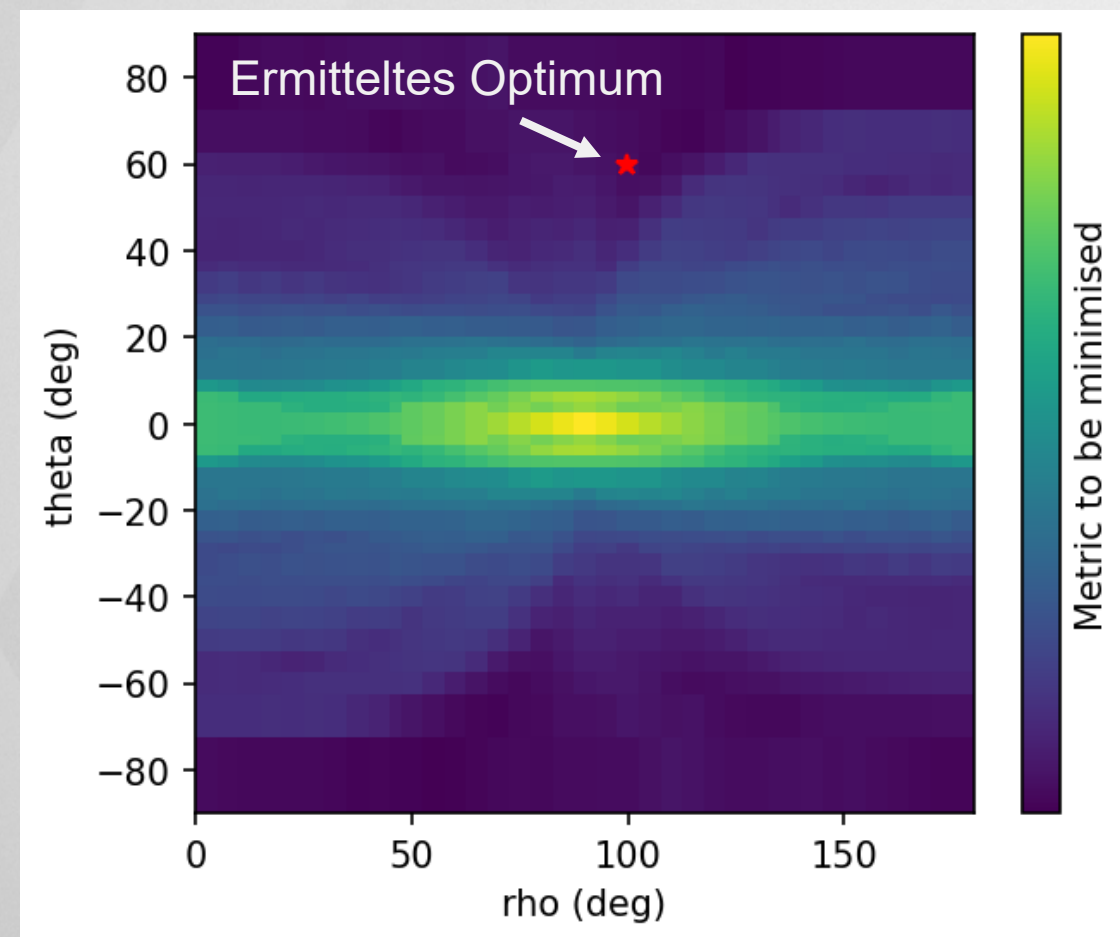
Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM

Digitaler Zwilling – Optimierte Ausrichtung des Bauteils im CT

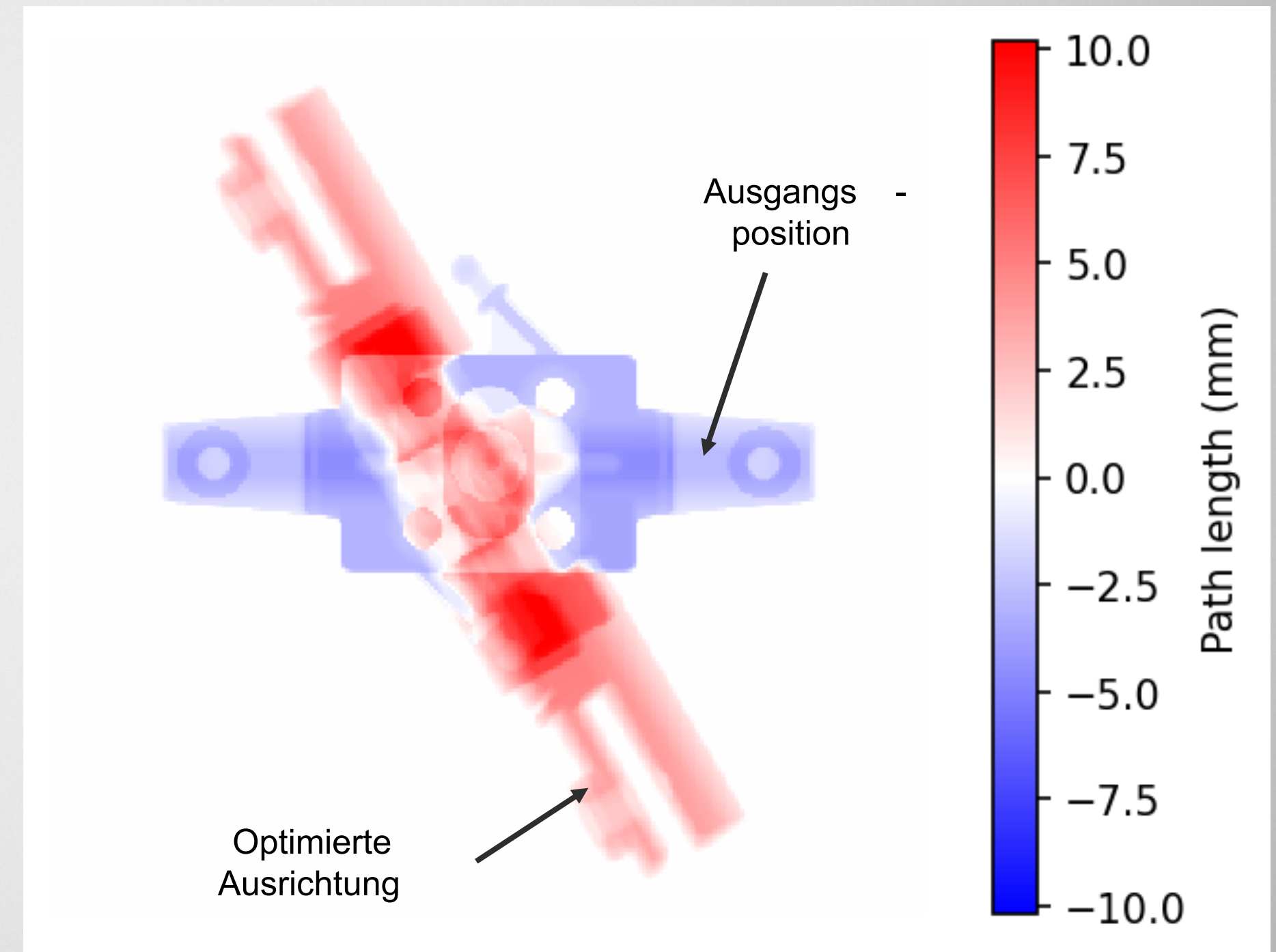
- Projekt

- System

- Entwicklung eines Tools zur Bestimmung der **optimalen Ausrichtung von Prüfkörpern in einem CT - System**
- Grundlage: CAD - Modell der Probe und Röntgensimulation
- Die Berechnung beruht auf der schnellen Simulation vieler möglicher Probenpositionen, um eine Zielfunktion, die die erwartete Bildqualität darstellt, numerisch zu maximieren



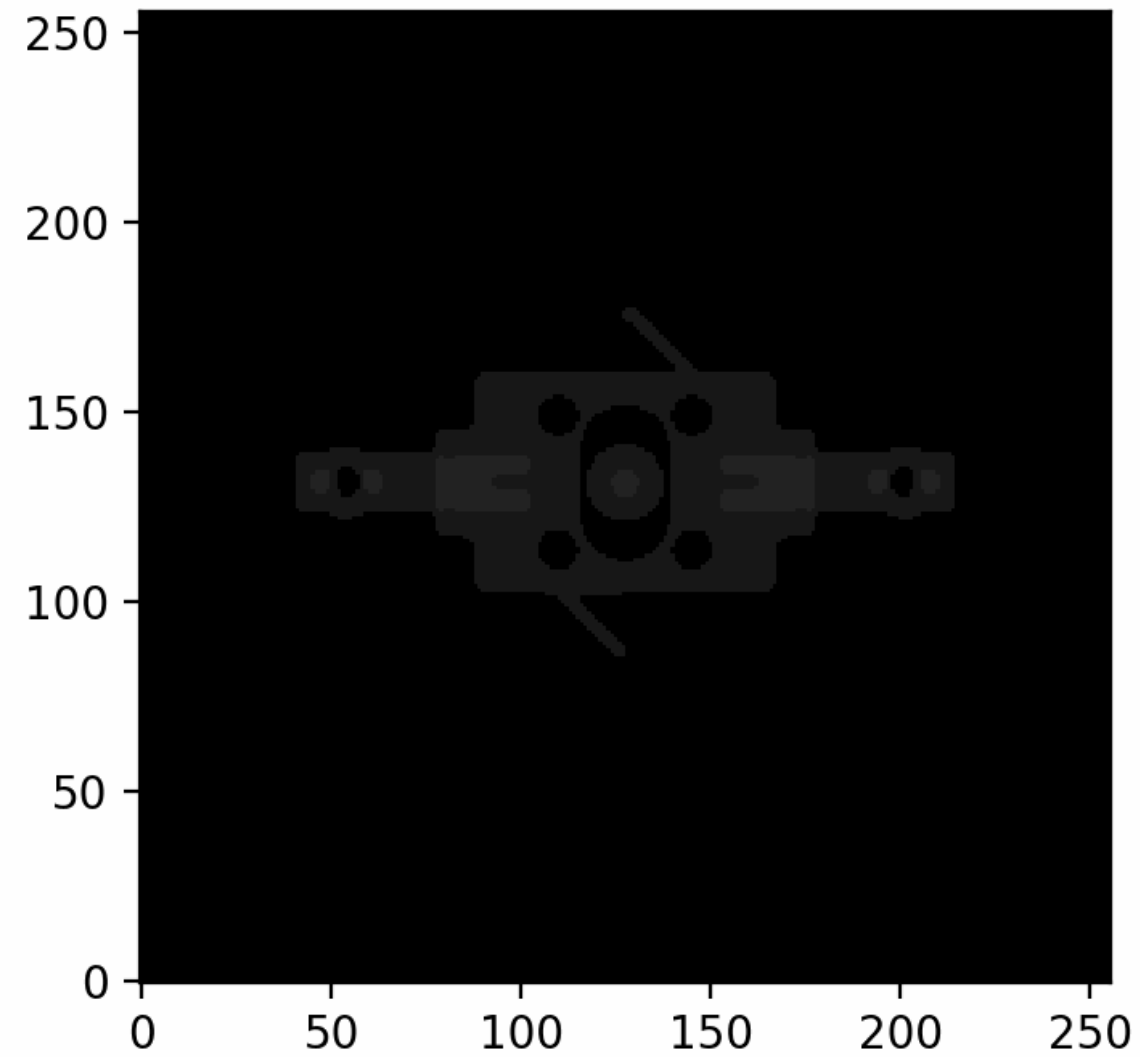
Darstellung der Güte der Ausrichtung als Funktion der zwei Winkel, die die Ausrichtung der Probe auf dem Drehteller beschreiben



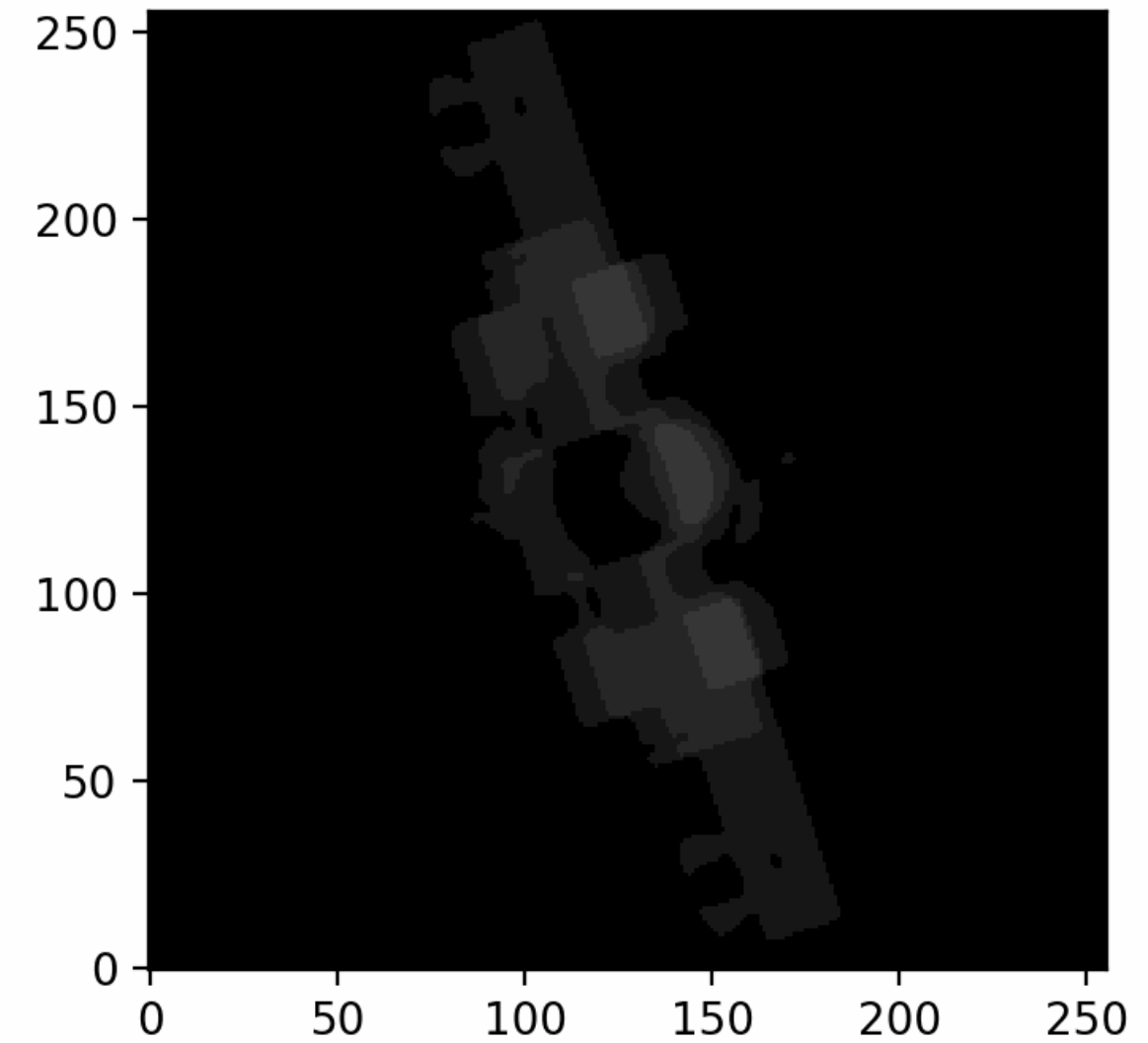
Vergleich der ersten Projektion des CT - Scans vor und nach der Ausrichtungsoptimierung als Differenz der Weglängen

Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM-Projekt

Digitaler Zwilling – Optimierte Ausrichtung des Bauteils im CT-System



Ausgangsposition

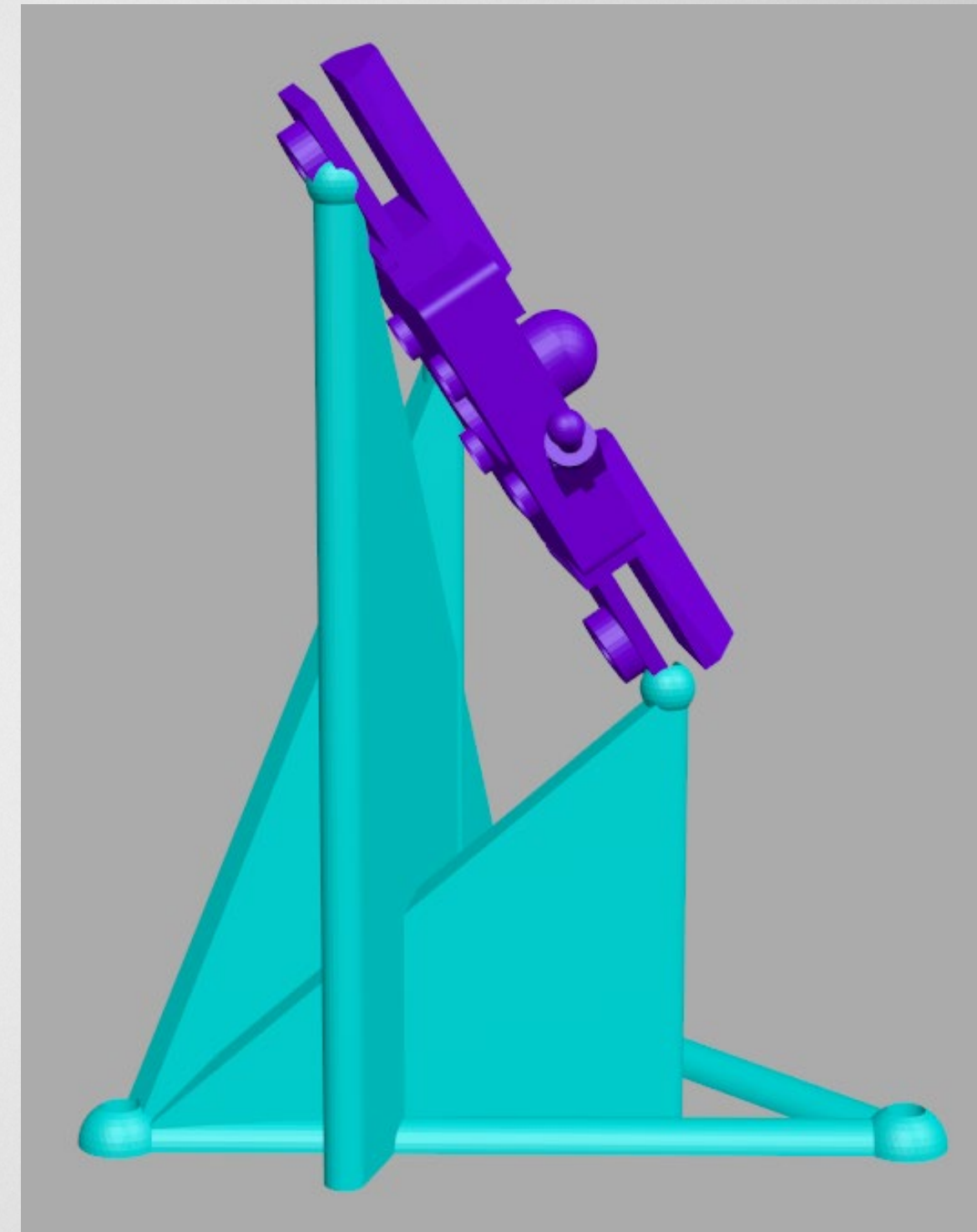


Ergebnis

Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM-Projekt

Digitaler Zwilling – Registrierung durch Verwendung einer Vorrichtung mit bekannter Geometrie /
Implementierung einer digital optimierten Probenhalterung

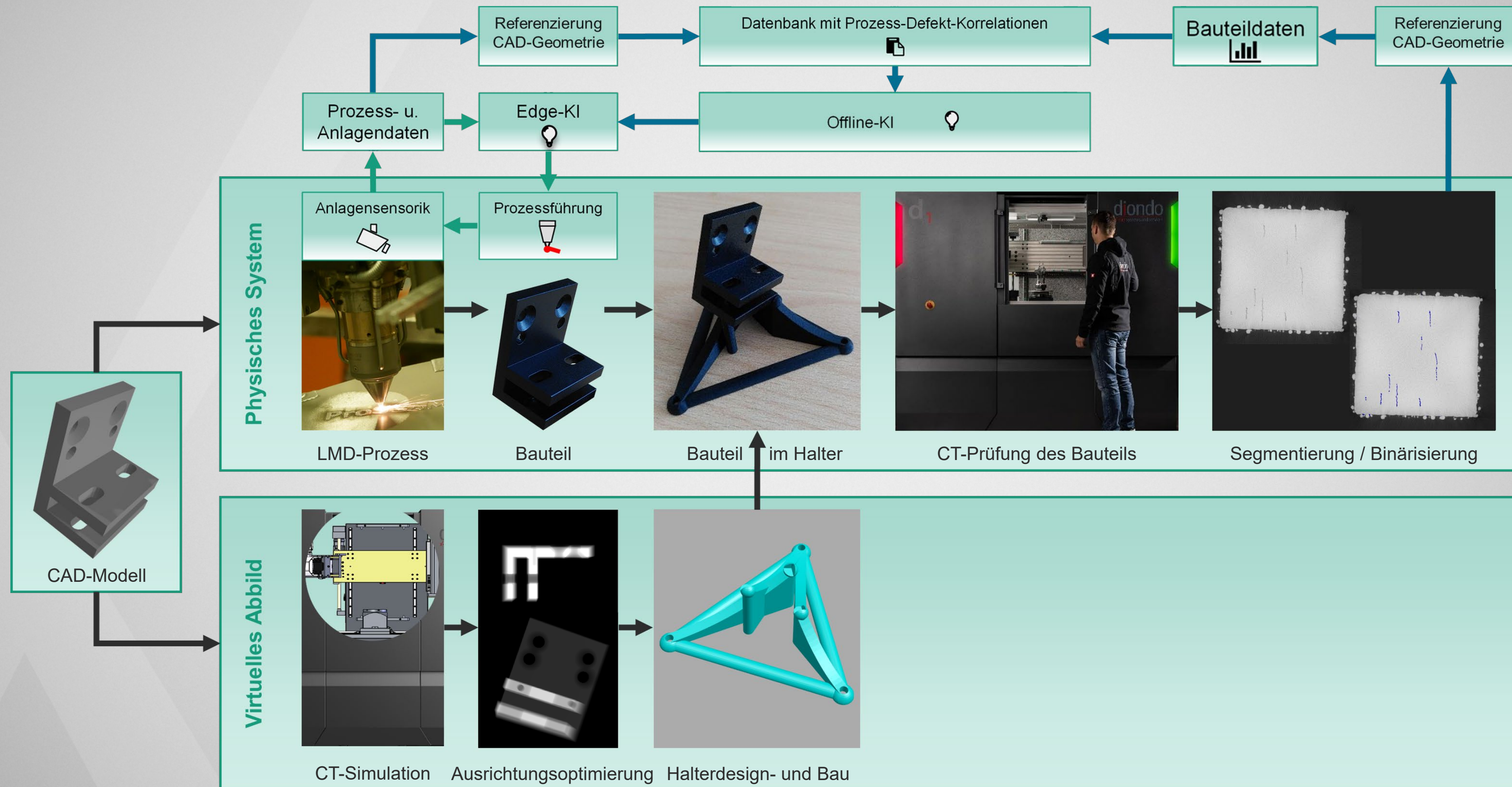
- Die praktische Umsetzung der ermittelten Position und Lage des Bauteils ist ein Beispiel für die physisch \Leftrightarrow virtuelle Synchronisation.
- Die Umsetzung ist in der Praxis nicht einfach zu realisieren, da die Proben in den meisten Fällen eine komplexe Form haben und daher in einem aufwändigen manuellen Prozess fixiert werden müssen.
- Lösung: Einsatz des polymeren 3D-Drucks zur schnellen Herstellung einer maßgeschneiderten Halterung.
- Es wurde ein automatischer Vorrichtungsgenerator entwickelt, um eine Vorrichtungsgometrie zu erstellen, die die gewünschte Probenposition unter Berücksichtigung der Einschränkungen des Fertigungssystems liefert.



Beispiel für eine automatisch generierte, 3D-druckbare Probenhalterung zur Positionierung eines Bauteils in einer bekannten, vorab berechneten Position und Lage

Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM-Projekt

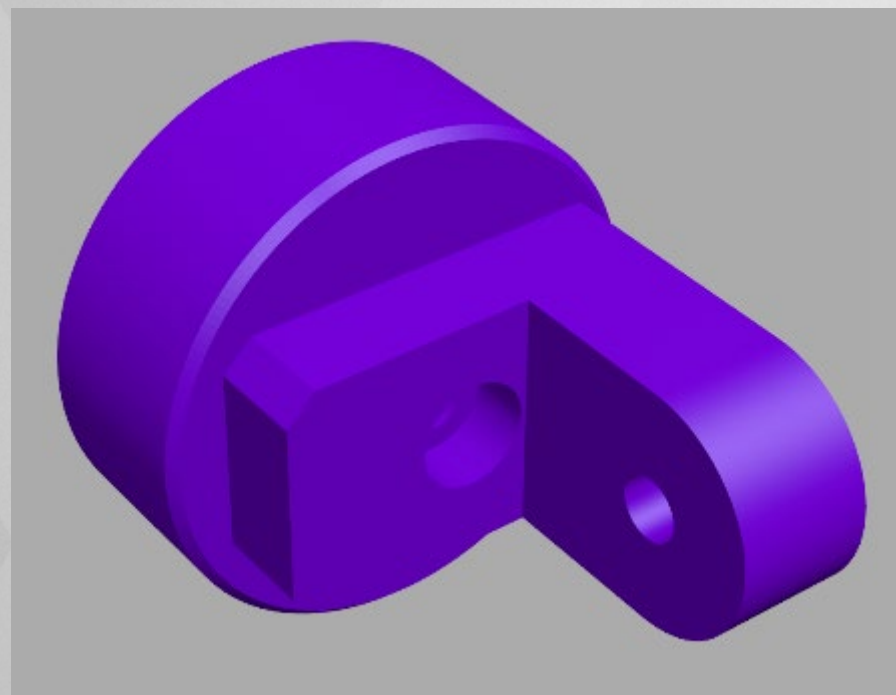
Digitaler Zwilling – Demonstration der Prozesskette



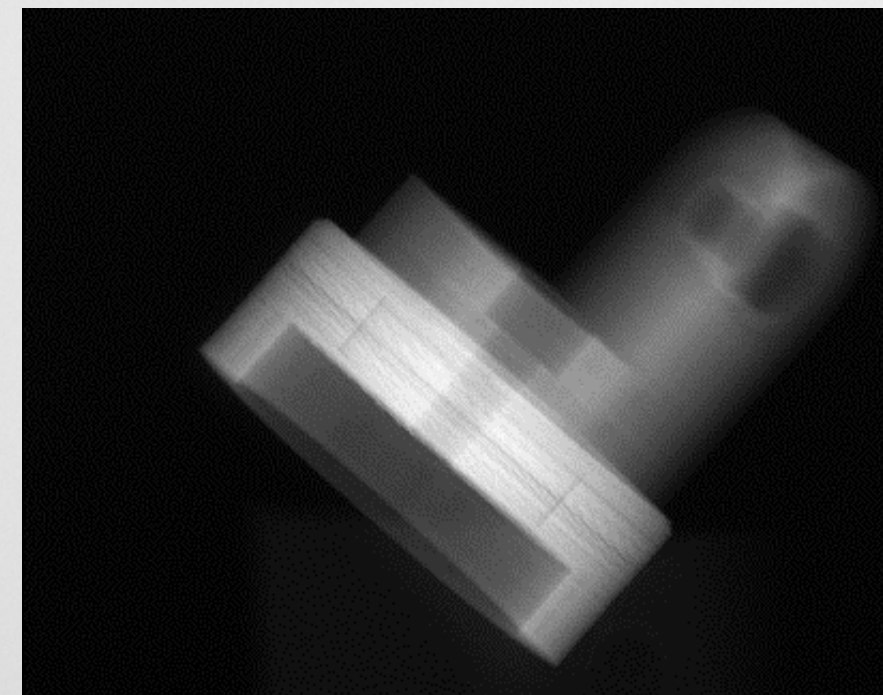
Aspekte von ZfP4.0 in dem ProSLAM-Projekt

Digitaler Zwilling – Registrierung durch Verwendung der Anfangsprojektion(en)

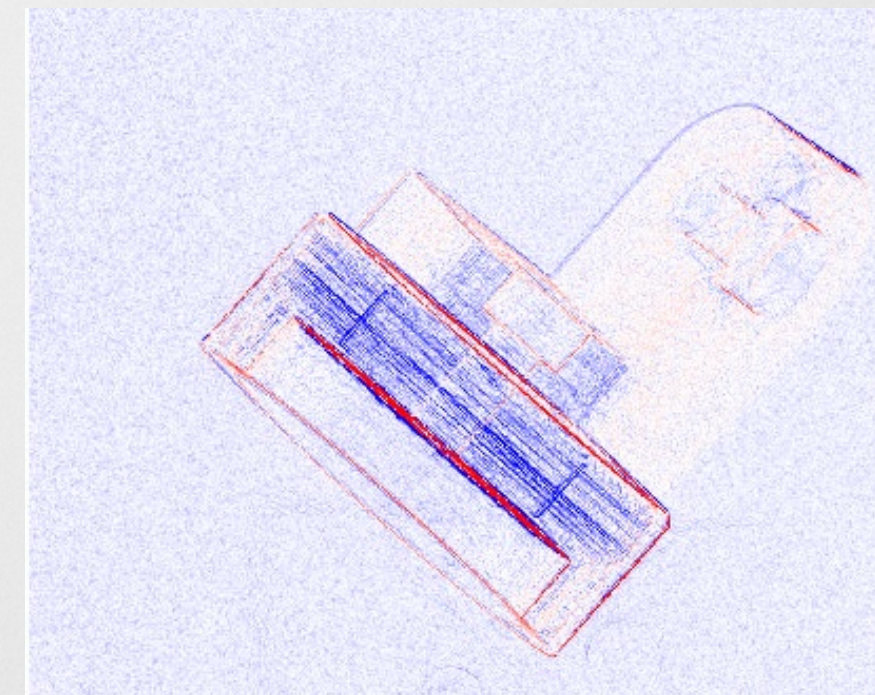
- Sollte die Fertigung einer maßgeschneiderten Halterung nicht möglich sein, ist eine Registrierung von Position und Lage des Bauteils aus der/ den anfänglichen Röntgenprojektion(en) bei bekannter Sollgeometrie eine interessante Alternative.
- Konzeptionell beruht die Vorgehensweise ebenfalls auf einer schnellen Simulation vieler möglicher Orientierungen des Bauteils, um eine Zielfunktion zu maximieren, die eine möglichst hohe Ähnlichkeit mit der vorgegebenen Bauteilgeometrie hat.
- In dem experimentellen Bild sind die einzelnen Schichten des im FDM-Prozess hergestellten Bauteils sichtbar, die nicht in dem simulierten Bild enthalten sind. Der Algorithmus ist robust genug, um kleinere Abweichungen in der Geometrie zu tolerieren.
- Es handelt sich um eine Optimierung mit 6 Freiheitsgraden mit hohem rechnerischem Aufwand.



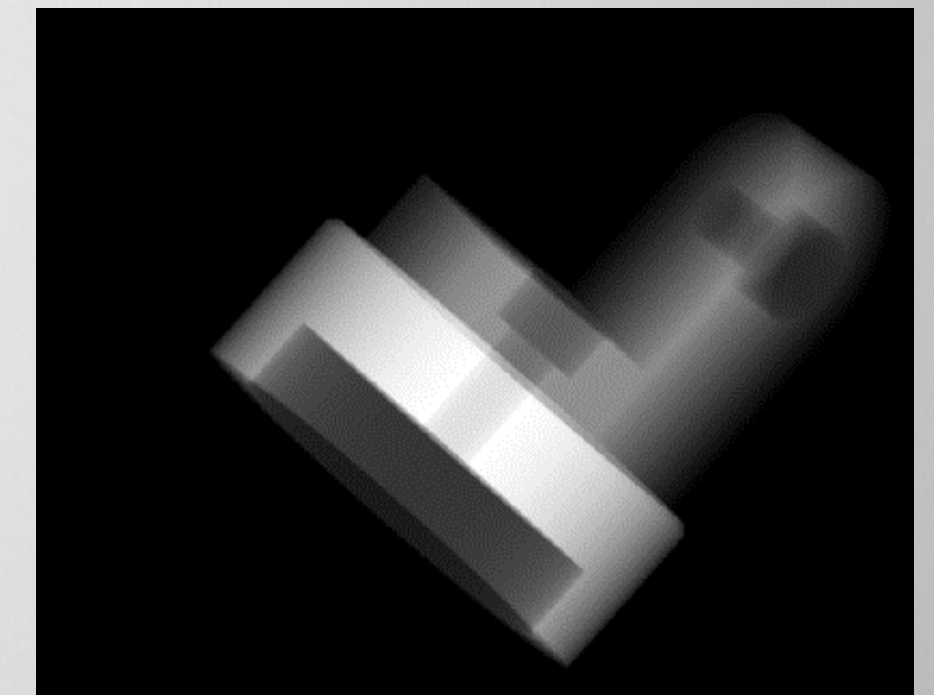
Rendering der Testgeometrie,
die mittels Polymer-3D-Druck
gefertigt wurde



Eingangsgröße:
Aufgenommene
Röntgenprojektion



Differenz der Gradientenbilder
zur visuellen Bewertung der
Anpassungsqualität



Berechnete entsprechende
Simulationsprojektion (Position
und Lage korrekt berechnet)

Zusammenfassung

- Das Förderprojekt ProSLAM treibt die additive Fertigung mittels Laserauftragsschweißen weiter voran
 - Dies führt zu einer größeren Akzeptanz, insbesondere bei neuen Anwendungen in der Herstellung, Reparatur oder Änderung von Bauteilen
- Das Förderprojekt beinhaltet beide Aspekte
 - ZfP für Industrie 4.0
 - Industrie 4.0 für ZfPvon ZfP 4.0.
- diondo steht bei diesen Entwicklungen an vorderster Front und leistet Pionierarbeit bei der Verwendung eines digitalen Zwillings der CT-Prüfung.



diondo

X-ray systems and services

Thank you for your attention

olaf.guennewig

@diondo.com | www.diondo.com

Ruhrallee 14

| D - 45525 Hattingen

| Tel. +49 2324 39319

- 33

| Fax +49 2324 39319

- 29

14