

Schlussbericht; Teil I: Kurzbericht

zum Teilvorhaben	Unterstützung der Nacharbeit additiv gefertigter Bauteile durch Integration adaptiver Bearbeitung in die Prozesskette
im Verbundprojekt	IDEA Industrialisierung von Digitalem Engineering und Additiver Fertigung (AM)
Zuwendungsempfänger	BCT GmbH Dortmund
Förderkennzeichen	13N15002
Laufzeit des Vorhabens	01.05.2019 – 31.07.2022
Berichtszeitraum:	01.05.2019 – 31.07.2022
Verfasser	Th. Kosche BCT GmbH t.kosche@bct-online.de

Die von BCT im Teilprojekt durchgeführten Arbeiten befassen sich im Wesentlichen mit der *Erfassung geometrischer Daten und deren Aufbereitung, der Integration adaptiver Bearbeitungen in den Produktionsprozess* sowie mit der *CAM-Vorbereitung zur Hybriden Fertigung*.

Der Grundgedanke einer adaptiven Bearbeitung besteht in der Anpassung von Bearbeitungen an die jeweiligen Gegebenheiten. Die Anpassung basiert dabei auf Messdaten, die auf dem aktuellen Bauteil aufgenommen werden. Da die Qualität dieser Daten direkten Einfluss auf das Ergebnis hat, ist eine präzise Erfassung erforderlich. Unter diesen Voraussetzungen erlaubt die Vorgehensweise die Bearbeitung individuell geformte Bauteile ähnlich einer Serienfertigung. Im Rahmen des BCT IDEA-Teilprojekts wurde untersucht, ob sich im Verlauf des Herstellungsprozesses bereits verfügbare geometrische Daten (z.B. Scan-Daten) für die Nachbearbeitungsschritte verwenden lassen.

Zur Validierung diente die Anwendung einer häufigen Nachbearbeitung von AM-Bauteilen, die in der Entfernung nicht mehr benötigter Hilfsgeometrien besteht. Hierbei sind die beim 3D-Druck auftretenden Verzüge zu beachten. Die Bearbeitung ist auf detaillierte Geometrie-Informationen angewiesen. Deren taktile Erfassung ist wegen damit verbundener langen Messzeiten oft nicht möglich und verhindert so die Automatisierung solcher Prozesse.

Zur Lösung referenzieren die in IDEA erarbeiteten und erprobten Verfahren hochauflösende optische Messdaten, aufgenommen innerhalb der Prozesskette, mit nur wenigen, in der Bearbeitungs-Maschine gemessenen Punkten, um sie für die Nachbereitung nutzbar zu machen. Nach Untersuchung unterschiedlicher Verfahren zur Referenzierung von Punktwolken wurden Verfahren zur Registrierung wie Iterative Closest Point und ein manuell gestütztes Verfahren implementiert. Nach der Referenzierung lassen sich damit die benötigten Informationen entweder direkt aus den Messpunkten entnehmen oder aber basierend auf den Punktwolken ermitteln. Das Verfahren wurde an den Demonstratoren erfolgreich erprobt.

Trotz hoher Qualität der AM-Bauteile ist eine mechanische Nachbearbeitung erforderlich, um beispielsweise Passungen zu erreichen oder Bereiche mit verbliebenen Stützstrukturresten zu bearbeiten. Adaptive Verfahren sind hierfür prädestiniert, da sie in der Lage sind, individuelle Geometrien zu berücksichtigen. Für die in IDEA als bedeutsam charakterisierten Aufgabenstellungen wurden im Projekt neue Methoden zum Blending erarbeitet und erprobt, mit denen sich Hilfselemente ohne merklichen Übergang entfernen lassen. Mit ähnlichen, ebenfalls neu erarbeiteten Methoden, wurden auch mit Sicherheits-Aufmaß versehene Bauteilbereiche erfolgreich bearbeitet (Siemens Energy Demonstrator). Ein sanfter Übergang der bearbeiteten Bereichen in die unbearbeiteten Flächen konnte erreicht werden.

Maßnahmen zur Verbesserung der Oberflächenqualität im Bereich der Stützstrukturanbindung wurden im Teilprojekt untersucht. Basierend auf detaillierten optischen Messdaten, die entweder extern oder per Laser-Linien-Scan innerhalb der NC-Maschine (BCT) aufgenommen wurden, erfolgt die Ermittlung lokaler Grenzen, die bei der mechanischen Bearbeitung nicht unterschritten werden dürfen. Diese an vordefinierten Positionen ermittelten Werte bilden die Basis für eine Adaption. Die grundsätzliche Eignung des Verfahrens konnte an Beispielen nachgewiesen werden. Darüber hinaus sind noch weitere Untersuchung zur Ermittlung der Grenzbereiche der Anwendung erforderlich.

Ein AM-Bereich mit zunehmender Bedeutung ist die Hybride Fertigung oder Reparatur von Bauteilen im Pulverbett. Im Gegensatz zu einer kompletten Herstellung von Bauteilen ergänzt die Hybride Fertigung bereits existierende Grundbauteile. Im Rahmen des IDEA-Projekts hat BCT Erfahrungen aus Reparaturanwendungen von Triebwerkskomponenten in eine Lösung eingebracht, die Material dort ergänzt, wo es zuvor durch Verschleiß reduziert wurde.

Wesentliche Anforderung ist, dass das „Fehlvolume“ die Form des individuellen Grundkörpers aufgreift, um so einen möglichst stufenlosen Übergang zu realisieren. BCT hat hier einen Ansatz erprobt, bei dem aus den Unterschieden zwischen dem CAD-Sollmodell des Bauteils und den Messungen des realen Bauteils ein Verformungsfeld abgeleitet wird. Diese Verformungen werden dann auf ein geschlossenes CAD-Modell angewendet, um das Fehlvolume zu ermitteln.

Das Verfahren wurde zunächst auf synthetischen Daten erprobt, dann um notwendig Ausrichtefunktionen ergänzt und schließlich praktisch an Hand eines Siemens Energy Bauteils erprobt. Trotz positiver erster Ergebnisse benötigt dieser Ansatz noch weiteren Entwicklungsaufwand, um auch mit nicht idealen, realen Messdaten sicher und zuverlässig arbeiten zu können.

Generell tragen die BCT-Arbeiten zu einer Steigerung der Automatisierung der erforderlichen Nachbearbeitungsprozesse bei.

Alle beschriebenen Arbeiten erfolgten in enger Abstimmung mit den Industriepartnern, um die praktische Anwendbarkeit im Fokus zu behalten. Der Austausch von Daten und Informationen lief in einem durch den Kooperationsvertrag geschützten Rahmen ab. BCT wird die Arbeiten an den in IDEA begonnenen Lösungen fortführen und in die bestehende Produktpalette integrieren.

Schlussbericht; Teil II: Eingehende Darstellung

zum Teilvorhaben	Unterstützung der Nacharbeit additiv gefertigter Bauteile durch Integration adaptiver Bearbeitung in die Prozesskette
im Verbundprojekt	IDEA Industrialisierung von Digitalem Engineering und Additiver Fertigung (AM)
Zuwendungsempfänger	BCT GmbH Dortmund
Förderkennzeichen	13N15002
Laufzeit des Vorhabens	01.05.2019 – 31.07.2022
Berichtszeitraum:	01.05.2019 – 31.07.2022
Verfasser	Th. Kosche BCT GmbH t.kosche@bct-online.de

BCT-Arbeiten im Arbeitspaket 2 „Scan to CAX“

Hintergrund

Entlang der AM Prozesskette ist die Kenntnis über den aktuellen geometrischen Bauteilzustand an verschiedenen Stellen von Bedeutung. Nach Entfernung von der Plattform kann die Geometrie des Bauteils erfasst werden, um den Verzug gegenüber dem Soll zu ermitteln. Weiterhin lässt sich mit diesen Informationen der digitale Zwilling des Bauteils aufbauen oder ergänzen.

Aus der Perspektive eines auf die adaptive Bearbeitung spezialisierten Unternehmens wie BCT stellt sich die Frage, ob und wie sich die im Prozessverlauf anfallenden geometrischen Daten für eine abschließende mechanischen Nachbearbeitung nutzbar machen lassen.

Eine solche Lösung spart nicht nur viel Nebenzeit, sondern hat darüber hinaus auch das Potential, die Qualität der Bearbeitungen durch Bereitstellung einer präziseren Datenbasis zu verbessern.

Die In-Prozess-Messung von Bauteilen innerhalb der Werkzeugmaschine, unmittelbar vor der eigentlichen Bearbeitung, ist eine anspruchsvolle Aufgabe in der Produktionsprozesskette. Taktile Messungen sind robust und genau, aber vergleichsweise zeitintensiv bei sehr geringer Punktdichte, während integrierte Linienscanner aufgrund von Zugänglichkeit, Oberflächeneigenschaften und notwendiger Kalibrierung möglicherweise nicht immer die gewünschte Genauigkeit liefern. Zusätzlich ist zu beachten, dass Endanwender Messungen auf der Werkzeugmaschine oft als unerwünschte Nebenzeiten betrachten.

Durchgeführte Arbeiten

Der erarbeitete Ansatz besteht darin, zunächst innerhalb der Prozesskette eine hochgenaue Messung (z.B. Streifenlichtprojektions-Scan) unter idealen Bedingungen durchzuführen. Für die Bearbeitung ist das Werkstück dann in der Bearbeitungsmaschine zu fixieren und die optische

Messung in Form eines triangulierten Netzes in Übereinstimmung mit der fixierten Position des Werkstücks zu bringen.

Lokale Registrierung

Um die benötigte Übereinstimmung der hochauflösenden optischen Messdaten mit den wenigen, in der Maschine erfassten Punktdaten herzustellen (Registrierung) werden entsprechende Algorithmen gesucht und validiert. Die Herausforderung besteht hier vor allem darin, die Koordinatensysteme automatisch aufeinander auszurichten, also die affine Transformation zwischen der extern erstellten optischen Messung und der maschinenintegrierten tastenden Messung zu finden.

Für diese sog. Punktsatzregistrierung sind verschiedene Algorithmen im Stand der Technik bekannt, welche sich in lokale und globale Algorithmen unterteilen. Die lokalen Algorithmen funktionieren bei kleinen Transformation zwischen den beiden Punktmengen, während globale Algorithmen keine solche Einschränkung haben.

Der ausgewählte und gebräuchlichste Algorithmus für die lokale Registrierung das Verfahren des *Iterativen nächsten Punkts* (Iterative Closest Point - ICP). Der ICP-Algorithmus beginnt mit einer anfänglichen Vermutung für die Lösung, welche die Transformation zwischen zwei Punktmengen (als Quelle und Referenz bezeichnet) darstellt. Dann werden iterativ drei Schritte angewendet:

1. Ermittlung des nächstgelegenen Punkts in der Referenz für jeden Punkt in der Quelle.
2. Aktualisierung der Lösung, um ein gewisses Maß an Fehlern zu minimieren.
3. Anwendung die aktualisierte Lösung auf die Referenz.

Zum Test wurde der ICP-Algorithmus implementiert und auf ein Demonstrator-Bauteil aus dem Projekt angewendet. Das Teil wurde dazu extern optisch vermessen (Streifenlicht-Projektion). Die Ermittlung der zur Registrierung nötigen Messpunkte erfolgte zunächst synthetisch, direkt auf dem Modell und später real durch taktile Messung innerhalb der BCT eigenen Werkzeugmaschine. Der Algorithmus wurde mit unterschiedlichen Verteilungen der Messpunkte auf dem Bauteil und variierenden Transformationsgrößen getestet, um die Stabilität zu quantifizieren.

Die Messpunkte wurden auf verschiedene Arten ermittelt (Abb. 1):

- Anordnung der Punkte auf Ecken: Variation der Punktzahl
- Anordnung der Punkte, teilweise abdeckend: Eine oder beide Seiten des Bauteils.
- Anordnung der Punkte mit vollständiger Bauteilabdeckung: Eine Seite, eine Seite plus Ecken, beide Seiten.

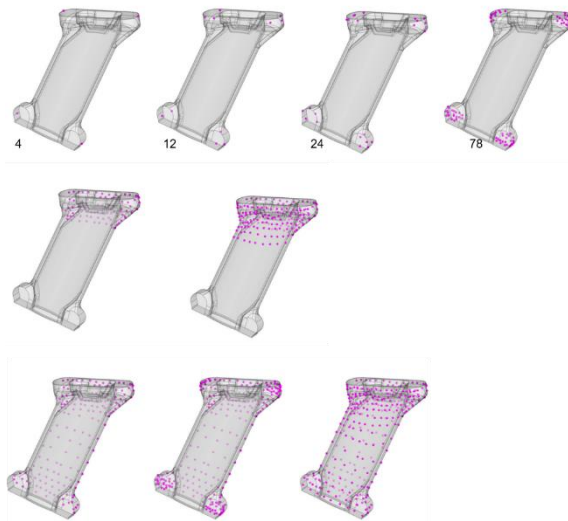


Abbildung 1: Verschiedene Messpunkt-Anordnungen. Oben: Punkte auf den Ecken.
Mitte: Punkte teilweise abdeckend. Unten: Punkte auf gesamtem Bauteil.

Im Versuch wurden die Messergebnisse mit kleinen, mittleren und großen Versätzen transformiert und zusätzlich mit einer kleinen Zufallskomponente beaufschlagt. Das Ergebnis der ICP-Berechnungen wurde dann mit der bekannten Eingangstransformation verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 zusammengefasst, und geben die Anzahl der erfolgreich ermittelten Transformationen bei 100 Versuchen an.

		Abweichungen, Chaos →						
Anzahl Punkte	Punkt Verteilung	Transformation						
		klein			mittel			groß
		Translation	Rotation	Kombi	Translation	Rotation	Kombi	Kombi
	Ecken 4	0	0	0	0	0	0	0
	Ecken 12	0	0	0	0	0	0	0
	Ecken 24	100	100	100	100	100	100	62
	Ecken 78	100	100	100	100	100	100	64
	Teilweise, eine Seite	0	0	0	0	0	0	0
	Teilweise, zwei Seiten	0	0	0	0	0	0	0
	Gesamt, eine Seite	0	0	0	0	0	0	0
	Gesamt; eine Seite+ Ecken	100	100	100	100	100	100	66
	Gesamt 2 Seiten	100	100	100	100	100	100	72

Abbildung 2: Die Ergebnisse; Anzahl der erfolgreichen Ermittlung bei 100 Versuchen

Die Ergebnisse zeigen, dass der ICP-Algorithmus für Transformationen kleiner und mittlerer Versätze zwischen den Koordinatensystemen für dieses Teil funktioniert, wenn genügend Punkte an den Ecken ausgewählt sind. Eine stabile automatische Berechnung ist aber nicht möglich, wenn die Messpunkte das Bauteil nur teilweise bedecken. Eine Berechnung der Transformation funktioniert auch, wenn Punkte auf dem gesamten Bauteil, auf einer Seite mit Eckpunkten oder auf beiden Seiten ausgewählt werden!

Globale Registrierung

Nach diesen Untersuchungen finden das ICP und seine Varianten schnell und zuverlässig die Lösung für lokale Probleme, scheitern jedoch bei globalen Fällen. Es wird laufend geforscht, um globale Algorithmen zu finden, die die Lösung in angemessener Zeit ermitteln können. Einer dieser Algorithmen ist *Globally optimal ICP* (Go-ICP).

Um die Leistungsfähigkeit dieses Algorithmus zu testen, wurde er auf Eignung für die Registrierung der Demonstrator Bauteile untersucht. (Abb. 3)

Zum Test wurden die Bauteile sowohl extern optisch (Streifenlichtprojektion) als auch mit einem Messtaster angetastet. Der Algorithmus wurde verwendet, um die unbekannte Transformation zwischen den beiden Datensätzen zu finden. Es wurden wieder unterschiedliche Anzahlen von Punkten verwendet, um zu prüfen, wie viele taktile Messungen für eine erfolgreiche Berechnung notwendig sind.

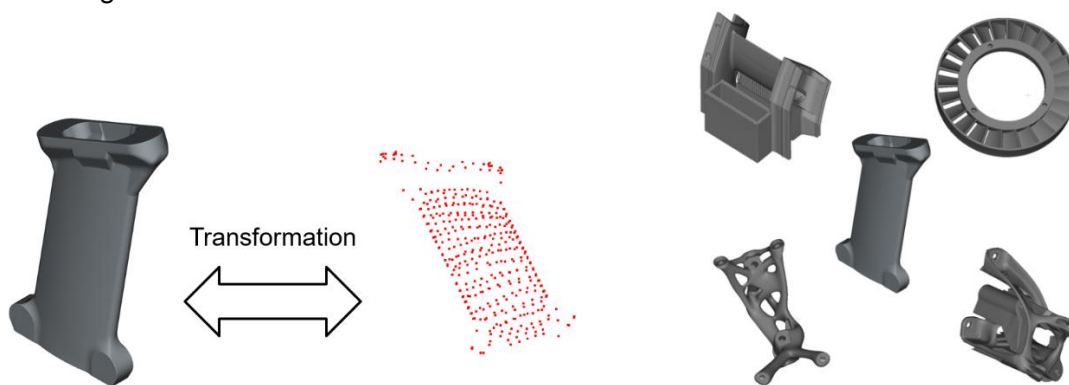
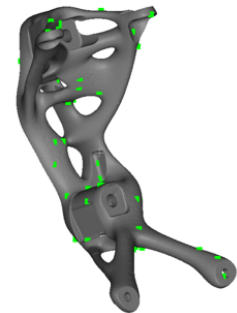
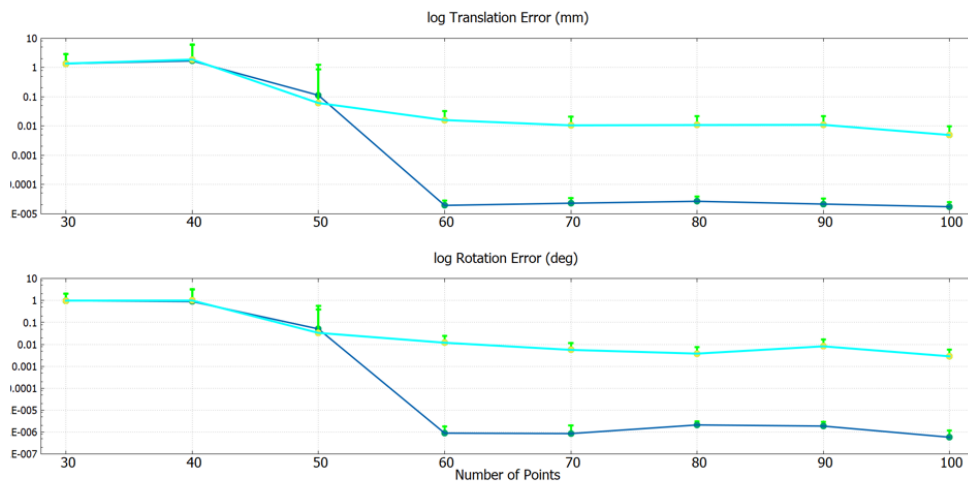


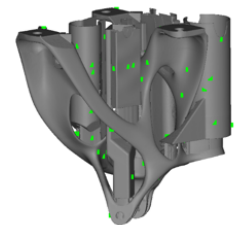
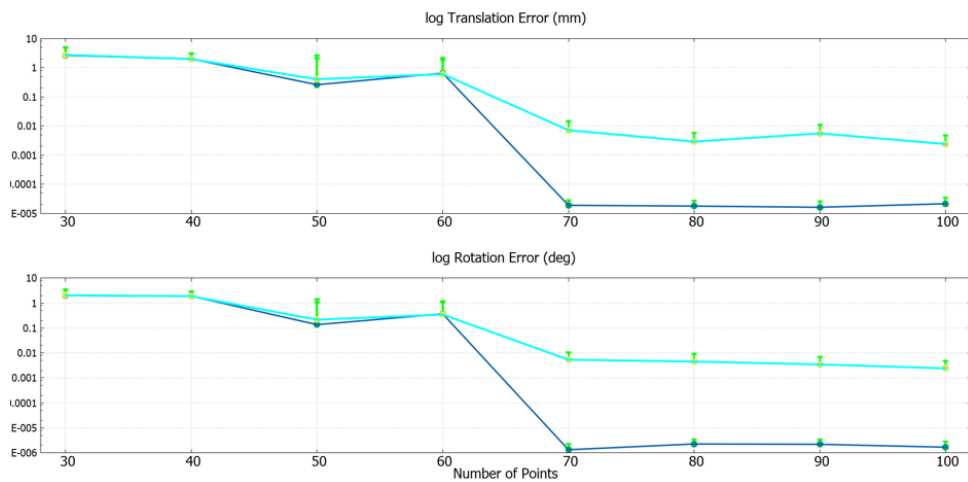
Abbildung 3: Die globale Registrierung versucht, die unbekannte Transformation zwischen zwei Messungen zu finden (links). Die 5 im IDEA-Projekt verwendeten Demonstrator-Bauteile (rechts).

Aus den Ergebnissen (Abb. 4) kann geschlossen werden, dass etwa 40 bis 70 Punkte ausreichen, um eine globale Registrierung für die vergleichsweise komplexen IDEA-Teile durchzuführen.

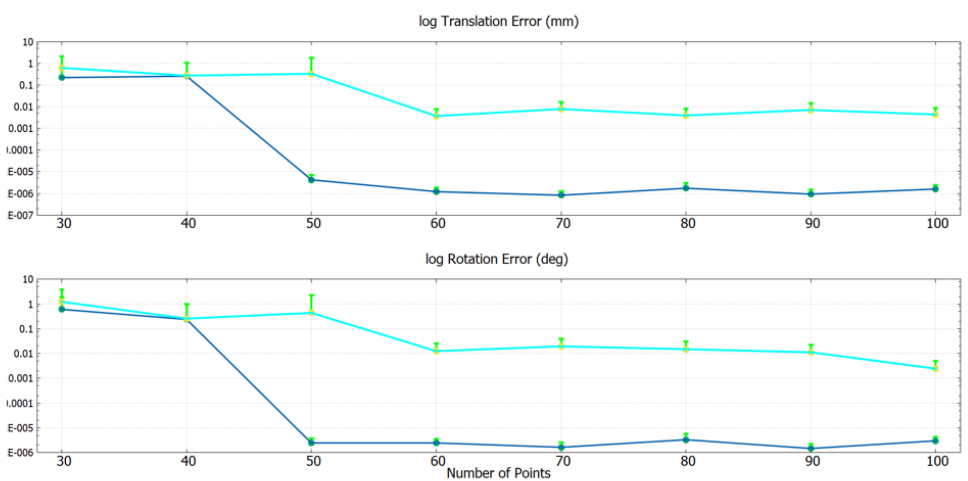
Bei symmetrischen Teilen wie dem Düsenring ist das Problem jedoch mathematisch unzureichend definiert und es existiert keine eindeutige Lösung. Für solche Fälle sollten andere Merkmale verwendet werden, um eine globale Registrierung zu erreichen.



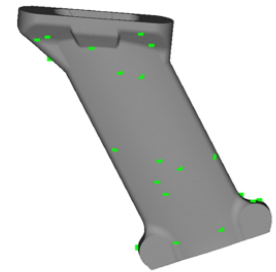
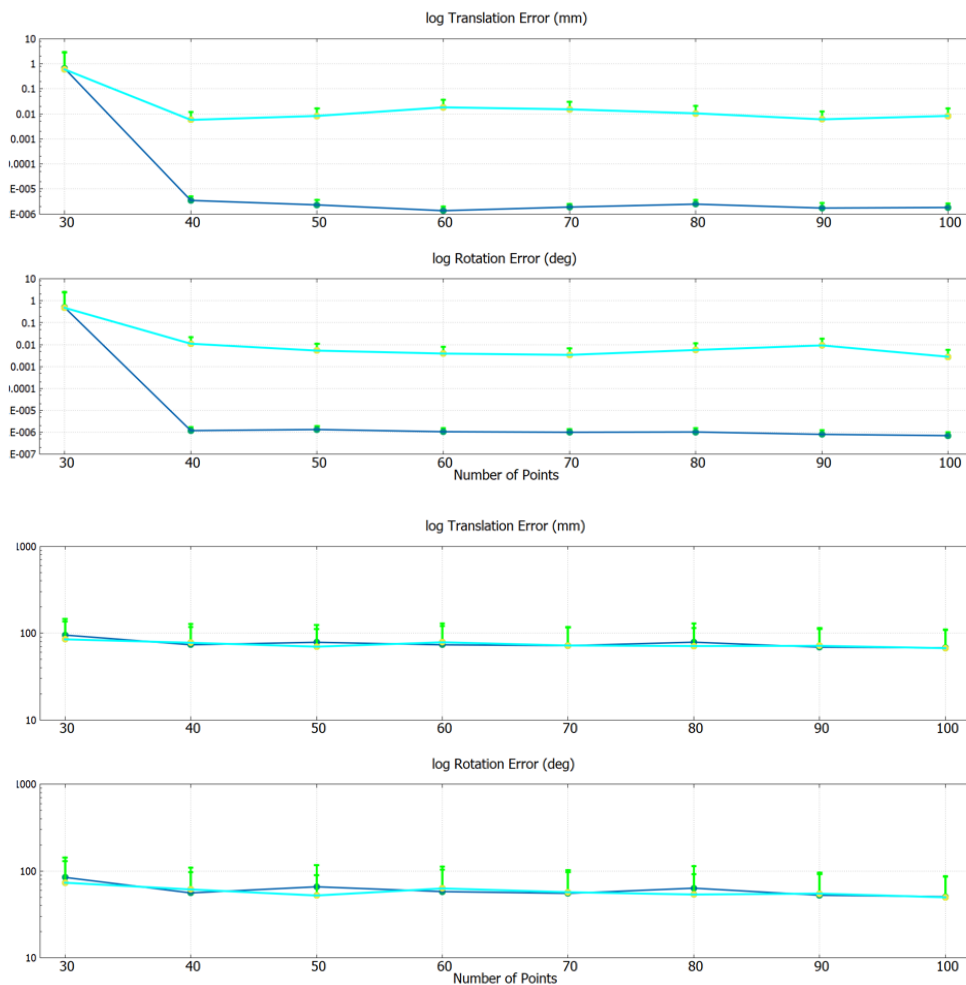
60 Points



70 Points



60 Points



40 Points

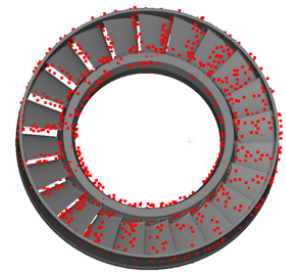


Abbildung 4: Die Ergebnisse der globalen Registrierung mit unterschiedlicher Punktzahl für alle IDEA-Demonstratoren. Daten hellblau mit Messrauschen, blau ohne

Das Ergebnis zeigt, dass mit Ausnahme des symmetrischen Bauteils alle Bauteile mit 40 bis 70 Punkten registriert werden können.

Dies belegt, dass diese Methoden eine Registrierung unterschiedlicher Punktemengen durchführen und so die detailliert vorliegenden optischen Messungen direkt für die Nachbearbeitung erschließen können.

Globale Registrierung mit manueller Unterstützung

Basierend auf den Erkenntnissen der obigen Untersuchung hat BCT in IDEA zusätzlich eine Referenzierungsmethode erarbeitet, die auf einer manuellen Unterstützung beruht. So lassen sich auch weit auseinanderliegende Datenmengen für die Bearbeitungsaufgaben des Projekts nutzen.

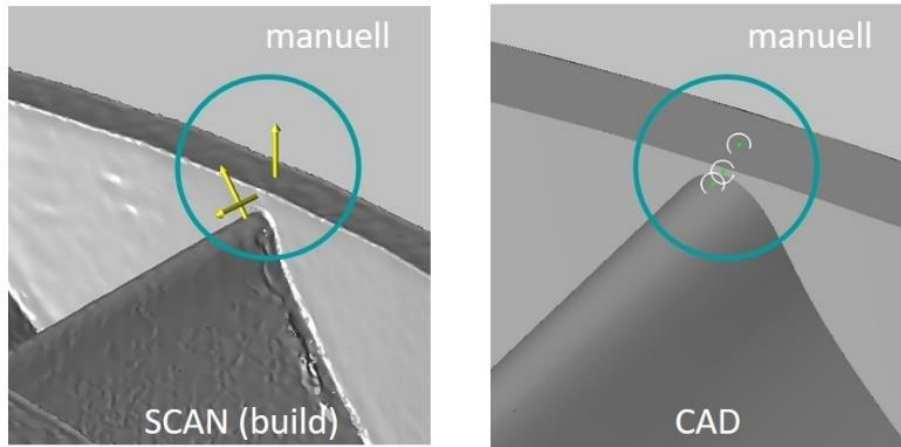


Abbildung 5: Methode: Referenzierung mit manueller Unterstützung (links) Setzen der Punkte auf den SCAN-Daten, (rechts) Setzen korrespondierender Punkte auf dem CAD-Modell.

Die Methode wurde in die BCT Rahmensoftware OpenARMS-idea implementiert und im weiteren Verlauf des Projekts in AP09 erprobt.

Scan von Bauteilen

Neben den Untersuchungen zur Referenzierung hat BCT im Projekt Scan-Aufgaben erfüllt, um eine möglichst breite Datenmenge für einen Systemvergleich bereitzustellen.

Das WZL-Testbauteil wurde hierzu mit der BCT-Software OpenScan für das maschinenintegrierte Laserlinienscannen vermessen. Das Teil sowie der resultierende Scan sind in Abbildung dargestellt.

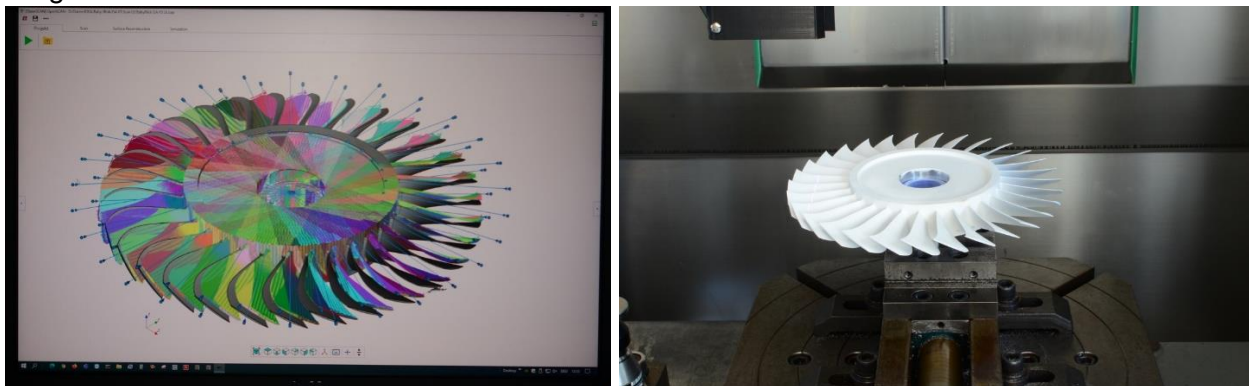


Abbildung 6: Der WZL-Demonstrator gescannt mit BCT-Software.

Zur Erhöhung der Datenqualität hat BCT die notwendige Sensorkalibrierung verfeinert. Die jetzige Lösung ist in der Lage, auch zeitliche Versätze zwischen dem Auslösen des zum Start des Scanvorgangs notwendigen Triggersignals und der eigentlichen Aufnahme der Daten zu kompensieren. Zusätzlich werden Montage-ungenauigkeiten ausgeglichen.

Notwendigkeit/Angemessenheit der Projektarbeiten

Um die oben dargestellten Untersuchungen durchführen zu können, war zunächst eine intensive Einarbeitung in die Problematik der Registrierung erforderlich. Umfangreiche Recherchen zu Beginn der Arbeiten führten zur Ermittlung „Erfolg versprechender Algorithmen“.

Zum Test der Algorithmen mussten diese in die BCT-Software-Umgebung eingebunden werden, Schnittstellen zu den Eingangsdaten waren bereitzustellen.

Die Untersuchungen basierten dann auf den im Konsortium verfügbaren Messdaten und Demonstratoren, sowie auf denen bei BCT selbst durchgeführten Messungen auf einer 5-Achs Fräsmaschine. Die Arbeiten wurden bei regelmäßigen Projekttreffen vorgestellt und besprochen.

Um die in IDEA verfügbaren Daten innerhalb der BCT-Umgebung nutzen zu können, wurde zusätzlich eine manuell unterstützte Registrierung erarbeitet und ebenfalls in die BCT Software integriert.

Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse, Planungen

Die Registrierung, oder vereinfacht ausgedrückt die „Nutzbarmachung“, extern aufgenommener detaillierter Messwerte für die adaptive Bearbeitung stellt einen großen Fortschritt dar.

Aufgabenstellungen und Bauteile, die mittels adaptiver Methoden bearbeitet werden, nehmen an Komplexität stetig zu. Dies erhöht die Anzahl benötigter geometrischer Informationen in einer Weise, die sich durch taktiles Messen allein nicht mehr bereitstellen lässt. Soll z.B. an einem AM Bauteil eine Hilfsgeometrie entfernt werden, so ist die Kenntnis der Umgebung für eine „Nacharbeit“ zwingend erforderlich. Je nach Größe sind hierzu jedoch so viele Punkte nötig, dass sie nicht mehr sinnvoll mit der NC-Bearbeitungsmaschine aufgenommen werden können.

Die Registrierung automatisch oder manuell unterstützt, eröffnet hier neue Lösungsansätze, da direkt auf einer detaillierten Darstellung der IST-Geometrie aufgesetzt werden kann.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt fließen direkt in die BCT-Produktpalette ein und stellen hier die Aktualität der Lösungen sicher.

Bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen

Die Algorithmen zur Registrierung werden aktuell weiterentwickelt. Auch diese Ergebnisse lassen sich nach Test auf Eignung in die BCT-Lösung integrieren. Fortschritte anderer Stellen, die die Verwendung der IDEA-Ergebnisse für BCT verhindern, sind im Verlauf des Projekts nicht bekannt geworden.

Geplante Veröffentlichungen

Die Beiträge von BCT zum Projekt werden in dem IDEA Whitepaper Anfang 2023 veröffentlicht.

BCT-Arbeiten im Arbeitspaket 5 „Hybrid-AM“

Hintergrund

Pulverbett-basierte AM Verfahren eignen sich nicht nur zur Herstellung kompletter Komponenten, sondern sind auch in der Lage, Material auf bereits existierende, konventionell erstellte Bauteile/ Grundkörper auf ebenen Flächen aufzutragen. Hierbei unterscheidet man die Neuteilfertigung mit einer sehr späten Individualisierung der Komponenten von Reparaturanwendungen.

Die Reparaturanwendungen sind aus Sicht von BCT relevant, da bei typischerweise mit BCT-Systemen bearbeiteten Bauteilen, verschlissene, abgenutzte Bereiche durch Materialauftrag und anschließende Reprofilierung repariert werden. Für BCT ist es wichtig, sich frühzeitig mit Technologien zu beschäftigen, die das Potential haben, den bisherigen Ablauf durch einen hochgenauen 3D-Druck-Prozess ersetzen zu können.

Bei hybriden AM-Verfahren wird das Grund-Bauteil mit waagerechtem Abschluss in Pulver eingebettet. Die Herausforderung besteht zum einen in der passgenauen Bereitstellung der aufzubauenden Geometrie, zum anderen in der exakten Platzierung des Bauvolumens.

Basiert die Neuteilfertigung auf der Verwendung definierter unveränderlicher Geometrien, so muss die Reparatur entstandene Formabweichungen berücksichtigen, die wegen der Komplexität der Bauteile nicht zwangsläufig zu deren Ausmusterung führen.

Durchgeführte Arbeiten

Im Arbeitspaket AP05 wurde ein Lösungsansatz zur Berechnung des neu aufzubauenden Volumens unter Berücksichtigung der individuellen Ausprägung der Grund-Geometrie erarbeitet.

Das zu berechnende Bauvolumen muss die Formänderung des Bauteils aufnehmen und weiterführen. Diese Aufgabenstellung ist daher vergleichbar mit der von BCT entwickelten Methode aus der Luftfahrtanwendung zur Triebwerksschaufel-Tip Reparatur, bei der verschlissene Bereiche entfernt, Material z.B. mittels Laserauftragschweißen aufgetragen und anschließend reprofiliert wird.

Der Unterschied zur IDEA-Aufgabenstellung besteht in der Anforderung des AM-Prozesses, ein geschlossenes Volumen für den 3D-Druck bereitzustellen, während bei der Tip-Reparatur eine Anpassung auf Flächenbasis erfolgt und innere Kavitäten und Details unbeachtet bleiben.

Nach Aufgaben-Spezifikation und Abschätzungen der Möglichkeiten innerhalb der existierenden BCT-Software wurde entschieden, einen volumenorientierten Ansatz zu wählen. Mögliche Software-Systeme, die Unterstützung bieten könnten wurden evaluiert. Basierend darauf wurde der nachfolgend beschriebene 4-stufige Lösungs-Ansatz gewählt.

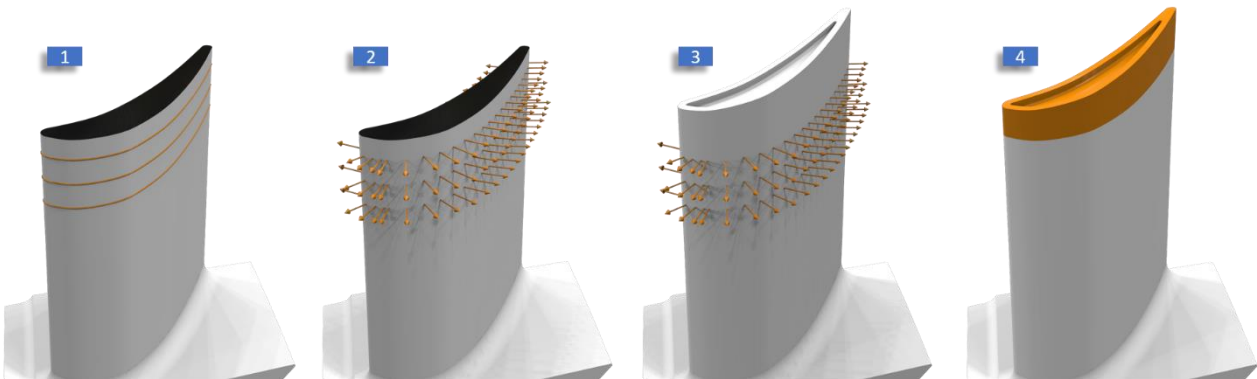


Abbildung 7: Volumenorientierter Lösungsansatz

Das CAD-Modell mit vollständiger Geometrie des nominalen Bauteils und die gescannte Oberfläche des zu reparierenden Bauteils bilden die Eingabedaten.

Analog zur Konstruktion von Turbinenschaufeln werden für die Berechnung des Aufbauvolumens zunächst Schnitte definiert (1). In Schritt (2) werden darauf die Abweichungen (überhöht dargestellt) zwischen dem realen Bauteil und dem CAD-Modell ermittelt. Voraussetzung dafür ist eine vorgelagerte möglichst genaue Referenzierung beider Datensätze (siehe Beschreibung der Arbeiten unter AP02).

Der untersuchte globale Verformungsansatz verwendet die Abweichungen, um damit das vollständige, nominale CAD-Modell zu verändern (3). Da die Abweichungen das CAD-Modell prinzipiell in die entsprechenden Richtungen „ziehen“ bleibt das Volumen erhalten. Die inhärenten geometrische Zwangs-Bedingungen sorgen dafür, dass sich Änderungen nicht nur lokal am Messpunkt auswirken, sondern in einer globalen Verformung resultieren.

Berechnet wird damit ein Volumen, welches die Abweichungen der individuellen Schaufel zum CAD-Modell berücksichtigt. Es kann komplett oder in Teilbereichen ausgegeben werden (4).

Wegen der zunächst eingeschränkten Verfügbarkeit realer Daten wurden für die ersten Erprobungen direkt vom CAD-Modell abgeleitete Verformungen verwendet. Folgender Ablauf wurde hierbei umgesetzt:

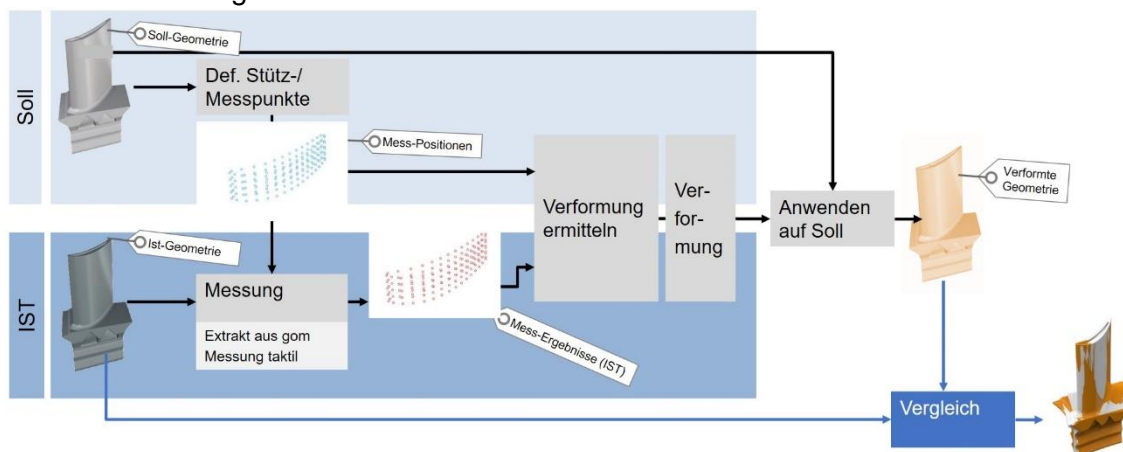


Abbildung 8: Vorgehensweise

- Festlegung der Messpunkte auf dem CAD-Modell. Verteilung basiert auf BCT-Erfahrungen aus der Tip-Reparatur
- Messung des Bauteils (zunächst simuliert)
- Ermittlung der Abweichungen zwischen CAD und Bauteil (Verformungen simuliert)
- Anwendung der Verformungen auf das CAD-Modell der Sollgeometrie
- Vergleich zwischen Messung der Verformung und berechnetem verformtem CAD-Modell

Im Idealfall sollte die berechnete verformte Geometrie der realen, verformten Schaufel entsprechen, so dass nur geringe Unterschiede zwischen beiden Datensätzen erwartet werden.

Das gerenderte Ergebnis in Abbildung 9 zeigt bereits eine gute Übereinstimmung im relevanten Tip-Bereich. Im Übergang zur Plattform auftretende Verformungen sind nicht relevant und lediglich Auswirkungen der Form-Änderung im oberen Bereich.

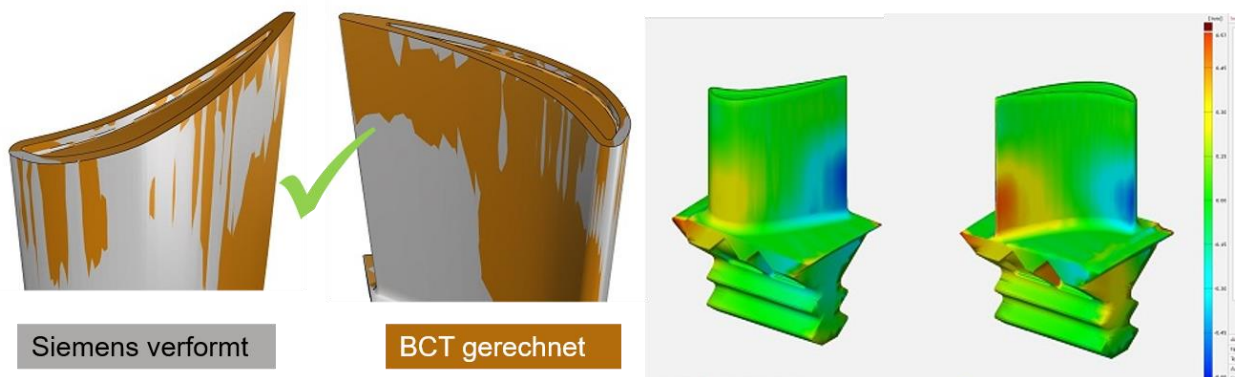


Abbildung 9: Gegenüberstellung der rechnerisch verformten Schaufel (Simulation des IST - Zustands) und der berechneten Verformung

In einem nachfolgenden Schritt der Erprobung wurden Scan-Daten einer real verformten Schaufel verwendet. Diese Daten lagen nicht mehr ideal im CAD-Koordinatensystem vor, was die Implementierung einer vorbereitenden Ausrichtung der Datensätze erforderlich machte. Ohne eine solche Ausrichtung würden auch durch Lageabweichungen hervorgerufene Unterschiede mit in die Verformungsberechnung einfließen und damit das Ergebnis unzulässig verfälschen.

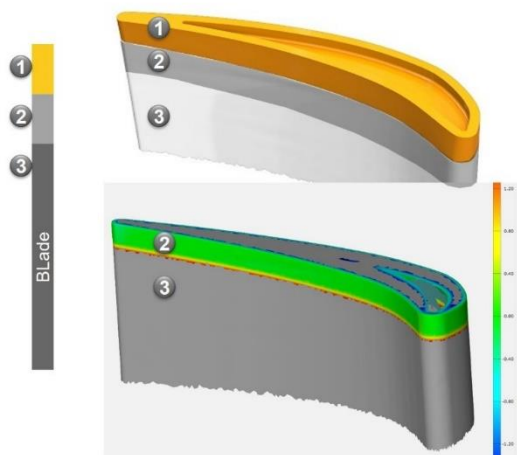


Abbildung 10: Ergebnis einer Berechnung (oben), und Vergleich mit den Messdaten der realen Schaufel (unten). Vergleich nur im Bereich der in beiden Elementen vorhanden ist.

Abbildung zeigt, dass die Abweichungen innerhalb des untersuchten Bereichs sehr klein sind. Die schmale obere Kante (blau) im unteren Teil mit größeren Abweichungen wird durch die Verrundung der STL-Daten in der Scandatenverarbeitung hervorgerufen und stellt für die Bearbeitungen kein Problem dar.

Es hat sich gezeigt, dass der gewählte und erprobte Softwareansatz, ausgehend von Messungen an realen Bauteilen, Bereiche rekonstruieren und als Volumen für ein hybride Reparatur im Pulverbett zur Verfügung stellen kann. Weitere Tests mit realen „raueren“ Daten haben jedoch gezeigt, dass die Methode empfindlich auf die Welligkeit der Eingangsdaten reagiert und die auf die Ausgaben überträgt. Im Hinblick auf eine industrielle Lösung sind hier noch Datenvorbereitungen vorzuschalten, um diese Effekte zu mildern.

Notwendigkeit/Angemessenheit der Projektarbeiten

BCT hat die Arbeiten in enger Abstimmung mit Trumpf und Siemens-Energy durchgeführt. Die Softwareentwicklungen wurden bei BCT basierend auf der existierenden Software zur adaptiven Bearbeitung OpenARMS in Kombination mit einer neuen Software-Bibliothek durchgeführt. Das Erzeugen der ersten Testdaten auf manueller Basis hat dabei Zeit in Anspruch genommen, war aber wegen der nicht verfügbaren Echt-Daten zwingend erforderlich. Zur Referenzierung der Datensätze CAD und Messdaten wurden Verfahren eingesetzt, die zuvor in IDEA entwickelt worden sind. Die Arbeiten wurden zur Sicherung der Transferfähigkeit der Ergebnisse analog zur technischen Vorgehensweise in kommerziellen Anwendungen durchgeführt.

Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse, Planungen

Sowohl die Untersuchungen über eine mögliche Herangehensweise als auch die Recherche zu möglichen Software-Tools haben BCT einen tieferen Einblick in die Problematik einer globalen Verformung von CAD- oder STL-Datensätzen ermöglicht.

Mit dem erprobten Ansatz konnte gezeigt werden, dass mit Eingangsdaten guter Qualität hinsichtlich Dichte und Glattheit für die automatisierte Reparatur verwendbare Ergebnisse erzielt werden können. Eine allgemeine Verwendbarkeit der Software ist jedoch im aktuellen Zustand noch nicht gegeben, da hierzu die bisher eingesetzten Einzelkomponenten zu einer Gesamtlösung zu integrieren und weitere Daten-Vorbereitungen zu implementieren sind.

Darüber hinaus sind die Kosten für das eingesetzte Tool immer noch sehr hoch, was bei der Konzeptionierung einer marktreifen Software ein Hemmnis darstellen kann.

Bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen

Verfahren zur Reparatur von Turbinenbauteilen durch pulverbettbasierte Verfahren werden inzwischen von einem Triebwerks-Hersteller eingesetzt. Nach den verfügbaren Informationen wird jedoch davon ausgegangen, dass hierbei keine Anpassung der Bauvolumen an die Geometrie der einzelnen Bauteile erfolgt und somit eine weitere Nachbearbeitung weiterhin erforderlich ist, um verbleibende Überstände zu beseitigen. Ein ähnliches Vorgehen wurde auch in einem von Lufthansa Technik geleiteten LuFo-Projekt realisiert.

Geplante Veröffentlichungen

Wegen des prototypischen Charakters der Arbeiten sind aktuell bis auf eine Darstellung im IDEA-Whitepaper keine gesonderten Veröffentlichungen geplant.

BCT-Arbeiten im Arbeitspaket 9 „Nachbearbeitung“

Kosteneffiziente Referenzierungskonzepte

Hintergrund

Trotz steigender Qualität des 3D-Drucks ist eine Nachbearbeitung gedruckter Bauteile zur Verbesserung der Oberflächenqualität oder zur Erstellung von Pass- und Anschlussflächen erforderlich, die an definierten Positionen auf dem Bauteil erfolgen muss.

Zwar können sehr genaue Aufspannungen die Positionierung der Bearbeitungen unterstützen, müssen dabei aber die Abweichungen von Bauteil zu Bauteil tolerieren. Alternativ lassen sich Lage-Korrekturen der Bearbeitungsprozesse softwaretechnisch basierend auf der Erfassung der Ist-Situation realisieren. Diese Lösung reduzierten den Vorrichtungsaufwand erheblich.

Durchgeführte Arbeiten

Die in IDEA erarbeitete Lösung realisiert eine Bauteil-Ausrichtung mit erweiterten BestFit-Methoden, die sich zusätzlich durch Nebenbedingungen an Anwendungsfälle anpassen lassen. Die Berücksichtigung durch Vorrichtung oder Aufgabe vorgegebene Einschränkungen macht diese Methode deutlich flexibler als NC-integrierte Funktionen.

Maschinen-integriertes taktiles Messen von Bauteilen zu Kontrollzwecken oder zur Ermittlung von Lage/Orientierung ist gängige Praxis. Die Messungen liefern punktweise Informationen, deren Anzahl jedoch durch die relativ langen Messzeiten von ca. 2-3 s pro Messpunkt limitiert sind. Im Gegensatz dazu liefern optische Messverfahren sehr viele Informationen in kurzer Zeit. Diese Messungen erfolgen entweder extern oder seltener direkt in der Bearbeitungsmaschine.

Basierend auf den in AP2 durchgeführten Vorarbeiten wurde untersucht, wie die aus optischen Messungen resultierenden detaillierten Informationen zu einem Bauteil an anderer Stelle der Prozesskette eingesetzt werden können. Um das Potential dieser Datenmenge auszuschöpfen, soll sich die taktile Messung in der Bearbeitungsmaschine auf die Erfassung von Position/Lage des Bauteils beschränken.

Die Abbildung skizzierte Aufgabe „Entfernung der Finne und Überblendung des bearbeiteten Bereichs in den unbearbeiteten Bereich“, diente der Validierung des Ansatzes.

Das Testszenario geht davon aus, dass die optische Messung des Bauteils vor der eigentlichen Bearbeitung erfolgt ist. Die Daten liegen (1) in einem eigenen Koordinatensystem (K1) vor, welches durch die räumliche/zeitliche Trennung sowohl vom CAD-Koordinatensystem als auch von der aktuellen Situation in der Maschine abweicht.

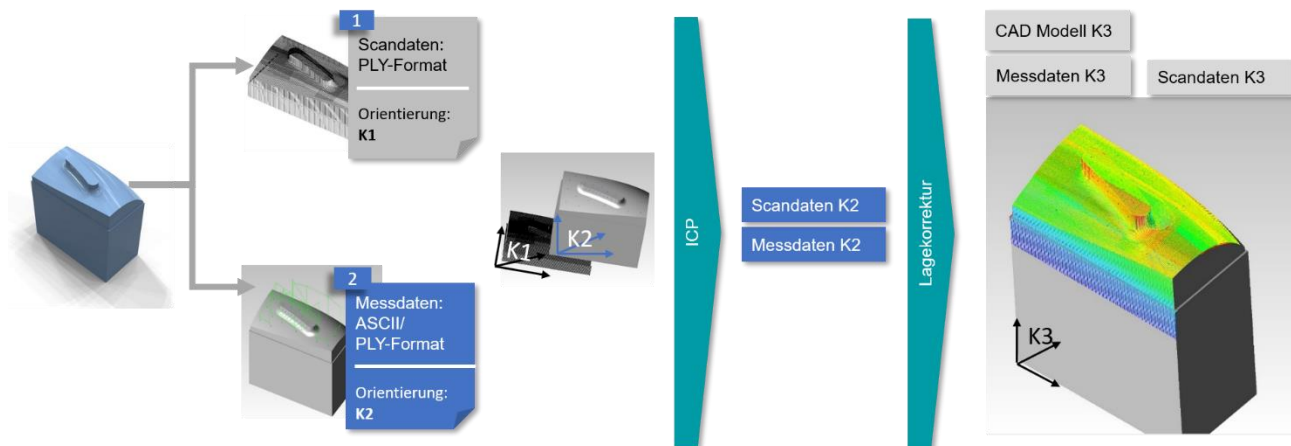


Abbildung 11 Prinzip der Referenzierung mittels ICP-Algorithmus

Vor der Bearbeitung muss die Lage des Bauteils in der Werkzeug-Maschine durch Messung (2) einzelner Punkte erfasst werden. Diese Daten liegen dann im Koordinatensystem (K2) vor.

Die in AP2 untersuchte ICP-Methode ermöglicht es nun, die taktilen Messdaten und die optisch erfassten geometrischen Informationen zu registrieren (referenzieren), so dass sie anschließend im Koordinatensystem (K2) vorliegen. Basierend auf den taktilen Daten (2) erfolgt die Bestimmung der Lage des Bauteils bezogen auf die CAD-Darstellung. Die daraus resultierende Transformation wird nachfolgend auf die Scan- und Messdaten (1/2) angewendet, so dass alle weiteren Berechnungen im Koordinatensystem des Bauteils (K3) erfolgen.

Die in IDEA erprobte Strategie erlaubt nun die Nutzung bereits vorliegender detaillierter Messdaten im Rahmen der Nachbearbeitung. Durch den Zugriff auf eine deutlich größere Datenmenge lässt sich eine Ergebnis-Verbesserung erzielen, ohne diese Datenmenge mit großem Zeitaufwand taktil in der Maschine messen zu müssen.

Da die Untersuchungen der ICP-Methode Probleme bei in der Praxis auftretenden weit auseinanderliegenden Datensätzen identifiziert haben, hat BCT für solche Fälle eine weitere Strategie erarbeitet, die auf manuell gesetzten Hilfspunkten basiert.

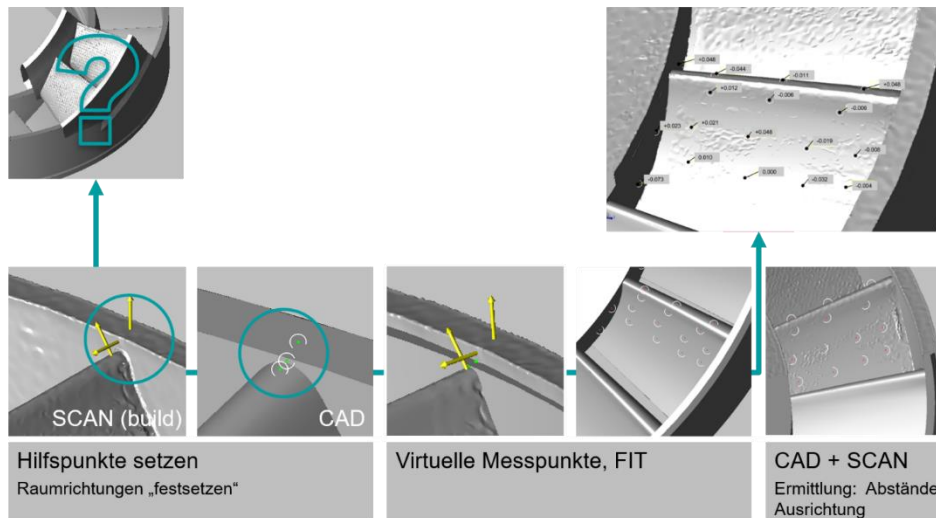


Abbildung 12 Prinzip der Referenzierung mit manuell gesetzten Hilfspunkten

Abbildung 12 zeigt beispielhaft wie bei der neuen manuell unterstützten Referenzierungs-Methode korrespondierende Punkte sowohl im optisch erfassten Scan-Datensatz als auch auf dem CAD-Modell gesetzt werden. Analog einer klassischen Ausrichtung sind dabei alle Raumrichtungen abzudecken.

Die nach der Grobausrichtung verbliebenen Unterschiede lassen sich durch eine nachgelagerte Feinausrichtung nochmals reduzieren. Die daraus resultierende Ausrichtung findet dann bei allen weiteren Prozessschritten Verwendung. Eine generelle Einsetzbarkeit dieser Methode wird durch die nachfolgenden Arbeiten erprobt.

Optimierung der Postprozesskette

Hintergrund

Ein als *adaptive Bearbeitung* bezeichneter Fertigungs-Ansatz leistet einen wichtigen Betrag zur Optimierung der AM-Postprozesskette, da vorgegebene Bearbeitungsstrategien basierend auf aktuellen Messdaten an die reale Situation der einzelnen Bauteile angepasst werden.

Basis der Projektarbeit ist hier die BCT Software OpenARMS.

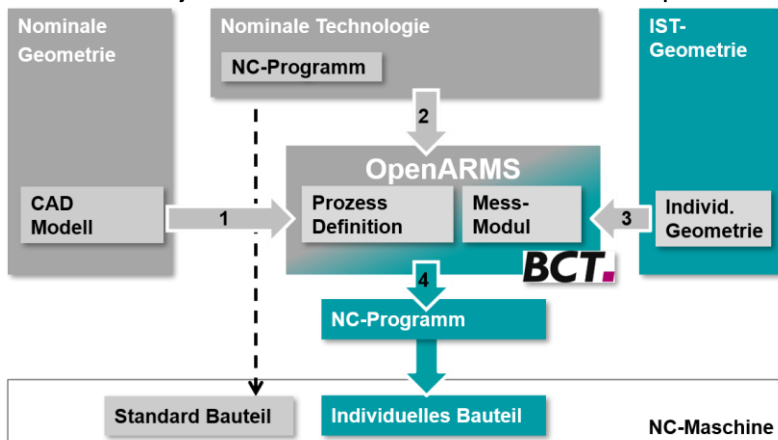


Abbildung 13: Prinzip der Adaptiven Bearbeitung mit OpenARMS (by BCT)

Das CAD-Modell und die darauf basierende NC-Bearbeitung repräsentieren innerhalb einer adaptiven Bearbeitung den Soll-Zustand des Bauteils. Die individuelle Bauteil-Geometrie fließt in Form von Messdaten/Scans in die Adaption ein, die dann eine geplante Bearbeitung auf die real vorgefundene Geometrie des jeweiligen Bauteils überträgt.

Durchgeführte Arbeiten

Adaptive Bearbeitungsmethoden erlauben die Definition aller Bearbeitungen auf Basis der Soll-Geometrie. Anschließend wird festgelegt, ob eine Anpassung an Lage und Orientierung, oder eine Adaption der Programme an die Gegebenheiten des individuellen Bauteils erfolgen soll.

Eine in IDEA als relevant eingestufte Nachbearbeitungs-Aufgabe ist das Entfernen nicht mehr benötigter Hilfselemente, ohne spürbare Übergänge zwischen dem bearbeiteten und dem nicht bearbeiteten Bereich zu hinterlassen.

Anwendungsfall 1

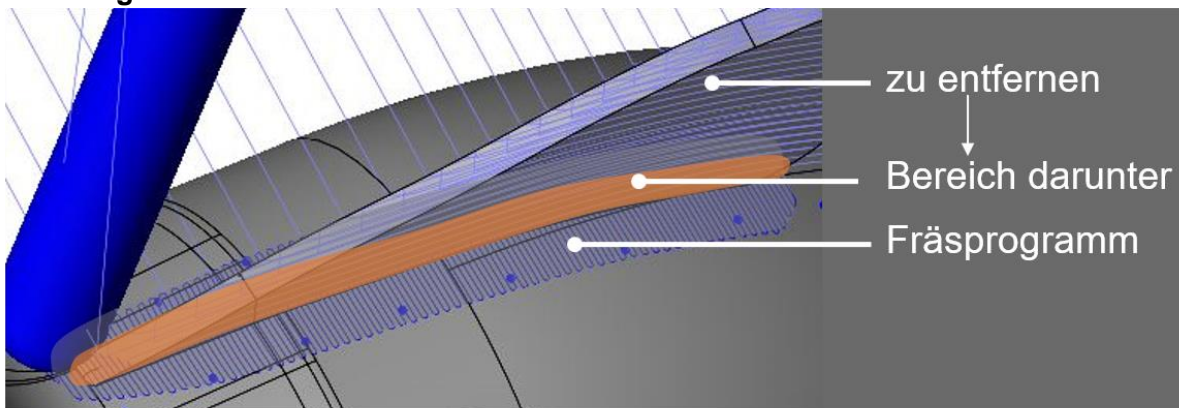


Abbildung 14: Aufgabe: Entfernung nicht benötigter Elemente, hier Bahnsimulation

Beim obigen Anwendungsfall ist eine Haltelasche zu entfernen, die zur Bearbeitung des Bauteils hilfreich, jedoch nicht Bestandteil des Endprodukts ist. Gemäß obigem Konzept wird die Bearbeitung auf Basis des CAD-Modells geplant.

Während der Bearbeitung wird zunächst der Bereich um das zu entfernende Element erfasst (hier taktil). Im Falle einer externen Messung werden die Daten importiert. Die Lageerkennung erfolgte immer über die maschinen-integrierte taktile Vermessung.

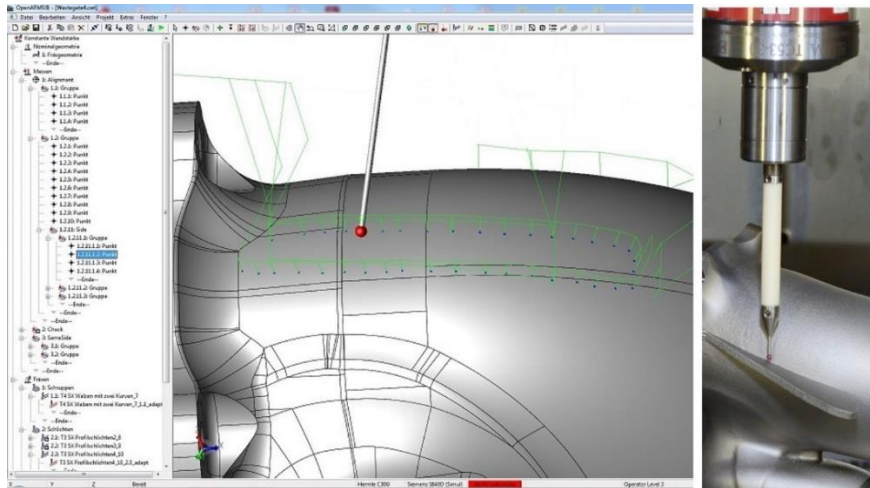


Abbildung 15: Messprogramm taktiles Messen, Messung in der Maschine

Zur Unterstützung dieser Art der Bearbeitung hat BCT in IDEA einen sog. *Blending-Algorithmus* entwickelt, der basierend auf der Kenntnis der Umgebung einen Bereich nahtlos in einen nicht bearbeiteten Bereich überblenden kann. Durch den automatisierten Prozessablauf entsteht für jedes Bauteil ein eigenes NC-Programm welches zur Maschine gesendet werden kann.



Abbildung 16: Ergebnis nach Entfernung mit verbleibendem Sicherheits-Aufmaß

Die entsprechenden Bearbeitungen sind sowohl bei BCT als auch bei Toolcraft durchgeführt und erprobt worden und haben gezeigt, dass eine automatisierte Entfernung solcher Elemente mit minimal verbleibendem Aufmaß möglich ist!

Anwendungsfall 2

Aktuell werden Bereiche mit Stützstrukturanbindung mit lokalen Aufmaßen gedruckt. Dies vermeidet eine Beschädigung des Bauteils bei der manuellen Entfernung der Strukturen. Der Nachteil dieser Vorgehensweise besteht in der Notwendigkeit, die entsprechenden Bereiche anschließend nacharbeiten zu müssen.

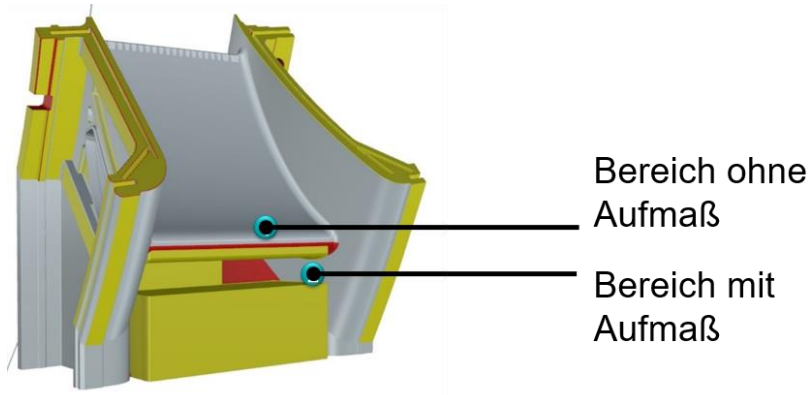
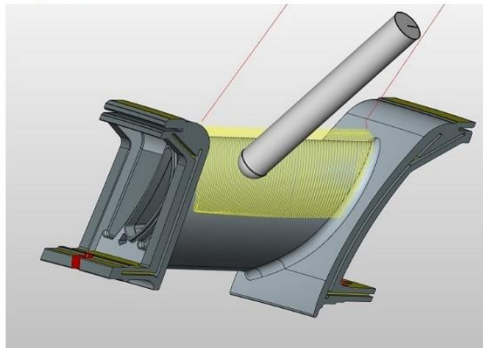


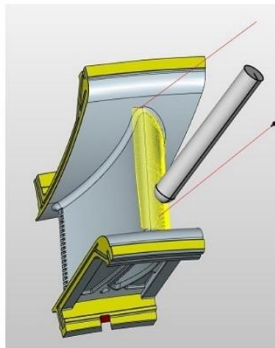
Abbildung 17: Demonstrationsbauteil im Projekt (Siemens Energy)

Eine entsprechende Anwendung in IDEA ist die Fertigbearbeitung eines Leitschaufelsegments (Nozzle Guide Vane – NGV). Die Bearbeitung umfasst hierbei den Bereich der Eintrittskante sowie die Bearbeitung der Übergänge der Seitenflächen in die Schaufelfläche. Es ist das Aufmaß zu reduzieren und der darunter liegende Bereich der Schaufelfläche in den ohne Aufmaß gedruckten Bereich übergangslos zu blenden. Die beim 3D-Druck auftretenden kleinen Formänderungen sind aufzunehmen und bei der Anpassung der NC Programme zu berücksichtigen.

Reprofilieren



Eintrittskante



Fillet-Bearbeitung

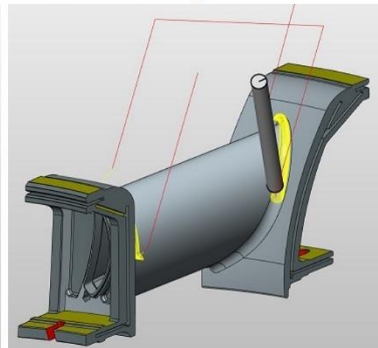


Abbildung 18: Bearbeitungsaufgabe mit Bahnsimulation

Auch in diesem Fall wird die aktuelle Bauteil-Lage innerhalb der NC-Maschine taktil erfasst. Zusätzlich stehen Daten aus einem externen optischen Scan zur Verfügung. Damit liegen für eine Anpassung der Bearbeitungen Informationen über Lage und die geometrische Ausprägung des Bauteils vor.

Nach der Bestimmung von Lage und Orientierung der NGV im Arbeitsraum der Maschine erfolgt zusätzlich die Messung im Rand-Bereich der Aufdickung, nicht aber auf der Aufdickung selbst.

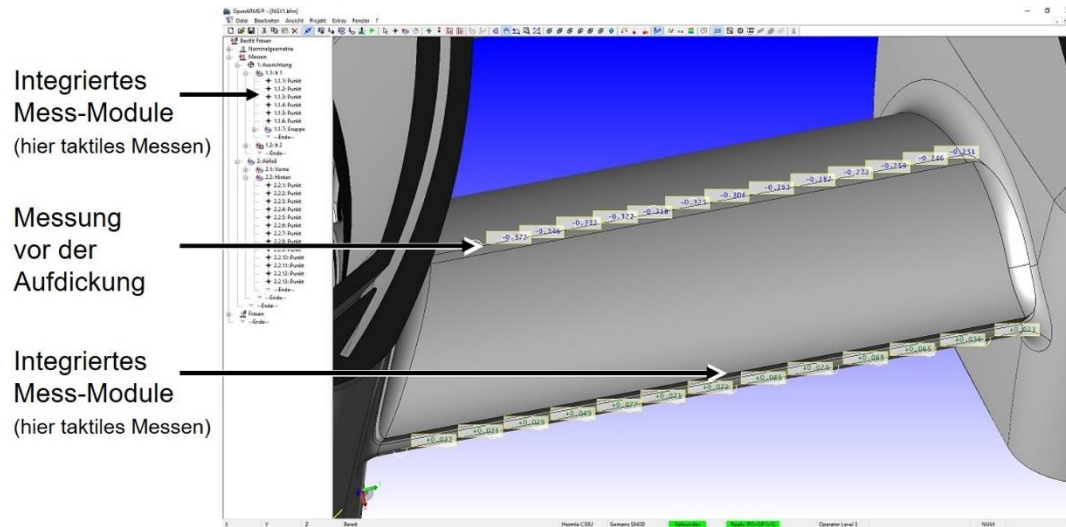


Abbildung 19: Messung in OpenARMS-idea im Randbereich der Aufdickung

Die Messpunkte umschließen die Aufdickung, mit dem Ziel, möglichst viele Informationen über die Gestalt des Bauteils in diesem Bereich zu bekommen. Anschließend erstellt die OpenARMS-idea Software mit den gemessenen Werten eine strukturierte Aufmaßdarstellung, auf der die nachfolgende Anpassung der Fräsprogramme beruht. Die in IDEA entwickelte Softwarelösung erzielt eine gleichmäßige Verteilung der Aufmaße/Formabweichungen im Bereich der Aufdickung.

Die Bearbeitung eines Kunststoff-Modells auf der BCT eigenen NC-Maschine Hermle C30 ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

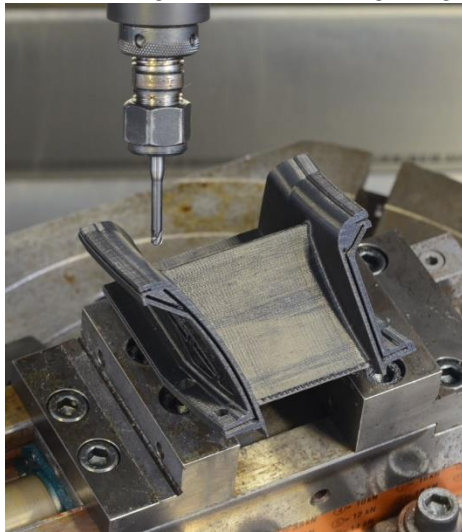


Abbildung 20: NGV-Bearbeitung bei BCT

Weitere Bearbeitungen sind bei Siemens-Energy in Berlin erfolgreich durchgeführt worden.

Anwendungsfall 3

Bereiche mit Resten einer Stützstrukturanbindung weisen oft eine schlechte Oberflächengüte auf und werden in IDEA aufgrund Struktur lokaler Anbindungspunkte als „Gänsehaut“ bezeichnet. Für die Bearbeitung dieser Bereiche hat BCT in IDEA einen weiteren Lösungsansatz erarbeitet, der basierend auf den Scan-Daten der Bauteile und einer Anordnung von Messpositionen die

maximale Bearbeitungstiefe ermittelt. Wieder lassen sich vorgegebene Bearbeitungsstrategien an diese Bedingungen anpassen.

Die Versuche zur Validierung sind in den letzten Projektmonaten erfolgt und werden auch über das Projekt-Ende mit Projektpartnern weiterverfolgt.

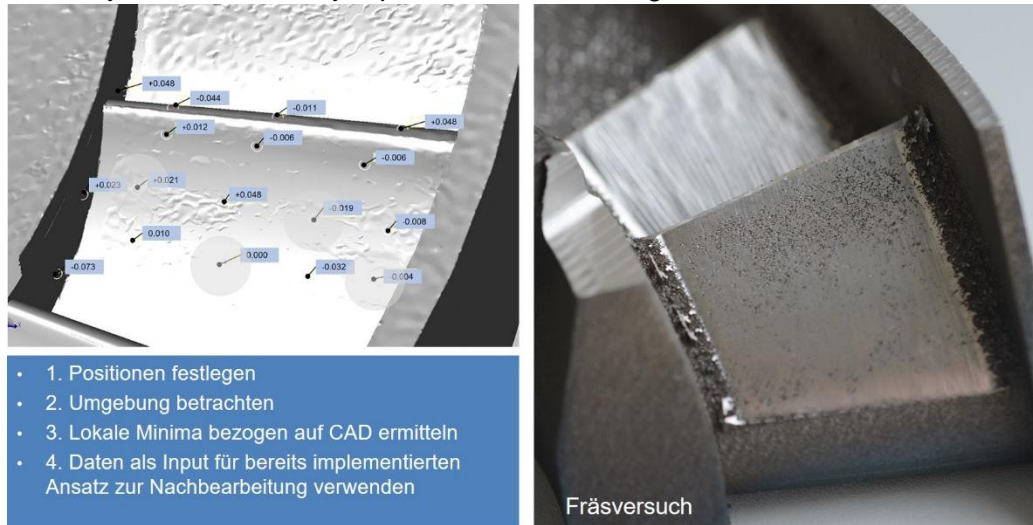


Abbildung 21: Prinzip der Gänsehautbearbeitung und Ergebnisse eines Fräsversuchs.

Notwendigkeit/Angemessenheit der Projektarbeiten

Die von BCT im Rahmen von IDEA durchgeführten Arbeiten wurden durch die im Projekt erarbeiteten Anforderungen der Industriepartner geleitet. Alle Softwareentwicklungen wurden bei BCT in Dortmund durchgeführt und soweit möglich, direkt auf der eigenen NC-Maschine erprobt. Messdaten konnten sowohl taktil als auch optisch bei BCT aufgenommen werden und standen so direkt zur Verfügung.

Die Tests bei den Industriepartnern Toolcraft und Siemens erforderten die Installation der Software mit Anbindung an die Werkzeugmaschinen sowie eine Begleitung durch BCT-Mitarbeiter. BCT hat darüber hinaus an den entsprechenden Arbeitspakets-Abstimmungen und Projekttreffen teilgenommen.

Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse, Planungen

Durch die direkte Abstimmung der Arbeiten mit den Endanwendern haben die Entwicklungen eine wirtschaftlich technische Relevanz. BCT hat einige der erarbeiteten Lösungen wie das Blending und die Methoden der Referenzierung bereits in die Produktpalette integriert, und so den Anwendungsbereich der Adaptiven Bearbeitung erweitert.

Die Ergebnisse des Projekts werden auch in die zurzeit in der Entwicklung befindlich neue Softwaregeneration einfließen.

Bekannt gewordene Fortschritte anderer Stellen

BCT ist nicht der einzige Anbieter adaptiver Bearbeitungen jedoch sind keine Entwicklungen der Wettbewerber bekannt geworden, die eine Vermarktung der IDEA-Ergebnisse für BCT unmöglich machen.

Geplante Veröffentlichungen

Zusammen mit Toolcraft sind Videos zur Adaptiven Bearbeitung und zum Blending veröffentlicht worden. Eine generelle Zusammenstellung wird ebenfalls in dem IDEA-Whitepaper erscheinen.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel IDEA Industrialisierung von Digitalem Engineering und Additiver Fertigung (AM) Teilprojekt 13N15002: Unterstützung der Nacharbeit additiv gefertigter Bauteile durch Integration adaptiver Bearbeitung in die Prozesskette		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Bremer, Jan Kosche, Thomas	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2022	
	6. Veröffentlichungsdatum 20.01.2023	
	7. Form der Publikation Bericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH Carlo-Schmid-Allee 3 44263 Dortmund	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 13N15002	
	11. Seitenzahl 20	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben	
	14. Tabellen	
	15. Abbildungen 20	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Der Bericht enthält eine kurze Beschreibung des Beitrags von BCT zum IDEA-Projekt. Die Beschreibung der in den verschiedenen APs durchgeführten Arbeiten und die erzielten Ergebnisse sind entsprechend der AP-Struktur gegliedert. Im AP "SCAN to CAX" wurden die Grundlagen für die Referenzierung/Verwendung detaillierter geometrischer Messdaten für die spätere mechanische Nachbearbeitung evaluiert und validiert. Ein neuer Ansatz zur Unterstützung von Hybrid-AM-Reparaturanwendungen wurde im AP "Hybrid-AM" getestet und zeigt, dass es möglich ist, ein verformtes Volumen zu berechnen, mit dem das zu reparierende Bauteil aufgefüllt werden kann. Voraussetzung hierfür ist, dass die eingehenden Scandaten einige Qualitätskriterien bezüglich Auflösung und Glattheit erfüllen. Die Idee, einen adaptiven Bearbeitungsansatz in die AM-Prozesskette zu integrieren, wurde mit neuen Funktionalitäten wie z.B. Blending getestet und basierend auf IDEA-Demonstratorteilen erprobt.		
19. Schlagwörter Nacharbeit, hybrid-AM, ICP, Adaptive Bearbeitung, Registrierung, Scan-Daten		
20. Verlag	21. Preis	

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title IDEA Industrialisierung von Digitalem Engineering und Additiver Fertigung (AM) Teilprojekt 13N15002: Unterstützung der Nacharbeit additiv gefertigter Bauteile durch Integration adaptiver Bearbeitung in die Prozesskette		
4. author(s) (family name, first name(s)) Bremer, Jan Kosche, Thomas	5. end of project 31.07.2022	
	6. publication date 20.01.2023	
	7. form of publication report	
8. performing organization(s) (name, address) BCT Steuerungs- und DV-Systeme GmbH Carlo-Schmid-Allee 3 44263 Dortmund	9. originator's report no.	
	10. reference no. 13N15002	
	11. no. of pages 20	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references	
	14. no. of tables	
	15. no. of figures 20	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The report provides a brief description of BCT's contribution to the IDEA project. The description of the work carried out in the different APs and the results achieved are split according to the AP structure. In the "SCAN to CAX" AP the basics for referencing detailed geometrical measuring data for the later used for postprocessing have been evaluated and validated. A new approach to support Hybrid-AM repair applications was tested in the "Hybrid-AM" AP, showing that a deformed volume to be added on top of the part to be repaired can be calculated, presupposed that the incoming scan data meet some quality criterions. The idea of integrating an adaptive machining approach into the AM process chain was improved by new functionalities like e.g.; blending and tested based on IDEA demonstrator requirements.		
19. keywords Nacharbeit, hybrid-AM, ICP, Adaptive Bearbeitung, Registrierung, Scan-Daten		
20. publisher	21. price	