

Schlussbericht AcDiCrackInspect

Zuwendungsempfänger:

Institut für Flugzeug-Produktionstechnik, TU Hamburg

Vorhabenbezeichnung:

AcDiCrackInspect – Accelerated Digital Crack Inspection auf Grundlage von Weißlichtinterferometrie für rotationssymmetrische und nicht-rotationssymmetrische Bauteile

Teilvorhaben:

Automatische, adaptive Bahnplanung mit einem hybriden Präzisions-Sensorhandlingsystem

Förderkennzeichen: 20D1912C

Laufzeit des Vorhabens: 39 Monate

Berichtszeitraum: 01.10.2020 – 31.12.2023

Datum: 28.06.2024

Berichterstatter:

Jessica Ehrbar

Thorsten Schüppstuhl

Unterschrift:

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen unter denen das Forschungsprojekt durchgeführt wurde.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2	Technischer Bericht	8
2.1	HAP 1 – Anforderungsdefinition und Klassifikation.....	8
2.2	HAP 2 – Sensorentwicklung & -integration	10
2.3	HAP 3 – Sensorhandhabung	13
2.4	HAP 5 – Gesamtsystemintegration & Prozessdemonstration	34
2.5	HAP 6 – Zulassungsvorbereitung	41
3	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	43
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	44
5	Nutzen/Verwertbarkeit.....	44
6	Fortschritt anderer Stellen.....	44
7	Veröffentlichungen, Vorträge, studentische Arbeiten.....	45
8	Literaturverzeichnis.....	45

1 Zusammenfassung

Die Inspektion sicherheitsrelevanter Komponenten ist ein integraler Bestandteil der Flugzeugwartung und -instandhaltung. Die Weiterentwicklung solcher heutzutage größtenteils manuell durchgeführten, langwierigen Inspektionen hin zu automatisierten, digitalen Prozessen ist essenziell für die Wettbewerbsfähigkeit von Instandhaltungsbetrieben. Ein geeigneter Sensor für die Digitalisierung der hochpräzisen Prozesse ist das Weißlichtinterferometer.

Ergebnis der TUHH im Rahmen des Forschungsprojektes AcDiCrackInspect ist die Beschleunigung eines auf Weißlichtinterferometrie basierenden Inspektionsprozesses durch die Entwicklung einer automatischen adaptiven Bahnplanung. Durch die innovative Kombination geeigneter Approximationsansätze und Funktionen für die kontinuierliche Optimierung von Sensorposen, lässt sich die Anzahl für die Inspektion notwendiger Sensorposen verringern. Durch eine geringere Anzahl an Sensorposen verringert sich auch die notwendige Inspektionszeit. Die entwickelte Adaption der Sensorplanung auf die spezifischen Messfeldparameter und das flexible Messvolumen unterstützten diesen Vorteil.

1.1 Aufgabenstellung

Aufgabe der TUHH im Projekt AcDiCrackInspect war es, für gegebene Inspektionsaufgaben Ansätze für eine automatische und adaptive Bahnplanung zu entwickeln und zu erproben. Die entwickelten Ansätze sollen optimal auf die entwickelte Linieninterferometrie abgestimmt sein und die Inspektion von rotationssymmetrischen sowie freigeformten Bauteilen ermöglichen. Daneben sollte außerdem ein Ansatz für die Bahnplanung im hybriden Ansatz entwickelt werden, bei dem zusätzlich zum Weißlichtinterferometer eine Kamera eingesetzt wird, um im Voraus mögliche Defektstellen zu detektieren und so die Messzeit mit dem Weißlichtinterferometer zu reduzieren. Um die Ansätze erproben zu können war es die Aufgabe der TUHH, eine Testumgebung aufzubauen.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Forschungsprojekt durchgeführt wurde

Der Forschungsschwerpunkt Luftfahrttechnik der TUHH kooperiert seit vielen Jahren intensiv mit den ortsansässigen Großunternehmen Airbus und Lufthansa Technik sowie weiteren Luftfahrttechnik-Spezialisten, wie beispielsweise DIEHL Aviation oder der 3D.aero. Dazu haben sich zahlreiche Institute der TUHH mit unterschiedlichsten Kompetenzen im Forschungsschwerpunkt Luftfahrt zusammengeschlossen. Die Projekte des Forschungsschwerpunktes sind an den internationalen Luftfahrt-Forschungsstrategien ausgerichtet und haben das Ziel, vor allem neue Grundlagen und Techniken für die Entwicklung, die Herstellung, den Betrieb und die Nutzung von Luftfahrtsystemen zu erarbeiten. Von besonderem Vorteil für die Arbeiten ist der Kenntnisstand des TUHH-Instituts im Hinblick auf das adressierte Themengebiet.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben AcDiCrackInspect teilte sich in 6 HAP auf: Anforderungsdefinition und Klassifikation, Sensorentwicklung & -integration, Sensorhandhabung, Messdatenverarbeitung, Gesamtsystemintegration & Prozessdemonstration sowie Zulassungsvorbereitung. Das Projekt AcDiCrackInspect startete für die TUHH am 01.10.2020 und lief bis zum Projektende am 31.12.2023, gemäß genehmigter Laufzeitanpassung.

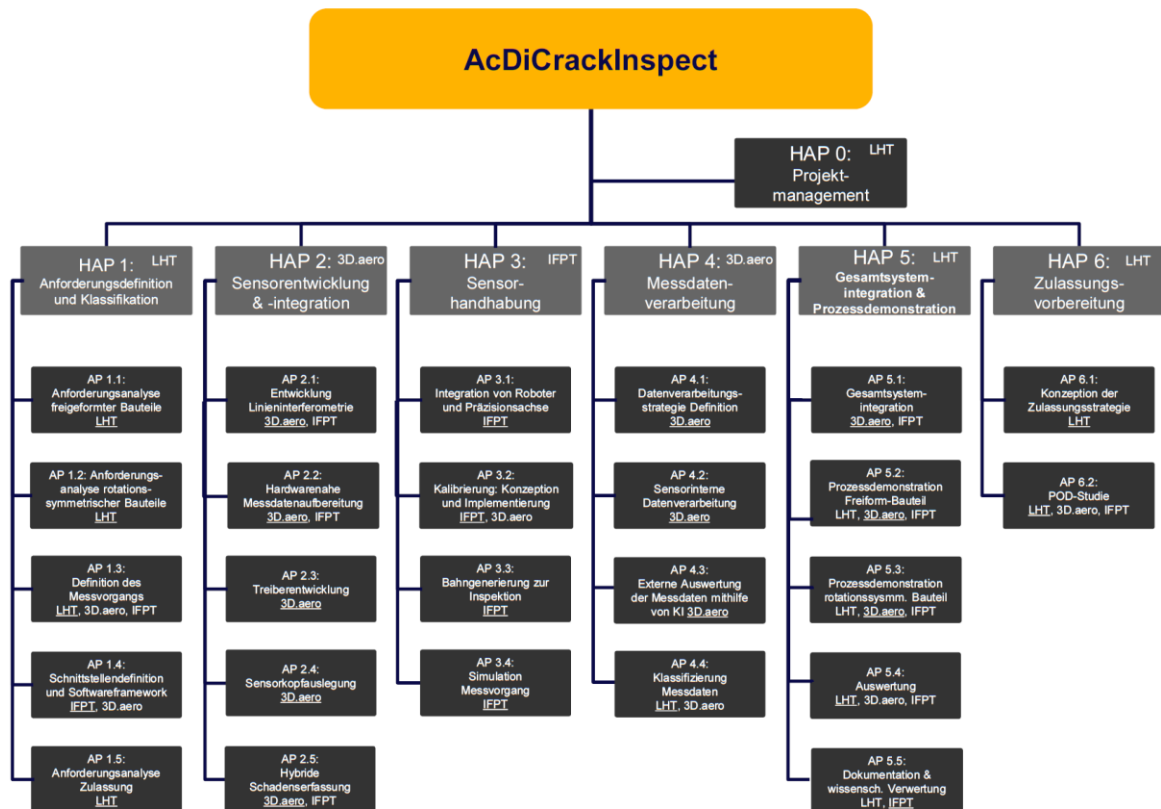


Abbildung 1: Projektplan – AcDiCrackInspect

Während des Projekts kam es vom Februar 2022 bis September 2022 zu einem Projektstopp. Durch die Covid-19-Pandemie war die Wirtschaftlichkeit und damit auch die Verwertungsperspektive für die betrachteten Triebwerksbauteile im LHT Geschäftssegment „Engine Services“ fraglich. Gemäß Änderungsantrag wurde der Federführende Geschäftsbereich bei der LHT gewechselt und damit auch das betrachtete Bauteilspektrum. Fokus lag entsprechend nach dem Projektstopp vorwiegend auf den Fahrwerks Bauteilen mit rotationssymmetrischen und freigeformten Oberflächenbereichen. In dem vorliegenden Abschlussbericht werden sowohl die Arbeiten vor als auch nach dem Projektstopp mit den unterschiedlichen Bauteilen thematisiert.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Weißlichtinterferometrie (WLI) ist eine hochpräzise Methode zur Oberflächencharakterisierung, die zunehmend in robotergestützten Inspektionssystemen Anwendung findet. Ein zentrales Element bei der Integration von WLI in robotergeführte Systeme ist die effektive Bahnplanung. Besondere Herausforderungen für die Bahnplanung bieten die spezifischen Charakteristika der WLI wie z.B. der geringe Messabstand des Sensors von nur 43mm. Auch das Messfeld des Sensors ist durch die Weiterentwicklung zum Linearen Weißlichtinterferometer (Linien-WLI) sehr speziell. Hierdurch ist das Messfeld nicht nur sehr länglich, sondern auch von der Länge und damit auch vom Seitenverhältnis variabel. Hinzu kommt die Sensitivität gegenüber Schwingungen, welche es unmöglich macht, den Roboter während der Messungen zu verfahren.

Die allgemeine Bahnplanung für die Inspektion umfasst zwei Hauptaspekte: die Planung von Sensorposen (View Planning) und die Trajektorienplanung (Trajectory Planning). Beide Aspekte basieren auf klassischen Problemen der Informatik und Mathematik, nämlich dem Art Gallery Problem und dem Travelling Salesman Problem (TSP). In der relevanten Literatur werden diese zwei Teilbereiche teilweise getrennt, teilweise jedoch kombiniert betrachtet.

Online Pfadplanungsansätze sind für die Weißlichtinterferometrie grundsätzlich nicht geeignet. Das Teachen von Sensorposen ist alleine durch die schiere Anzahl der notwendigen Messungen nicht einsetzbar. Hinzu kommt die Problematik von optischen Systemen, dass auf dem zu inspizierenden Bauteil nicht erkennbar ist, welcher Bereich gerade erfasst wird und welche Bereiche bereits durch das Teachen abgedeckt wurden und welche noch betrachtet werden müssen. Andere online Ansätze wie das Errechnen der nächsten Sensorpose aus Messdaten von zuvor erfassten Bereichen ist für die WLI ebenfalls nicht geeignet. Durch die geringe Messdistanz und die physische Größe des Sensors im Vergleich zu dem in einer Messung erfassten Bauteilbereich ist die Kollisionsgefahr durch solche Ansätze zu hoch.

In dem Vorgänger-Projekt „AutoInspect“ wurde die Weißlichtinterferometrie für die Inspektion von Brennkammern in ein roboterbasiertes Inspektionssystem integriert. Hierfür wurde in dem damaligen Projekt auch eine Pfadplanung entwickelt. Die Bahnplanung basierte auf dem Ansatz der Messbarkeitsmatrizen von Scott [1] und wurde im Rahmen des Projekts weiterentwickelt [2]. Das Problem dieses Ansatzes ist zum einen das Verbesserungspotential zur Reduzierung der Ansichten, dass durch die limitierte Positionierung von Ansichten erzeugt wird. Noch kritischer für die Anwendung beim Linien-WLI ist jedoch die Vernachlässigung der Orientierung um die optische Achse des Sensors. Für annähernd quadratische Messfelder, wie das des Weißlichtinterferometers, das damals verwendet wurde, ist diese Vernachlässigung unkritisch. Durch das längliche Messfeld des Linien-WLI ist die Orientierung um die Optische Achse jedoch entscheidend, wodurch der in „AutoInspect“ entwickelte Ansatz so nicht einsetzbar ist.

Im Rahmen des Projekts “EPSRC Fellowship in Manufacturing: Collaborative Metrology Systems for High Value Manufacturing” [3] wurde neben anderen Sensoren ebenfalls ein Weißlichtinterferometer in ein roboterbasiertes Inspektionssystem integriert [4]. Auch die Pfadplanung wird von Biro et al. [4] kurz thematisiert. Allerdings wird nur berichtet, dass die Positionierung des WLI auf Basis von Messdaten eines Laserscanners automatisch vorgenommen wird. Wie genau die Pfadplanung für den Laserscanner abläuft und wie der Prozess für die Positionierung des WLI auf dessen Datenbasis funktioniert, wird nicht beschrieben. Im Rahmen des Projekts haben Kinell et al. sich außerdem mit der Ansichtenplanung für eine Stereokamera beschäftigt [5]. Der entwickelte Ansatz zielt dabei auf die Objektlokalisierung ab und es werden möglichst aussagekräftige Objektbereiche genutzt um Ansichtskandidaten zu generieren. Zur Inspektion von teilweise auch sehr monotonen Flächen ist ein solcher Ansatz nicht geeignet.

Im Allgemeinen nimmt die Zahl der neuen Veröffentlichungen im Bereich der offline Bahnplanung für die Inspektion in den letzten Jahren immer weiter zu. Eine große Anzahl dieser neuen Veröffentlichungen beziehen sich allerdings auf die Inspektion von Großstrukturen wie Gebäuden oder Windkraftanlagen mithilfe von UAVs. Bei der Pfadplanung für diesen Anwendungsfall werden dabei Besonderheiten ausgenutzt, wie Einschränkungen im Roll- und Nick-Winkel. Oft werden auch kontinuierliche Scanmodi angenommen, wodurch die abgeflogene Bahn relevanter ist als einzelne spezifische Punkte der Bahn [6]. Durch diese Besonderheiten in der Bahnplanung sind diese Ansätze für die Inspektion mit UAVs nicht für die robotergeführte Inspektion mittels Linien-WLI geeignet.

Li et al. und Son et al. nutzen Region Growing Methoden, um Bereiche mit ähnlichen Oberflächennormalen zu finden und diese dann mithilfe eines Laserliniensensors in nur wenigen Messbewegungen

einzuscannen [7, 8]. Einzelne Oberflächengruppierungen werden dabei mit derselben Sensororientierung vermessen, während der Sensor während der Messbewegung kontinuierlich misst. Prieto et al. [9] befassten sich ebenfalls mit der Bahnplanung für die Inspektion mit Laserscannern. Anders als die vorherigen Ansätze wird bei dieser Umsetzung eine Skelettierungsmethode angewandt, um für unterschiedliche Flächen Scanpfade zu generieren. Die Orientierung des Sensors passt sich dabei während des Scannens der Orientierung der Oberfläche an. Für die Linien-WLI sind diese Ansätze nicht geeignet, da der Sensor während der Messung nicht bewegt werden kann. Einzelne Ansichten können durch diese Ansätze nicht generiert werden.

Viele auch aktuelle Quellen beschäftigen sich mit der Generierung von Ansichtenkandidaten. Diese sind mit der darauffolgenden Auswahl einer Submenge von Ansichtenkandidaten häufig Schritte im Prozess der Ansichtenplanung [10]. Gierecker und Schüppstuhl [11] entwickelten einen Ansatz für die Generierung von Ansichtenkandidaten für die Montagefortschrittsüberwachung. Da für eine solche Montagefortschrittsüberwachung vor allem spezifische Bauteilverbindungen und Kontaktsituationen relevant sind, werden in diesem Ansatz die Ansichtenkandidaten durch das Extrapolieren solcher Kontaktsituationen erzeugt.

Mosbach et al. [10] entwickelten einen Ansatz basierend auf NURBS zum Generieren von Ansichtenkandidaten für die Inspektion. Bei diesem speziellen Ansatz werden vermehrt Ansichtenkandidaten für sehr detailreiche Bereiche erzeugt und weniger für sehr monotone Flächen. Beide Ansätze haben das Problem, dass der Orientierung um die optische Achse des Sensors bei der Generierung der Ansichtenkandidaten zu wenig Beachtung geschenkt wird. Für Sensoren mit länglichem Messfeld wie dem Linien-WLI führt dies dazu, dass die im nächsten Schritt extrahierte Submenge an Ansichten gute Abdeckung nur durch Zufall mit wenigen Ansichten schafft.

Fast alle anderen Ansätze für die Generierung von Ansichtenkandidaten arbeiten mit irgendeiner Form der Randomisierung [12]. Dies funktioniert für nahezu quadratische Messfelder mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand. Aber auch hier ist das längliche Messfeld des Linien-WLI problematisch. So wird die Submenge der Ansichtenkandidaten für eine möglichst große Abdeckung nicht optimal sein, weshalb die Ansätze großes Verbesserungspotential unausgeschöpft lassen, wenn es um zeiteffizientere Inspektion geht.

Glorieux et al. [12] entwickelten deshalb einen Ansatz für die Ansichtenplanung für die Inspektion mithilfe eines Weißlicht-Stereovisions-Systems. In ihrem Ansatz werden Ansichtenkandidaten iterativ mithilfe eines Optimierungsalgorithmus erzeugt. Die Optimierung wird so lange wiederholt, bis jeder Oberflächenbereich n -fach abgedeckt ist. Diese Übermenge an Ansichtenkandidaten wird generiert, da eine iterative Definition von Ansichten nicht zur minimalen Menge an Ansichten führt. Aus der Übermenge wird dann wiederum durch einen Greedy Algorithmus eine Submenge erzeugt. Dieses Oversampling funktioniert wiederum passabel für nahezu quadratische Messfelder. Für längliche Messfelder ergeben sich unzulängliche Submengen mit viel zu vielen Messfeldern um die notwendige Abdeckung zu erreichen.

Was hinzukommt ist, dass keiner der zuvor genannten Ansätze ein variables Messfeld wie das des Linien-WLI berücksichtigt. Besonders die Planung von Sensorposen ist sehr speziell durch die Charakteristika des Linien-WLI. Die Entwicklung eines neuartigen Ansatzes war essentiell für die Einsetzbarkeit eines Linien-WLI.

Aus Sicht des IFPT der TUHH stehen keinerlei Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen der späteren Ergebnisverwertung entgegen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der Zusammenarbeit im Konsortium wird zu dieser Thematik derzeit mit keiner anderen Stelle zusammengearbeitet.

2 Technischer Bericht

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Projektes in Anlehnung an die Planungsstruktur des Projekts in den Arbeitspaketen dargestellt. Es wird ein Gesamtüberblick über das Projekt gegeben, wobei Details den jeweiligen Zwischenberichten zu entnehmen sind.

2.1 HAP 1 – Anforderungsdefinition und Klassifikation

2.1.1 AP 1.3 – Definition des Messvorgangs

Ergebnis der Arbeiten der TUHH in diesem AP waren die unterschiedlichen Konzepte zum Messvorgang und Sensorhandling für die Inspektion der unterschiedlichen Komponenten.

Zu Beginn des Projekts wurden zunächst die unterschiedlichen Konzepte für die Inspektion der Triebwerkskomponenten entwickelt. Differenziert wurde nach dem Konzept für rotationssymmetrische Bauteile und dem für Freiform-Bauteile. Die rotationssymmetrischen Bauteile müssen Grundsätzlich komplett durch das Weißlichtinterferometer vermessen werden, während es bei den Freiform-Bauteilen auch einen Ansatz für eine hybride Inspektion mit Kamera und Weißlichtinterferometer geben muss. Weiterführende Details zu diesen Konzepten sind dem Zwischenbericht zum Berichtsjahr 2021 zu entnehmen. Für die Fahrwerkskomponenten musste nach Projektstopp noch einmal ein anderer Messvorgang erarbeitet werden.

Konzept 1: Rotationssymmetrische Bauteile (Triebwerk)

Für die rotationssymmetrischen Bauteile wird das Bauteil auf einem Drehtisch befestigt. Dann erfolgt der Messablauf gemäß den folgenden Schritten. Zunächst fährt der Roboter auf eine Messposition, sodass das Weißlichtinterferometer auf die Oberfläche ausgerichtet ist. Dann wird der Drehtisch und damit das Bauteil gedreht, während mit dem Weißlichtinterferometer gemessen wird. Eventuelle Unrundheiten des Bauteils werden durch Nachstellung mithilfe der Messachse des WLI ausgeglichen. Nachdem ein ganzer Ring des Bauteils vermessen wurde, wird der Roboter und so das WLI umpositioniert und dann der nächste Ring vermessen. So wird das Bauteil Ring für Ring vermessen. Wichtig ist, nach den Umsetzbewegungen durch den Roboter eine Ausschwingzeit mit einzuplanen, da das WLI stark schwingungssensitiv ist.

Konzept 2: Freiform-Bauteile (Triebwerk)

Für die Inspektion der Freiform-Bauteile soll das zu inspizierende Bauteil vom Roboter getragen werden. Der Sensorkopf ist dabei statisch im Raum montiert, sodass die Bauteile gut durch den Roboter davor positioniert werden können. Danach wird die entsprechende WLI Messung durchgeführt. Anschließend wird das Bauteil neu positioniert und wieder gemessen. Diese Prozessschritte werden so lange wiederholt, bis die relevanten Bauteiloberflächen vermessen wurden.

Für den hybriden Ansatz wird die vorgeschaltete Bahnplanung für die Kamera durchgeführt. Anschließend wird das Bauteil möglichst vollumfänglich mit der Kamera vermessen und in den Aufnahmen mögliche Schadstellen identifiziert. Nachdem die Schadstellen aus den Kamerabildern auf die tatsächliche Bauteiloberfläche zurück übertragen wurden, wird mithilfe dieser Schadstellen eine Bahnplanung für das WLI durchgeführt und die möglichen Defektstellen mit dem WLI vermessen.

Durch die Änderung des Bauteilspektrums haben sich auch die Anforderungen an den Messvorgang geändert, weshalb ein abgeändertes Konzept entwickelt wurde.

Konzept 3: Freiform-Bauteile (Fahrwerk)

Die betrachteten Fahrwerksbauteile weisen sowohl rotationssymmetrische als auch freigeformte Bereiche auf. Außerdem befanden sich die neu betrachteten Bauteile in Gewichts- und Form-Bereichen, welche schlecht durch einen Roboter zu handhaben waren. Aus diesem Grund wurden die Bauteile drehbar gelagert und auch für die Freiformbereiche der Sensor durch den Roboter positioniert. Auf den Bauteilen sollten zuvor erzeugte Schleifstellen vermessen werden. Für die Vermessung sollte es zwei Optionen geben.

Für die erste Option sollen zuvor geplante Pfade für gesamte Bereiche automatisiert abgefahren werden. Der Messvorgang ist dabei eine Kombination aus Konzept 1 und 2. Die Bauteile werden drehbar gelagert und so kann die Drehachse genutzt werden, um bestimmte Bereiche der Bauteile besser vermessen zu können. Für die freigeformten Bereiche der Bauteile wird, anders als in Konzept 2, nicht nur der Roboter zum Umpositionieren genutzt, sondern auch die Drehachse des Bauteils.

Die zweite Option ist ein hybrider Ansatz. Hierbei werden die Mittelpunkte aller Schleifstellen von einem Mitarbeiter geteacht. Basierend auf den Mittelpunkten wird flexibel eine passende Bahn geplant, um gezielt die Schleifstellen mit dem WLI zu vermessen. Auch hier wird eine Kombination aus Umsetzbewegungen durch den Roboter und Rotation der Drehachse genutzt, um den Sensor relativ zum Roboter zu positionieren. Eine umfangreichere Beschreibung des Messvorgangs ist im 2022er Zwischenbericht zu finden.

Zusammenfassung

Durch das geänderte Bauteilspektrum hat sich der Fokus der Entwicklung etwas verschoben und hatte Auswirkungen auf die späteren Arbeitspakete. Insbesondere für die Entwicklung der Linieninterferometrie ist der Anwendungsfall der Triebwerksschaufeln jedoch immer noch von höchstem Interesse und wird im Folgenden für die wissenschaftliche Entwicklung weiter betrachtet.

2.1.2 AP 1.4 – Schnittstellendefinition und Softwareframework

Ziel der TUHH war die Definition der Schnittstellen zwischen Hard- und Softwarebausteinen und die Untersuchung und Definition geeigneter Programmiersprachen und Kommunikationsstandards. Die Änderung des Bauteilspektrums hatte zur Folge, dass eine etwas andere Testumgebung benötigt wurde. Diese wurde von der 3D.aero konstruiert und gebaut, inklusive der Entwicklung der dazugehörigen Anlagenkommunikation und Schnittstellen. Die hier dargestellten Inhalte zu den Schnittstellen beziehen sich in diesem Fall auf die ursprünglich geplante Testumgebung, die weiterhin für die Erprobung im Rahmen des Projekts genutzt wurde. Die physischen Schnittstellen der Anlage sind in Abbildung 2 dargestellt.

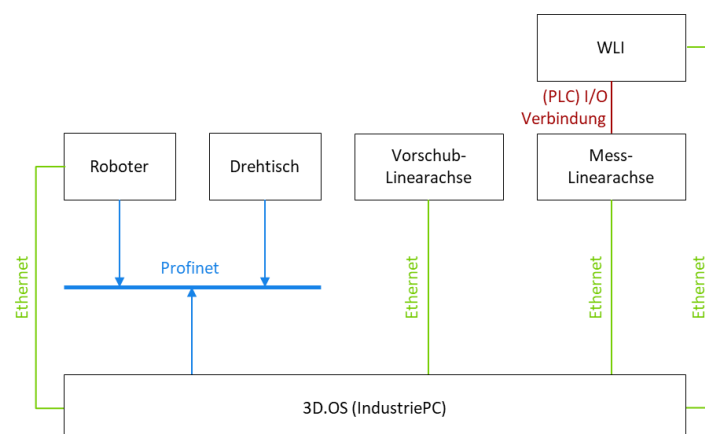


Abbildung 2: Physische Schnittstellen der Validierungsplattform

Die genutzte Steuerungssoftware ist das 3D.OS. Dieses Framework ist auf die Koordination multipler Sensoren und Robotersysteme spezialisiert und wurde im Projekt dazu genutzt, Steuerungsabläufe zu koordinieren und Messdaten zu transformieren, auszuwerten, zu verarbeiten und zu speichern.

Außerdem wurde zu Teilen das Simulationsframework der 3D.aero verwendet und im Rahmen des Projekts weiterentwickelt. Dieses Framework wurde im Rahmen des Projekts erweitert, um Kinematiken, Kollisionskontrolle und das Linien-WLI abbilden zu können.

2.2 HAP 2 – Sensorentwicklung & -integration

2.2.1 AP 2.1 – Entwicklung Linieninterferometrie

Das Ziel der TUHH in diesem Arbeitspaket war die Definition von Randbedingungen durch das Handling für die Weiterentwicklung der Sensorik. Zunächst wurden Randbedingungen für die Sensorentwicklung bzgl. physikalischer Einschränkungen definiert. Da die Entwicklung der Linieninterferometrie auch die Konstruktion des Sensorkopfs beeinflusst, war hier darauf zu achten, dass Gewicht und Dimensionen für das Handling System geeignet sind. Die Dimensionen des Sensorkopfes sollten möglichst klein gehalten werden. Durch die verhältnismäßig geringe Messdistanz des WLI von nur 43 mm erhöht ein größerer Messkopf das Kollisionsrisiko.

Die weiteren Randbedingungen ergaben sich aus Messprozess und Bahnplanung. Optimal für das Handling im Messprozess ist es, so wenige Umsetzbewegungen wie möglich zu erzeugen. Um das zu erreichen, musste das Messfeld und die Anpassbarkeit des Messfelds an die Oberfläche maximiert werden. Besonders durch die Kreuztischanordnung der zwei Linearachsen für das WLI ergaben sich hier neue Möglichkeiten für die Nachführung des Sensors in Bezug auf die Oberfläche des Bauteils, wie in Abbildung 3 veranschaulicht. Dadurch können Messbereiche verkleinert werden. Dies trägt zur Reduktion der Inspektionszeiten bei.

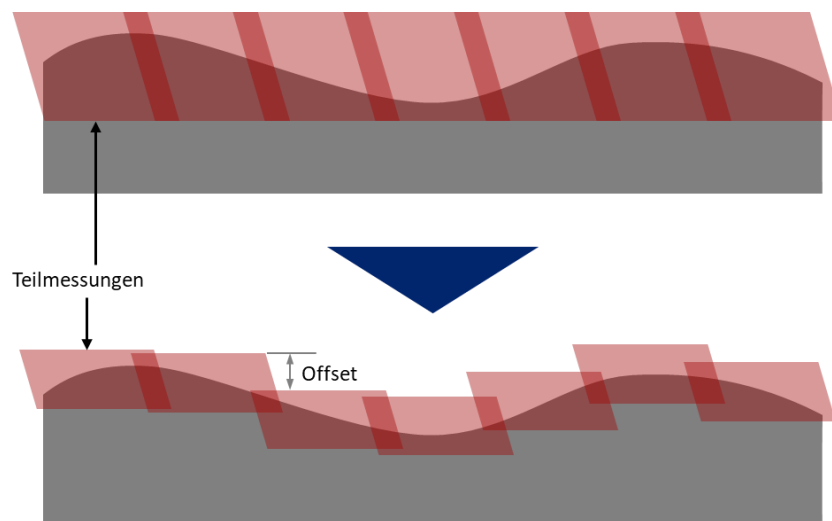


Abbildung 3: Einsparpotential Messvolumenreduzierung

Durch die simultane Bewegung der Vorschub- und der Mess-Linearachse verfährt das WLI schräg zur Oberfläche. Wurden alle Teilmessungen mit den entsprechenden Offsets und Scanbereichen durchgeführt, wird die Vorschubachse gestoppt. Erst danach wird der Roboter in die nächste Messposition gebracht.

Die Berechnung der Messbereiche und Offsets der Messungen ist Teil der Bahnplanung. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Schnittstelle zwischen Bahnplanung und Linien-WLI-Treiber definiert als .csv Datei, die die entsprechenden Konfigurationen für Mess-Linearachse und WLI enthält. Die

.csv Datei wird durch die Bahnplanung generiert und enthält Informationen über die Konfigurationen für jede Messposition des Roboters.

2.2.2 AP 2.2 – Hardwarenahe Messdatenaufbereitung

Ziel der TUHH in diesem Arbeitspaket war die Unterstützung bei der Messdatenaufbereitung durch Know-how zur Integration von Positionierinformationen. Hierfür wurde sich mit der Transformation der Messdaten von dem sensoreigenen in ein geeignetes Koordinatensystem (KOS) beschäftigt. Die anlageninternen Koordinatensysteme des Setups zur Inspektion der Freiformbauteile (Triebwerk) sind in Abbildung 4 dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber wurde hier auf die Darstellung der Kamera verzichtet. Für die Inspektion der rotationssymmetrischen Komponenten (Triebwerk) würde der Sensor vom Roboter getragen und die Bauteile auf dem Drehtisch platziert. Zusätzlich zu den hier gezeigten KOS wäre entsprechend noch ein KOS für den Drehtisch vorhanden und das KOS der Vorschubachse würde wegfallen, da diese für das Setup nicht verwendet würde. Die Indizes der KOS sind wie folgt definiert und in Abbildung 4 dargestellt.

- B Roboterbasis
- F Roboterflansch
- K Komponente/Bauteil
- S Sensor-WLI
- SK Sensor-Kamera
- L Linearachse
- D Drehtisch

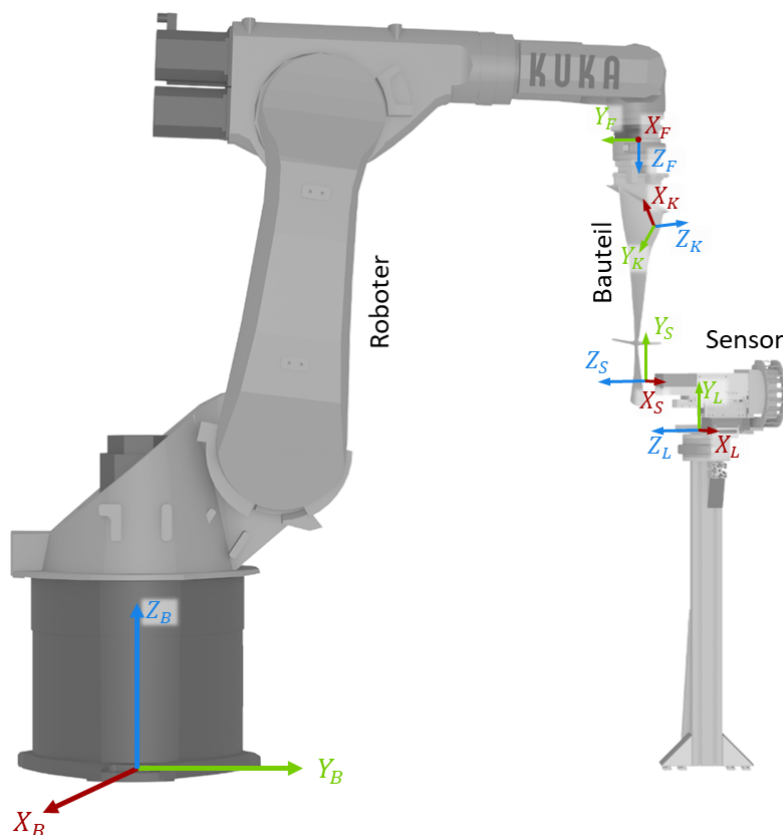


Abbildung 4: Koordinatensysteme Versuchsumgebung Freiform-Bauteil

Das Bauteilkoordinatensystem ist davon abhängig, wie es in dem zugehörigen Bauteilmodell festgelegt wurde. Da die Defektstellen im Anschluss wiederum im Bauteilsystem positioniert werden müssen wurde festgelegt, die Messdaten vor der Speicherung direkt in das Bauteilkoordinatensystem zu transformieren. Die Transformation findet nach der Übertragung an den Industrie PC in der 3D.OS Software statt. Die benötigten Positionen von Flansch, Vorschub-Linearachse und ggfs. Drehtisch müssen zuvor an den Industrie PC übertragen worden sein. Bei den unterschiedlichen Transformationen ist die Reihenfolge der Transformationen von dem ursprünglichen KOS in das passende KOS zu beachten. Die Formulierung für die korrekten Transformationen vom Sensorkoordinatensystem, in welchem die Daten aufgenommen werden, in das Bauteilkoordinatensystem ist

1. Rotationssymmetrische Bauteile (Triebwerk)

$${}^K_S T = {}^D_K T^{-1} {}^B_D T^{-1} {}^F_B T {}^F_S T$$

2. Freiformbauteile (Triebwerk)

$${}^K_S T = {}^F_K T^{-1} {}^B_F T^{-1} {}^B_L T {}^L_S T$$

Die Inversion ist notwendig, da die entsprechenden Transformationen für die andere Transformationsrichtung kalibriert wurden, oder von Roboter in der anderen Richtung definiert übertragen werden.

Auch wenn die Validierungsplattform für die Fahrwerkskomponenten einen leicht anderen Aufbau hat, ist die Messdatenaufbereitung komplett übertragbar und entspricht der für die rotationssymmetrischen Triebwerksbauteile.

2.2.3 AP 2.5 – Hybride Schadenserfassung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets hat die TUHH erfolgreich die Integration einer zusätzlich erforderlichen Kamera in den Sensorkopf für den hybriden Ansatz realisiert. Bei der Positionierung der Kamera wurde darauf geachtet, dass sie die Bewegung der beiden Linearachsen nicht beeinträchtigt. Die optimale Anbringung erfolgte am festen Teil der Mess-Linearachse, wie in Abbildung 5 dargestellt.

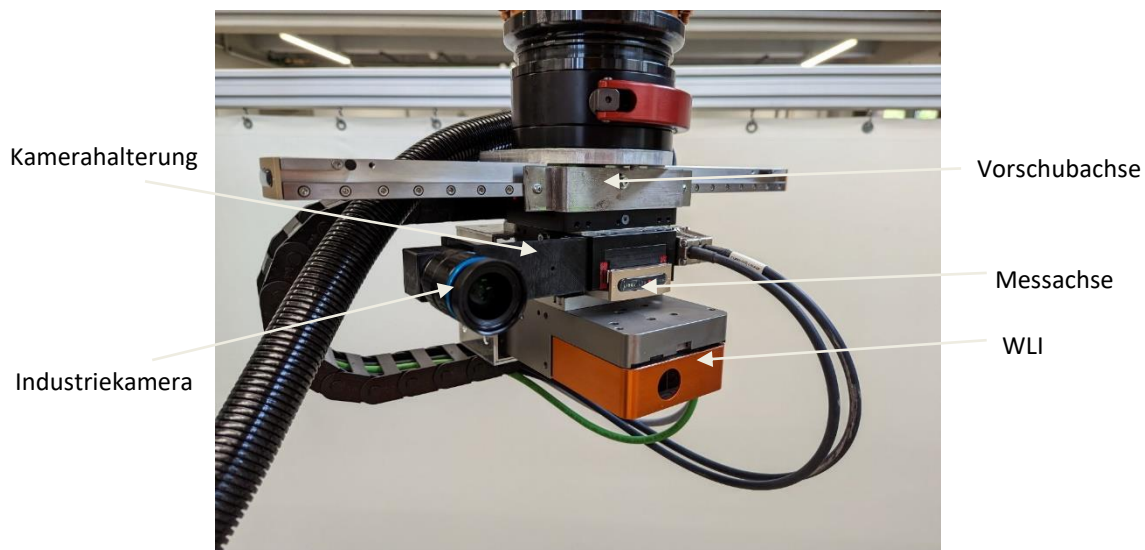


Abbildung 5: Integration Industriekamera in Sensorkopf.

Diese Positionierung gewährleistet, dass die zweite Achse in keiner Weise eingeschränkt wird, solange ausreichend Abstand zur Achse eingehalten wird. Dieser Abstand ist entscheidend, um mögliche Beeinträchtigungen der freien Beweglichkeit durch Kabel zu vermeiden und ein ungestörtes Sichtfeld für die Kamera sicherzustellen.

Die Konzeption der Befestigung für die Kamera berücksichtigte zudem die Montierbarkeit und Demontierbarkeit. Im Falle der Nichtverfolgung des hybriden Ansatzes kann die Kamera demontiert werden, um Kollisionsrisiken zu minimieren.

2.3 HAP 3 – Sensorhandhabung

2.3.1 AP 3.1 – Integration von Roboter und Präzisionsachse

Als Ergebnis dieses Arbeitspakets stand die integrierte Testumgebung betriebsbereit zur Verfügung. Die Testumgebung beinhaltet

- Plattform mit Dämpfungselementen
- Roboter
- Grip-Kupplung
- Bauteilaufnahme
- Drehtisch
- Vorschub-Linearachse
- Mess-Linearachse
- Weißlichtinterferometer
- Industrie PC
- Schaltschrank

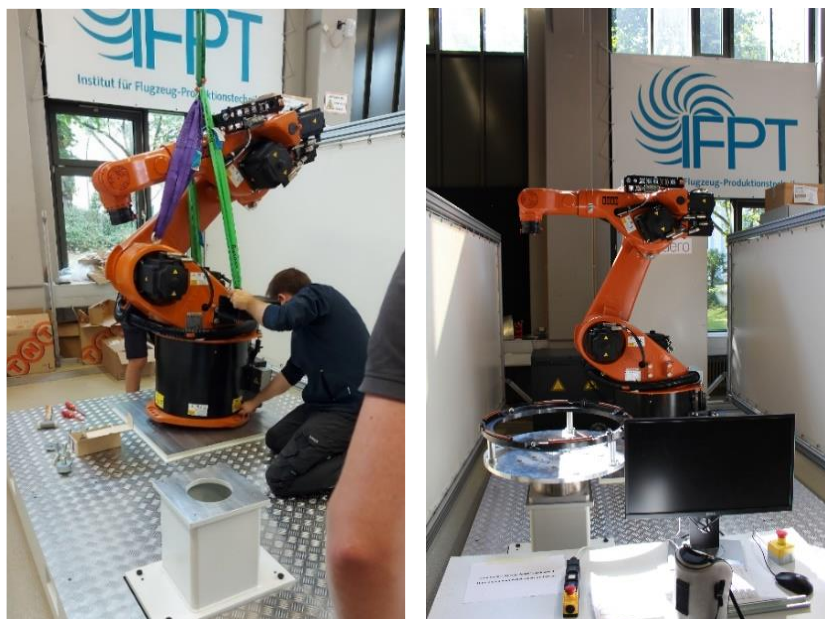


Abbildung 6: Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsanlage

Nach dem Aufbau (siehe Abbildung 6) wurde die Anlage in Betrieb genommen. Alle Komponenten funktionieren einwandfrei. Zum Testen der Anlage wurden Messungen an unterschiedlichen Bauteilen durchgeführt, dies ist in Abbildung 7 veranschaulicht.

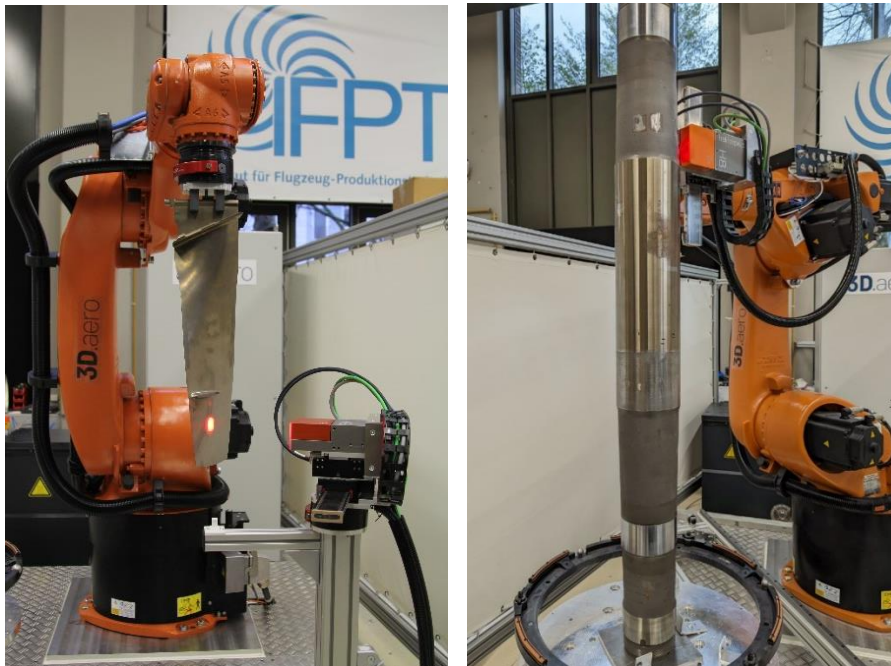


Abbildung 7: Testen der Anlage durch Durchführung von Messungen an unterschiedlichen Bauteilen; Testmessung an einer Triebwerksschaufel (links) und an einer Fahrwerksachse (rechts)

Da die Vermessung von Achsen mit diesem Testaufbau ursprünglich nicht geplant war, ist die Montage auf dem Drehtisch provisorisch durchgeführt worden, um nach Ende des Projektstopps schnellstmöglich erste Messungen mit dem vorhandenen Equipment durchführen zu können.

2.3.2 AP 3.2 – Kalibrierung: Konzeption und Implementierung

Ziel der TUHH in diesem Arbeitspaket war die Definition einer Kalibrierstrategie für die Bestimmung der Transformation zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten. Es gab zu Beginn des Projekts zwei Use-Cases, welche die Entwicklung von zwei unterschiedlichen Kalibrierstrategien bedingten, die Vermessung von rotationssymmetrischen Komponenten und die Vermessung von Freiformbauteilen.

Kalibrierung für Vermessung von rotationssymmetrischen Komponenten (Triebwerk)

Der erste Use-Case ist die Inspektion von rotationssymmetrischen Komponenten, die auf einem Drehtisch platziert werden. Das WLI wird in diesem Fall vom Roboter getragen und positioniert. Um Umrüstzeiten gering zu halten wurde geplant, den Sensorkopf als komplette Komponente umzumontieren. Das bedeutet, auch die für die Linien-WLI Vermessung von Freiformbauteilen notwendige Vorschub-Linearachse mit an den Roboter zu montieren, obwohl diese für die Vermessung der rotationssymmetrischen Komponenten nicht genutzt werden muss. Um diese nicht weiter für die Kalibrierung beachten zu müssen, ist es wichtig, die Achse immer auf der gleichen Position zu halten, damit sich die Transformation zwischen Flansch und Sensor nicht verändert, nachdem sie bestimmt wurde.

Für die Kalibrierung von WLI und Drehtisch können Kugeltargets genutzt werden. Diese eignen sich besonders gut für die Kalibrierung mit 3D Sensoren wie dem WLI, da die Orientierung des Sphärenmittelpunkts vernachlässigt werden kann. Die für diesen Use-Case notwendigen Kalibrierungen wurden ähnlich auch schon im Vorgängerprojekt „AutoInspect“ benötigt und entwickelt. Der Fokus lag deshalb in diesem Projekt auf der Entwicklung und Implementierung der Kalibrierstrategie für die Inspektion der Freiform-Bauteile. Der Vollständigkeit halber folgt eine Kurzfassung der Kalibrierstrategie. Genauer zum Vorgehen für den Use-Case ist im Zwischenbericht zum Berichtsjahr 2022 erklärt.

Für die Kalibrierung des Sensors muss in einem ersten Schritt die Kalibrierkugel (die an einem beliebigen Ort befestigt sein kann) aus unterschiedlichen Posen aufgenommen werden, wobei die Orientierung des Roboterflansches – entsprechend auch des Sensors – konstant bleiben muss. Hierdurch kann der rotatorische Anteil der Transformation zwischen Roboterflansch und Sensor bestimmt werden. Für den translatorischen Anteil muss die Kalibrierkugel dann mehrfach mit unterschiedlichen Orientierungen und Positionen des Roboters aufgenommen werden. Für den rotatorischen Anteil werden standardmäßig 8 Aufnahmen und für den translatorischen Anteil weitere 4 Aufnahmen gemacht. Nachdem aus diesen Daten die Transformation zwischen Roboterflansch und WLI bestimmt wurde, kann die Transformation zwischen Roboter und Drehtisch bestimmt werden. Hierfür wird die Kalibrierkugel (irgendwo am Drehtisch befestigt) mehrfach mit unterschiedlichen Roboterposen und Drehtischposen aufgenommen. Durch die Kugelmittelpunkte, welche durch die Messdaten bestimmt werden können, kann ein Kreisfit durchgeführt werden. Durch die Ebene des Kreises und den Mittelpunkt ist die Transformation vom Roboter zum Drehtisch bestimmt.

Als letztes muss das Bauteil eingemessen werden, damit die in der Bahnplanung geplanten Posen zu dem physischen Bauteil passen. Um den Einmess-Aufwand möglichst gering zu halten, sollte ein für die Bauteilart spezifisches Feature definiert werden, anhand dessen die 0° Orientierung festgelegt wird. Zusätzlich sollte an der Bauteilhalterung auf dem Drehtisch erkennbar sein, woran diese 0° Orientierung ausgerichtet wird. So müssen Posen für das Einmessen des Bauteils nur einmal geteacht werden und können danach immer wieder genutzt werden. Die meisten Features des hier betrachteten Inner-Liners sind bspw. eine symmetrische Anordnung um die Rotationsachse des Bauteils. Allerdings gibt es zwei Boroskopie-Ports, die eindeutig am Bauteil identifizierbar sind.

Diese beiden sind nicht in einem 180° Winkel, sondern gemäß Bauteilmodell in einem 126° Winkel um die Rotationsachse zueinander platziert. Dadurch ist eine definierte Bestimmung der Orientierung des Bauteils möglich. Die Referenz auf dem Drehtisch ist die größte der drei Kalibrierkugeln. Die rechte der beiden Öffnungen wird mittig über der Kalibrierkugel ausgerichtet, wie in Abbildung 8 dargestellt.

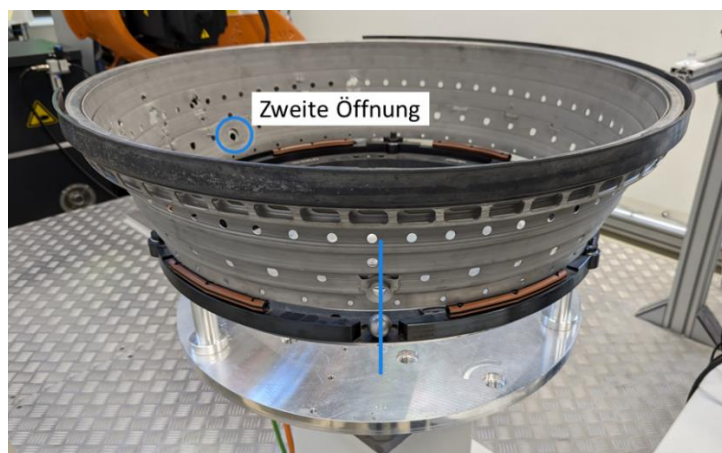


Abbildung 8: Platzierung Innerliner auf Drehtisch mit Ausrichtungsvorgabe

Beim Einmessen von Bauteilen, die keine explizit nicht rotationssymmetrischen Features besitzen, ist die genaue Ausrichtung nicht so relevant. Wenn es wiederkehrende Features gibt, kann ein beliebiges dieser Features genommen werden, um das Bauteil daran auszurichten.

Für das Einmessen sollte das WLI genutzt werden, da die Genauigkeit der Einmessung dann höher ist, was für die WLI Messungen kritisch ist. Die Messdaten werden in das Koordinatensystem des Drehtisches transformiert, da die Transformation zwischen Drehtisch KOS und Bauteil KOS bestimmt werden muss. Nach dem gezielten Aufnehmen leicht zuzuordnender Features kann das Bauteilmodell in die

transformierten Messdaten gefittet werden. Dadurch, dass das Bauteil auf dem Tisch bereits ausgerichtet platziert wird, passen das reale Bauteil und das Bauteilmodell im Anlagenmodell bereits gut zueinander. Dadurch können Algorithmen wie Iterative-Closest-Point einfach angewendet werden, um das Bauteilmodell in die Punktwolken aus den WLI-Aufnahmen zu fitten, auch wenn sich die aufgenommenen Bauteilfeatures über die Oberfläche aufgrund der Rotationssymmetrie wiederholen. Für das Fitting können Open-Source Tools wie bspw. CloudCompare [13] genutzt werden. Dieser Schritt ist für die Freiformbauteile genauer dargestellt.

Kalibrierung für Vermessung von Freiformbauteilen (Triebwerk)

Der zweite Use-Case ist die Inspektion von Freiformbauteilen, in unserem Fall speziell von Triebwerkschaufeln. Diese sollen in einem hybriden Ansatz oder auch ganzheitlich mit dem WLI inspiziert werden. Für den hybriden Ansatz ist zusätzlich zum WLI eine Kamera in den Sensorkopf integriert. Außerdem ist in diesem Fall die zweite Linearachse, auf dem das WLI befestigt ist, relevant und soll für großflächige Messungen verfahren werden. Der Sensorkopf ist statisch im Raum platziert, während der Roboter die Triebwerksschaufeln trägt.

Kalibriert werden müssen in diesem Fall die Transformationen zwischen Roboter und WLI, zweiter Linearachse sowie Kamera und das Einmessen des Bauteils. Die Koordinatensysteme, die relevant für die Kalibrierung der Transformation zwischen Roboter, zweiter Linearachse und WLI sind, sind in Abbildung 9 visualisiert. Um die Abbildung übersichtlicher zu gestalten, wurde die Kamera hier weggelassen. In diesem Kapitel wird nun zunächst die Kalibrierung des WLIs und der Vorschub-Linearachse erläutert, anschließend die Kalibrierung der Kamera und zuletzt die Einmessung der Bauteile, welche am Roboterflansch befestigt wurde.

Das Kalibriertarget ist am Roboterflansch befestigt. Die genaue Transformation vom Flansch zur Kalibrierkugel muss dank geschicktem Messablauf nicht bekannt sein. Die Transformationen zur Kalibrierkugel werden immer zum Kugelmittelpunkt angegeben. Um die Transformation vom Sensor zum Kugelmittelpunkt zu bestimmen, wird in die Messdaten eine Kugel mit bekanntem Durchmesser gefittet.

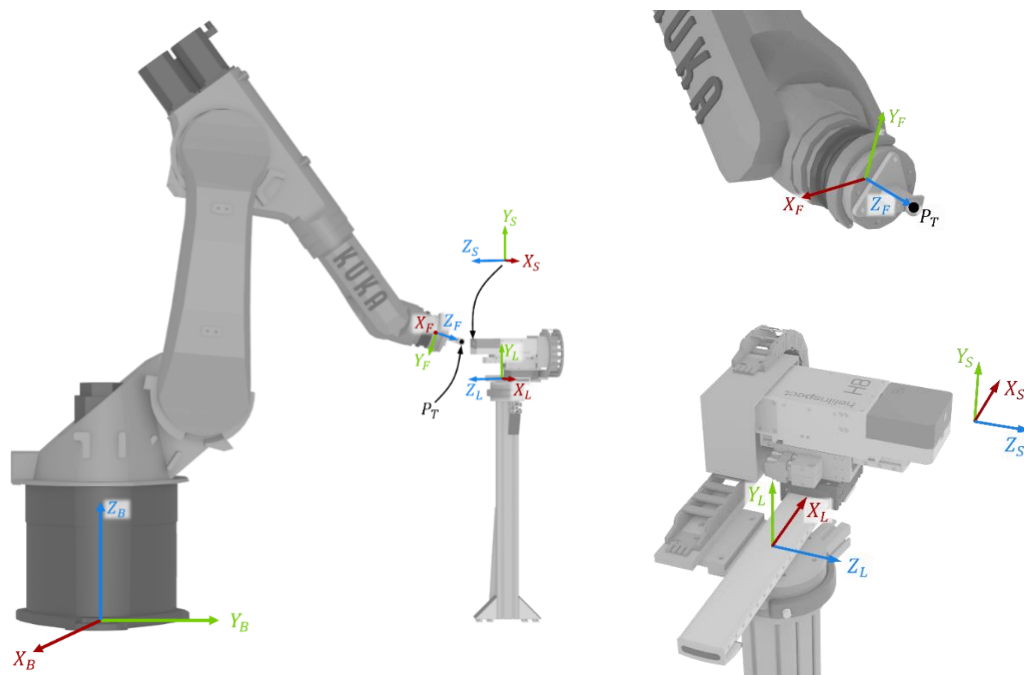


Abbildung 9: Definition der Koordinatensysteme für die Kalibrierung

Mathematisch betrachtet müssen die Transformationen vom Roboter zur Kalibrierkugel die gleichen sein, unabhängig davon, ob die Transformation über den Roboterflansch betrachtet wird oder über den Sensorkopf. Als Formel ergibt sich

$$\begin{bmatrix} {}^B_R & {}^B_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^F_t_T \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B_R & {}^B_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^L_R & {}^L_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^S_t_T \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ausgeschrieben ergibt sich dies zu

$${}^B_R {}^F_t_T + {}^B_t = {}^B_R {}^L_R {}^S_t_T + {}^B_R {}^L_t + {}^B_t$$

Allgemein konstant sind ${}^F_t_T$, ${}^B_R$, ${}^L_R$, und ${}^L_t$. Die nicht konstanten Komponenten sind im Folgenden mit den Subskripten i oder j für unterschiedlichen Aufnahmen gekennzeichnet.

$${}^B_R {}^F_t_T + {}^B_t_i = {}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,i} + {}^B_R {}^L_t_i + {}^B_t$$

$${}^B_R {}^F_t_T + {}^B_t_j = {}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,j} + {}^B_R {}^L_t_j + {}^B_t$$

Durch Messung bekannt sind ${}^B_R$, ${}^B_t$ und ${}^S_t_T$. Diese müssen nicht bestimmt werden.

In den ersten beiden Schritten wird die zweite Linearachse konstant an einer Position gehalten. Hierdurch wird die Transformation von Roboterbasis zu WLI zunächst bestimmt als gäbe es keine zweite Linearachse. Dann wird zunächst die Orientierung des Roboterflansches konstant gehalten und mehrere Messungen der Kalibrierkugel in unterschiedlichen Positionen gemacht.

Die Bedingungen für den ersten Schritt sind demnach ${}^L_t_i = {}^L_t_j$ und ${}^B_R {}^F_t_i = {}^B_R {}^F_t_j$. Betrachtet man nun die Differenz zwischen zwei unterschiedlichen Aufnahmen ergibt sich

$$\begin{aligned} {}^B_R {}^F_t_T + {}^B_t_i - {}^B_R {}^F_t_T + {}^B_t_j &= {}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,i} + {}^B_R {}^L_t_i + {}^B_t - ({}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,j} + {}^B_R {}^L_t_j + {}^B_t) \\ {}^B_t_i - {}^B_t_j &= {}^B_R {}^L_R ({}^S_t_{T,i} - {}^S_t_{T,j}) \end{aligned}$$

Durch diesen Schritt kann die kombinierte Rotation ${}^B_R {}^L_R$ von Roboter zu Linearachse zu WLI bestimmt werden. Die kombinierte Rotation wird in den folgenden Formeln als leicht ausgegraut dargestellt.

Für den zweiten Schritt werden Messungen mit beliebiger Roboterorientierung und -position aber weiterhin mit gleichbleibender Position der zweiten Linearachse gemacht. Die Bedingung ist entsprechend ${}^L_t_i = {}^L_t_j$. Umgestellt nach ${}^F_t_T$ und gleichgesetzt ergibt sich

$$\begin{aligned} {}^B_R {}^F_t_i^{-1} ({}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,i} + {}^B_R {}^L_t_i + {}^B_t - {}^B_t_i) &= {}^B_R {}^F_t_j^{-1} ({}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,j} + {}^B_R {}^L_t_j + {}^B_t - {}^B_t_j) \\ ({}^B_R {}^F_t_i^{-1} - {}^B_R {}^F_t_j^{-1}) ({}^B_R {}^L_t_i + {}^B_t) &= {}^B_R {}^F_t_j^{-1} ({}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,j} - {}^B_t_j) - {}^B_R {}^F_t_i^{-1} ({}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,i} - {}^B_t_i) \end{aligned}$$

Hiermit kann die kombinierte Translation ${}^B_R {}^L_t_i + {}^B_t$ für die ausgewählte konstante Position der zweiten Linearachse bestimmt werden.

Im nächsten Schritt wird nur die Orientierung des Roboterflansches konstant gehalten. Die Positionen des Flansches und der zweiten Linearachse werden zwischen den Messaufnahmen variiert. Die Bedingung ist also ${}^B_R {}^F_t_i = {}^B_R {}^F_t_j$. Aus der Differenz zwischen zwei unterschiedlichen Aufnahmen ergibt sich

$$\begin{aligned} {}^B_R {}^F_t_i {}^F_t_T + {}^B_t_i - {}^B_R {}^F_t_j {}^F_t_T + {}^B_t_j &= {}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,i} + {}^B_R {}^L_t_i + {}^B_t - ({}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,j} + {}^B_R {}^L_t_j + {}^B_t) \\ {}^B_t_i - {}^B_t_j &= {}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,i} + {}^B_R {}^L_t_i - {}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,j} - {}^B_R {}^L_t_j \\ {}^B_t_i - {}^B_t_j - ({}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,i} - {}^B_R {}^L_R {}^S_t_{T,j}) &= {}^B_R ({}^L_t_i - {}^L_t_j) \end{aligned}$$

Die Differenz $\Delta t_L = {}^L s t_j - {}^L s t_i$ ist bekannt durch die interne Positionsbestimmung der zweiten Linearachse. Dementsprechend kann durch die Gleichung ein Teil der Rotationsmatrix ${}^B_L R$ bestimmt werden. In diesem Fall kann nur ein Teil (die Ausrichtung der x-Achse) bestimmt werden, da die Linearachse sich nur in eine Richtung bewegt und das Gleichungssystem damit linear abhängige Gleichungen enthält. Der Einfachheit halber (und da es im Grunde nicht entscheidend ist) wird das Koordinatensystem der Linearachse so gewählt, dass die Bewegungsrichtung der Linearachse mit ihrer x-Achse übereinstimmt und die Ausrichtung der y-Achse dieselbe ist wie die des Sensors. Die Ausrichtung der x-Achse wird über die Messdaten berechnet und die Ausrichtung der y-Achse ist nach unserer Festlegung bereits durch die Kombinierte Rotationsmatrix ${}^B_L R {}^L_S R$ bestimmt. Die Ausrichtung der z-Achse kann einfach durch das Kreuzprodukt bestimmt werden. Dadurch ist dann die Rotationsmatrix ${}^B_L R$ voll bestimmt.

Da die kombinierte Rotationsmatrix ${}^B_L R {}^L_S R$ bekannt ist, kann ${}^L_S R$ bestimmt werden durch

$${}^L_S R = {}^B_L R^{-1} ({}^B_L R {}^L_S R)$$

Die kombinierte Translation ist rechnerisch nicht auseinander zu dividieren. Tatsächlich lässt sich die kombinierte Transformation vom Roboter zum WLI für jede Position der zweiten Linearachse mithilfe der einmalig kombinierten Transformation bestimmen. Sei die kombinierte Transformation ${}^B_S t_i$ für Position i durch die Kalibrierung bestimmt und die Transformation ${}^B_S t_j$ ist die kombinierte Transformation für die Position j. Der Zusammenhang lässt sich herleiten durch

$$\begin{aligned} {}^B_S t_i - {}^B_S t_j &= {}^B_L R {}^L_S t_i + {}^B_L t - ({}^B_L R {}^L_S t_j + {}^B_L t) \\ {}^B_S t_i - {}^B_S t_j &= {}^B_L R ({}^L_S t_i - {}^L_S t_j) = -{}^B_L R \Delta t_L \\ {}^B_S t_j &= {}^B_S t_i + {}^B_L R \Delta t_L \end{aligned}$$

Die Transformation ist immer abhängig von der Position der Linearachse.

Für das Vermessen eines Bauteils muss nun noch das Bauteil eingemessen werden. Dazu sollte das Bauteil immer in der möglichst gleichen Pose am Roboterflansch befestigt werden. Genau wie bei den rotationssymmetrischen Komponenten können so Roboterposen geteacht werden, die immer wieder zum Einmessen der Bauteile gleichen Typs genutzt werden. Es sollten dabei Roboterposen gewählt werden, bei denen möglichst featurereiche Bauteilabschnitte vermessen werden können. Für die Triebwerksschaufeln sind dies vor allem Kanten und Ecken, da die restlichen Flächen kaum einzigartigen Features aufweisen. Auch hier sollte die Einmessung immer mit dem WLI durchgeführt werden, um möglichst genau zu sein. Für die Triebwerksschaufel des CFM56-5B Triebwerks wurden zum Beispiel zwei Ecken, eine Kante an der Spitze der Triebwerksschaufel und eine Aufnahme der Fläche gewählt. Die Aufnahme der Fläche wurde genutzt, um die Orientierung möglichst genau bestimmen zu können. Alle Posen wurden für eine Seite der Triebwerksschaufel geteacht, um die Einmesszeiten möglichst gering zu halten. Nach dem Aufnehmen der Punktwolken und der Transformation der Messdaten in das KOS des Roboterflanschs, kann das Bauteilmodell gefittet werden. Solch ein Fitting ist in Abbildung 10 dargestellt. Für das Fitting wurde die Software CloudCompare [13] genutzt.

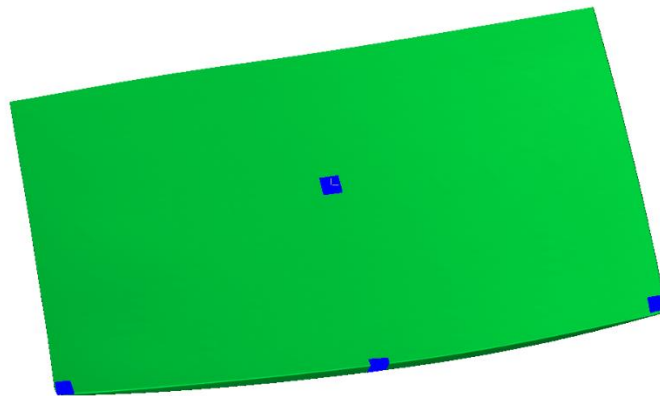


Abbildung 10: Fitting für das Einmessen des Bauteils

Für die Kalibrierung der Kamera wird ein Schachbrettmuster eingesetzt. Für die Befestigung am Roboter wurde eine Halterung 3D-gedruckt. Die Genauigkeit der Halterung ist hierbei nicht relevant. Die verwendeten Kamerakalibrierungen sind Stand der Technik und deshalb im Rahmen dieses Abschlussberichts nicht weiter ausgeführt.

Kalibrierung für Vermessung von Freiformbauteilen (Fahrwerk)

Für die Kalibrierung und das Einmessen der Fahrwerkskomponenten ist der Ansatz derselbe wie für die rotationssymmetrischen Komponenten des Triebwerks. Besonders die Freiformbereiche der Komponenten eignen sich dabei besonders gut für die Definition eines Referenzfeatures und das Durchführen von Einmessungen

2.3.3 AP 3.3 – Bahngenerierung zur Inspektion

Nach Abschluss dieses Arbeitspaktes durch die TUHH existierten Softwarebausteine zur automatisierten Bahnplanung für rotationssymmetrische und freigeformte Bauteile sowie für den hybriden Ansatz. Die Bahnplanungen vor und nach Projektstopp werden in diesem Kapitel grundsätzlich getrennt betrachtet, da sich durch unterschiedliche Voraussetzungen und Randbedingungen unterschiedliche Konzepte ergaben. Zunächst wird in diesem Kapitel die Bahnplanung für die Triebwerksbauteile betrachtet. Dabei wird unterschieden zwischen dem ganzheitlichen Ansatz (komplette Inspektion mit dem WLI) und dem hybriden Ansatz. Im folgenden Abschnitt wird zunächst der ganzheitliche Ansatz betrachtet. Im Anschluss folgt die Berichterstattung zum hybriden Ansatz und am Ende des Abschnitts zu diesem Arbeitspaket wird der Ansatz bzgl. der Pfadplanung für Fahrwerksbauteile erklärt.

2.3.3.1 Bahnplanung Triebwerksbauteile – ganzheitlicher Ansatz

Generell muss für die Bahnplanung nicht nur die eigentliche Planung der Roboterpfade, sondern auch das vor und Nachbereiten der notwendigen und erzeugten Daten mitbetrachtet werden. Die gesamte Prozesskette für die Bahnplanung umfasst

1. Vorbereiten der Bauteildaten
2. Erzeugen von Sensorposen
3. Lösen des Traveling Salesman Problems
4. Post-Processing
5. Simulative Validierung der erzeugten Pfade

Als allererstes mussten die Anforderungen an die Bahnplanung ermittelt werden. Die Anforderungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1 - Anforderungen an die adaptive Bahnplanung

ID	Name	Beschreibung	F/W
1	Beliebige Bauteilgeometrien	Die Pfadplanung muss sowohl für Freiform als auch für rotations-symmetrische Geometrien funktionieren	F
2	Flächen wählbar	Die in der Pfadplanung berücksichtigten Flächen des zu inspizierenden Bauteils können durch den Benutzer in einem ersten Schritt ausgewählt werden	W
3	Automatisierungsgrad	Die adaptive Pfadplanung soll einen möglichst hohen Automatisierungsgrad aufweisen	W
4	Abdeckungsfläche	Die durch die geplanten Pfade abgedeckte Bauteiloberfläche muss möglichst groß sein	F
5	Kollisionsfreie Pfade	Die geplanten Pfade müssen kollisionsfrei abfahrbar sein. Besonders durch die geringe Distanz des Sensors, die während der Messungen notwendig ist, ist eine Berücksichtigung von Kollisionsberechnungen in der Pfadplanung unumgänglich	F
6	Überlappung	Die Pfadpunkte werden so geplant, dass die Messungen überlappen. Die Überlappung ist für die spätere Auswertung der Daten und Defekterkennung entscheidend – Wert: mindestens 0,5mm	F
7	Zeitoptimalität	Die durch die adaptive Pfadplanung errechneten Pfade ergeben möglichst kurze Inspektionszeiten	W
8	Systemungenauigkeiten berücksichtigen	Durch das sehr kleine Messfeld können bereits kleine Abweichungen dazu führen, dass Messbereiche nicht mehr überlappen oder Flächen sogar gar nicht erfasst werden. Die Ungenauigkeiten setzen sich im Bereich des Handlings vor allem aus der Roboterungenauigkeit, der Bauteileinmessung/Bauteilpositionierung und der Kalibrierungenauigkeit, welche wiederum hauptsächlich aus der Ungenauigkeit des Roboters entsteht, zusammen. Diese Ungenauigkeiten werden in der Pfadplanung berücksichtigt	F
9	Zustellung Oberfläche	Durch die Entwicklung des Linien-WLI mit Kreuztischanordnung, kann die Messbewegung mit Offsets an die Oberflächenkontur angepasst werden (s. Kap. 2.2.1). Dies sollte in der Pfadplanung berücksichtigt werden.	W

Anhand dieser Anforderungen wurden grundlegende strukturelle Überlegungen angestellt. Die Bahnplanung muss zwingend offline erfolgen, wie in Kapitel 1.4 beschrieben. Für die offline Bahnplanung ist entsprechend eine Planungsbasis in Form von Daten erforderlich. Ein CAD-Anlagenmodell wurde von der 3D.aero zur Verfügung gestellt und die Bauteil CAD Daten zu den Triebwerksbauteilen wurde durch die LHT bereitgestellt. Für die Planung von Sensorposen für die Inspektion müssen relative Posen zwischen Bauteil und Sensor geplant werden. Für einzelne Posen ist hierbei generell wichtig, dass die zu inspizierende Oberfläche nicht durch andere Komponenten verdeckt ist (Okklusionsfrei), dass die zu inspizierende Oberfläche im Messbereich des Sensors liegt (Sichtbar), dass der Winkel zwischen der Oberflächennormale und der optischen Achse des Sensors passend ist (Winkeltreu), dass die Pose durch den Roboter erreichbar ist (Erreichbar) und dass die Pose für alle Systemkomponenten kollisionsfrei ist (Kollisionsfrei).

Im Rahmen dieses Projekts wird angenommen, dass die Posen grundsätzlich im Arbeitsraum des Roboters liegen. Drehtisch und Sensorhalterung wurden auf der Plattform gezielt so platziert, dass die betrachteten Bauteile hierbei keinerlei Probleme bereiten. Zugleich wird angenommen, dass die Posen

roboterseitig kollisionsfrei sind. Auf der Plattform ist ausreichend Platz, um eine solche Annahme valide treffen zu können. Einzig die Kollision zwischen Sensor und Bauteil wird bei der Bahnplanung berücksichtigt, da der Messabstand des Sensors zur Bauteiloberfläche so gering ist, dass gerade bei den Freiformbauteilen hohes Kollisionsrisiko besteht.

Gemäß der Analyse des Stands der Technik ist die Planung von Sensorposen der Teil der Bahnplanung, den es weiter zu entwickeln gilt. Das größte Defizit wurde hierbei in der Vernachlässigung der Orientierung und der Flexibilität des Messfelds definiert. Besonders diese beiden Punkte sind für die Inspektion durch Linieninterferometrie äußerst relevant. Den Herausforderungen, die eine solch flexible und adaptive Bahnplanung bietet, wurden mithilfe von kontinuierlichen Optimierungsansätzen begegnet. Da die betrachteten Probleme – Sichtbar, Okklusionsfrei, Winkeltreu, Kollisionsfrei – natürlicherweise diskret sind – etwas liegt im Messfeld oder eben nicht, usw. – mussten hierfür geeignete Approximationsansätze definiert werden. Für die kontinuierliche Optimierung werden dann noch zusätzlich die Ableitungen benötigt.

Das Optimierungsproblem wurde wie folgt definiert: „Maximiere die Abdeckung der Oberfläche durch Messungen mit möglichst kleinen Messlängen unter der Bedingung der Kollisionsfreiheit.“ Mathematisch beschrieben ergibt sich das Problem zu

$$\begin{aligned} \min & -g_{Abd} * f_{Abd}(\mathbf{x}) + g_{Mlaenge} * f_{Mlaenge}(\mathbf{l}) \\ \text{mit } & c_{Koll}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned}$$

Dabei ist f_{Abd} die Abdeckungsberechnung, welche bereits die Informationen zu Sichtbarkeit, Okklusionsfreiheit und Winkeltreue berücksichtigt. Die Funktion geht negativ in die Minimierung ein, da die Abdeckung maximiert werden soll. $f_{Mlaenge}$ summiert die Messlängen aller Messfelder. Für eine zeitoptimierte Inspektion sollten die Messfelder möglichst kurzgehalten werden, für eine möglichst große Abdeckung müssen diese allerdings möglichst groß sein. Die Gewichtungen g_{Abd} und $g_{Mlaenge}$ werden genutzt, um die beiden Funktionen auszubalancieren. Die Funktion c_{Koll} beschreibt die Bedingung der Kollisionsfreiheit. Die Vektoren $\mathbf{x}$, $\mathbf{l}$ sind die Optimierungsvariablen, dabei ist $\mathbf{l}$ eine Untermenge von $\mathbf{x}$. Jede Sensorpose j (im Folgenden auch Messfeld genannt) hat eine Parametrisierung aus Position (x_j, y_j, z_j) und Orientierung $(r_{z,j}, r_{y,j}, r_{x,j})$ des Mittelpunktes sowie eine Länge (l_j). Der Mittelpunkt des variablen Messfelds wird dabei angenommen als die Position des Sensor-KOS bei einer Position der zweiten Linearachse von 160mm.

Mit leichten Veränderungen kann das Optimierungsproblem auch für nicht variable Messfelder genutzt werden. In diesem Fall ist die Länge des Messfelds kein Teil der Optimierungsvariablen mehr und die Messfeldlängen werden nicht mehr explizit als Funktion in der Zielfunktion berücksichtigt. Die leicht geänderte Formulierung des Optimierungsproblems ist

$$\begin{aligned} \min & -f_{Abd}(\mathbf{x}) \\ \text{mit } & c_{Koll}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned}$$

Die direkte Minimierung der Anzahl der Messfelder ist bei beiden Problemstellungen (variable Länge oder nicht) keine Option. Eine Veränderung der Anzahl der Messfelder zöge eine Änderung der Anzahl an Umgebungsvariablen nach sich, was für den Optimierungsvorgang unzulänglich ist. Stattdessen wird ein anderes Vorgehen gewählt. Die Anzahl der Messfelder wird Schritt für Schritt erhöht. Angefangen wird eine Optimierung mit einem Messfeld, die Anfangspose wird dabei willkürlich gewählt. Dieses Messfeld wird so optimiert, dass das Meiste der Oberfläche messbar wird, wie durch eine Messung möglich ist. Dann wird die Optimierung für zwei Messfelder wiederholt. Dabei wird als Anfangspose des ersten Messfelds die Pose aus dem vorherigen Optimierungsergebnis übernommen. Für das zweite Messfeld wird die Pose zum Anfang der Optimierung willkürlich festgelegt. Willkürlich bedeutet

in diesem Zusammenhang immer, dass die Pose zufällig irgendwo auf der zu Beginn der Optimierung noch nicht abgedeckten Bauteiloberfläche festgelegt wird.

Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis durch das Hinzunehmen neuer Messfelder nicht mehr Oberfläche abgedeckt werden kann als mit der vorangegangenen Optimierung. Die vollständige Abdeckung kann ebenfalls als Abbruchkriterium herangezogen werden, es wird jedoch höchst wahrscheinlich Bereiche der Oberfläche geben, die durch den geringen Messabstand des WLI zwangsläufig zu Kollisionen führen würden und demnach nicht vermessen werden können. Dementsprechend ist die nicht mehr voranschreitende Zunahme der Abdeckung der Oberfläche hier besser als Abbruchkriterium geeignet.

In den folgenden Abschnitten wird die Realisierung der einzelnen Prozessschritte für die gesamte Pfadplanungsthematik detailliert. Da das Vorgehen für rotationssymmetrische und Freiform-Bauteile in großen Teilen identisch ist, werden die Schritte hierbei zunächst für die Freiformbauteile erklärt und im Anschluss nur noch die Unterschiede für das Vorgehen bei rotationssymmetrischen Bauteilen beschrieben.

Vorbereiten der Daten für die Optimierung – Freiformbauteil

Für die Optimierung der Messfelder sind ein Modell des Bauteils und die Modellierung der Messfelder notwendig. Als Bauteilmodell wurde sich für die Diskretisierung durch Punkte entschieden. Zusätzlich wurden den Punkten Normalenvektoren zugewiesen, die den Normalen der Oberfläche des Bauteils an diesen Punkten entsprechen. Für die präzise Darstellung der Form eines Bauteils ist in manchen Bereichen eine höhere Punktedichte erforderlich. In der Optimierung könnte dies dazu führen, dass Bereiche mit höheren Punktedichten als „wichtiger“ erscheinen als andere. Aus diesem Grund wurden den Punkten zusätzlich zu den Normalen ebenfalls Gewichte zugewiesen. Diese Punkte werden gemäß der Punktedichte antiproportional ermittelt. Die Schritte für die Erzeugung einer geeigneten Punktdiskretisierung des Bauteils sind

1. Exportieren der gewünschten Flächen als STL
2. Verfeinern des STL-Modells
3. Berechnen der Oberflächennormalen für die Knotenpunkte des STL-Modells
4. Berechnen der Gewichtung für die Knotenpunkte

Das Exportieren als STL Modell ist in allen gängigen CAD Tools möglich. Wenn einstellbar, sollte bei dem Export auf die Erzeugung von Dreiecken geachtet werden, deren Kanten möglichst gleich lang sind. Bei sehr schmalen Dreiecken häufen sich sonst Eckpunkte von Dreiecken in den entsprechenden Bereichen. Im Anschluss muss das STL Modell ggf. weiter verfeinert werden. Die Dichte der erzeugten Eckpunkte der Dreiecke ist ansonsten zu gering für die Planung der Sensorposen. Für die Verfeinerung des STL Modells wird iterativ die längste Kantenlänge aller Dreiecke halbiert und an dieser Stelle ein neuer Punkt in das Mesh eingefügt. Der Prozess iteriert so lange, bis die längste Kantenlänge unter dem gewünschten Grenzwert liegt. Der Grenzwert hängt dabei von der gewünschten Überlappung ab.

Für die Berechnung der Oberflächennormalen werden die Normalen des Dreiecksmeshes genutzt. Für Punkte auf Flächen werden dabei die Normalen aller anliegenden Dreiecke gemittelt. Für Punkte auf Kanten ist die Berechnung der zugeordneten Normalen abhängig davon, ob es eine Innen- oder eine Außenkante ist. Die Unterscheidung ist in Abbildung 11 veranschaulicht.

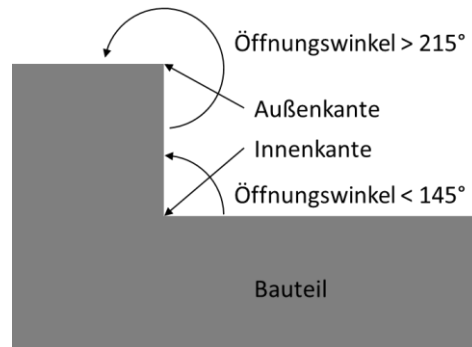


Abbildung 11: Öffnungswinkel und Katendefinition

Wenn zwei Dreiecke am selben Punkt anliegen, deren Öffnungswinkel kleiner ist als 145° gilt die Kante als Innenkante. In diesem Fall, wird wie auch bei Punkten auf Flächen einfach das Mittel aller anliegen Dreiecksnormalen genommen. Wenn zwei Dreiecke am selben Punkt anliegen, deren Öffnungswinkel größer ist als 215° gilt die Kante als Außenkante. In diesem Fall werden die Normalen über den K-means Algorithmus in zwei Normalen-Sets aufgeteilt. Der Entsprechende Punkt wird dupliziert und den beiden Punkten werden dann jeweils die Mittelwerte der beiden Normalen-Sets zugewiesen. Dieses Vorgehen sorgt dafür, dass die Kanten geometrie auch korrekt erfasst werden kann.

Anschließend wird noch die Gewichtung der einzelnen Punkte berechnet. Hierfür wird bestimmt, wie viele Punkte sich in einem gewissen Radius r um den betrachteten Punkt befinden und welchen Abstand diese zum betrachteten Punkt haben. Zusätzlich wird der Winkel zwischen den zugehörigen Normalen und der Normalen des betrachteten Punkts berechnet. Finden sich keine Punkte mit geeignetem Radius und Normalenrichtung, ist die Gewichtung des Punktes gleich 1. Bei den restlichen Punkten wird durch den Winkel zwischen den Normalen und den Abständen der anderen Punkte zum betrachteten Punkt eine Gewichtung berechnet. Dabei ist die Regel: Je größer der Unterschied zwischen den Normalen und je weiter der Abstand der anderen Punkte, desto näher ist die Gewichtung des betrachteten Punktes an 1. Formal lässt sich das für Punkt j beschreiben als:

$$\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^p d_{i,j} * f(\alpha_{i,j})}{\sum_{i=1}^p f(\alpha_{i,j}) - 1} / r$$

Hierbei sind $d_{i,j}$ und $\alpha_{i,j}$ die Distanzen und Winkel zwischen den Normalen der Punkte zu Punkt j . Dabei werden nur Punkte betrachtet, die in einem gewissen Radius r um den betrachteten Punkt liegen. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 12 dargestellt.

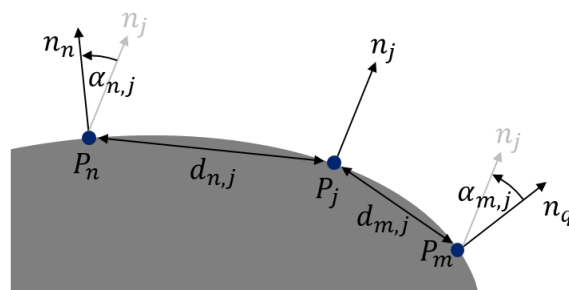


Abbildung 12: Distanz und Winkel zwischen Oberflächenpunkten

Um die Gewichtung möglichst passend für die Optimierung zu gestalten, wird eine Funktion des Winkels genutzt, die später auch in der Optimierung verwendet wird. Diese Funktion wird näher im Rahmen von Abschnitt 2.3.3.1 beschrieben.

Erzeugen von Sensorposen – Freiformbauteil

Nach der Vorbereitung der Sensordaten können auf dieser Basis die Sensorposen geplant werden. Hierfür wurde im Rahmen des Projekts ein Ansatz basierend auf kontinuierlichen Optimierungsansätzen entwickelt. Die doppelte Logistische Funktion wird im Verlauf des Textes noch öfter verwendet und wird deswegen hier kurz eingeführt.

Die Logistische Funktion kann in folgender einfachen Form geschrieben werden:

$$f_{logi}(x) = \frac{L}{1 + e^{-k*(x-x_0)}}$$

Dabei bestimmt L den Grenzwert, gegen den die Funktion strebt, k die „Steigung“ der Funktion und x_0 die Verschiebung in x-Richtung. Zur Veranschaulichung ist der Verlauf der Funktion in Abbildung 13 schematisch dargestellt.

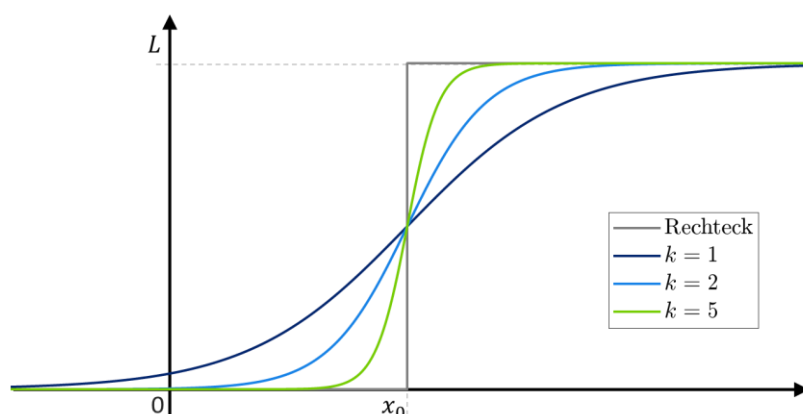


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Logistischen Funktion

Multipliziert man zwei Logistische Funktionen, mit der Voraussetzung, dass sich die beiden Funktionen nur durch die Vorzeichen der Variablen k und x_0 unterscheiden, erhält man die Approximation einer Rechteckfunktion. Als Funktion geschrieben ergibt sich

$$f_{dl}(x) = \frac{L}{1 + e^{-k*(x-x_0)}} * \frac{L}{1 + e^{k*(x+x_0)}}$$

Je höher der Wert für k , desto genauer approximiert die Funktion die Rechteckfunktion. Ein Beispiel hierfür ist mit $L = 1$ und $x_0 = -3$ ist in Abbildung 14 dargestellt.

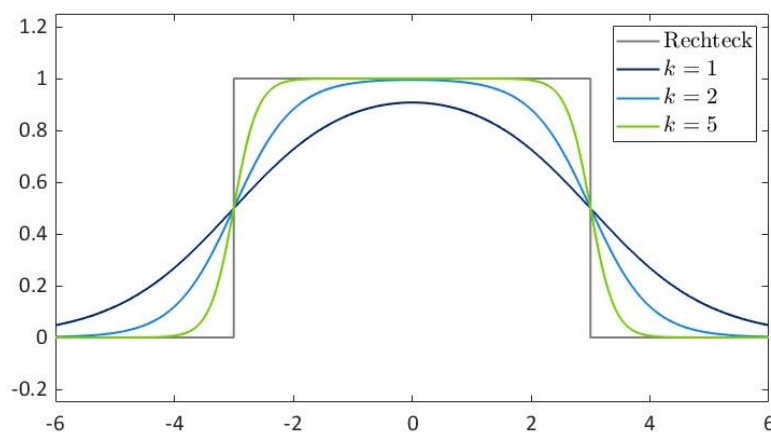


Abbildung 14: Beispielhafter Verlauf der doppelten Logistischen Funktion

Diese Form der Approximation wird im Folgenden für diskrete Probleme zu Hilfe genommen. Für die Optimierung der Sensorposen wurde eine Funktion aufgestellt, die für eine Liste an Sensorposen die Abdeckung der Oberfläche durch diese Sensorposen berechnet.

Zunächst wird die Abdeckung eines einzigen Punktes ($\mathbf{P}_i$ mit Normale $\mathbf{n}_i$) durch eine einzelne Sensorpose j (mit Parametrisierung $\mathbf{x}_j$) betrachtet. Die Parametrisierung für Sensorpose j beinhaltet die Koordinaten des Mittelpunkts des Messvolumens (x_j, y_j, z_j), die Orientierung angegeben als Eulerwinkel mit Z-Y-X Konfiguration ($r_{z,j}, r_{y,j}, r_{x,j}$) und die Länge des Messfelds (l_j).

Um die Abdeckung von $\mathbf{P}_j$ zu berechnen, muss überprüft werden, ob dieser im Messfeld liegt, keine Okklusion vorliegt und der Winkel zwischen Oberflächennormale und Sensorachse passt. Der Wert für die Abdeckung von Punkt i durch Messfeld j wurde definiert als

$$f_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i) = v_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) * w_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{n}_i) * o_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i)$$

Für die betrachteten Freiform-Bauteile und den sehr geringen Messabstand des WLI ist Okklusion nicht möglich, da sonst entweder die Oberflächennormale nicht passt oder das WLI mit dem Bauteil kollidieren würde. Deshalb wird die Okklusionsbetrachtung im Folgenden vernachlässigt. Die Funktion $f_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i)$ vereinfacht sich dadurch zu

$$f_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i) = v_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) * w_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{n}_i)$$

Im optimalen Fall sind beide Funktionen gleich 1. Im Fall, dass eine der Bedingungen nicht erfüllt ist, soll diese gleich 0 sein, wodurch $f_{i,j}(\mathbf{x}_j)$ ebenfalls gleich null wird. Die Funktion $v_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i)$ ist realistisch betrachtet eine diskrete Funktion. Entweder der Punkt liegt im Messvolumen des WLI oder nicht. Um diese binäre Funktion anzunähern, wurde mithilfe der doppelten Logistischen Funktion eine analytische Funktion entwickelt.

$$\begin{aligned} v_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) &= v_{i,j,x}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) * v_{i,j,y}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) * v_{i,j,z}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) \\ &= \left(\frac{1}{1 + e^{-k \left(s_{x,j,i} + \frac{d_{x,j}}{2} \right)}} * \frac{1}{1 + e^{k \left(s_{x,j,i} - \frac{d_{x,j}}{2} \right)}} \right) \\ &\quad * \left(\frac{1}{1 + e^{-k \left(s_{y,j,i} + \frac{d_y}{2} \right)}} * \frac{1}{1 + e^{k \left(s_{y,j,i} - \frac{d_y}{2} \right)}} \right) * \left(\frac{1}{1 + e^{-k \left(s_{z,j,i} + \frac{d_z}{2} \right)}} * \frac{1}{1 + e^{k \left(s_{z,j,i} - \frac{d_z}{2} \right)}} \right) \end{aligned}$$

Dabei stehen $s_{x,j,i}$, $s_{y,j,i}$ und $s_{z,j,i}$ für die Koordinaten von $\mathbf{P}_i$, transformiert in das Sensorkoordinatensystem. Die Abhängigkeit der Funktion von $\mathbf{x}_j$ und $\mathbf{P}_i$ steckt in diesen Koordinaten. Die Variablen $d_{x,j}$, d_y und d_z sind die Dimensionen des dazugehörigen Messvolumens.

Der Verlauf der Funktion über $s_{x,j,i}$ und $s_{y,j,i}$ mit $v_{i,j,z}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) = 1$ (um den Verlauf einfacher zu visualisieren) ist in Abbildung 15 dargestellt.

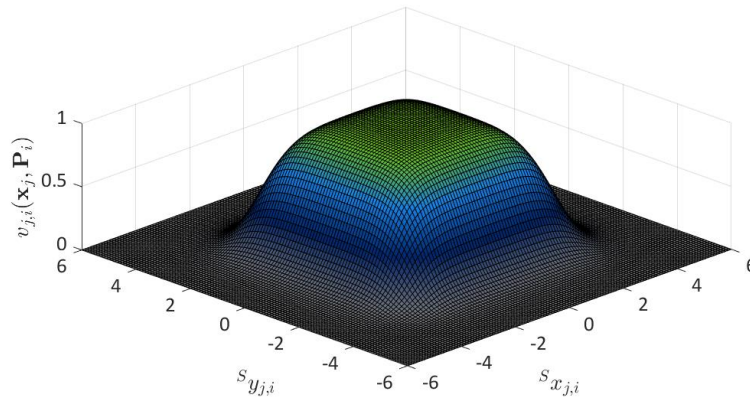


Abbildung 15: Darstellung Funktionsverlauf für die Sichtbarkeits-Berechnung mit $v_{i,j,z}(x_j, P_i) = 1$

Für die Funktion des Betrachtungswinkels $w_{i,j}(x_j, n_i)$ gilt, dass die Qualität der Messergebnisse bis zu einem gewissen Winkel relativ gleichbleibend gut sind und ab diesem Winkel stark abnehmen, bis das Erfassen von Messwerten nicht mehr möglich ist. Wie groß genau diese Winkel sind, hängt von der Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile ab. Für die Triebwerksschaufel wurden beispielhaft Messungen mit unterschiedlichen Winkeln zur Oberfläche durchgeführt. Die Posen hierfür wurden per offline Simulationsumgebung direkt auf dem CAD Modell geplant. Beispielhaft ist eine solche Messung in Abbildung 16 dargestellt.

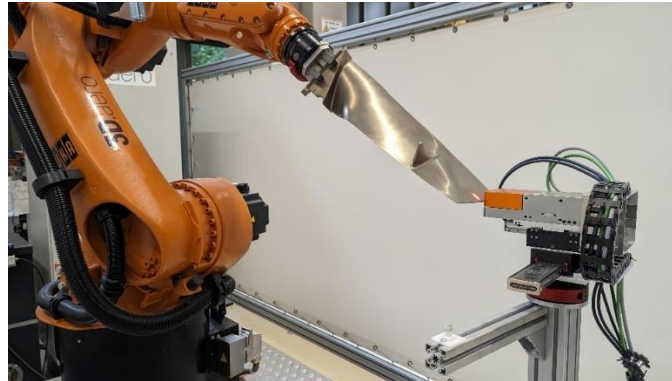


Abbildung 16: Beispiel für die Winkelmessung auf der Oberfläche der Triebwerksschaufel

Aus den Aufnahmen ließ sich erkennen, dass die Qualität der Daten bis zu einem Winkel von 45° gleichbleibend gut war. Bei Winkeln ab 50° nahm das Rauschen in den Messdaten zu. Das Bauteil vor dem Sensor weiter zu kippen gestaltete sich als schwierig, da der geringe Messabstand dafür sorgte, dass das Bauteil bereits bei 50° Neigung fast mit dem Sensor kollidiert. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass bei einem Kippwinkel von 90° keine Daten mehr akquiriert werden können.

Das Verhalten lässt sich über die Logistische Funktion gut approximieren. Der Winkel zwischen Oberflächennormale von Punkt i und normierter Sensorachse von Sensorpose j lässt sich durch den Zusammenhang

$$\alpha_{i,j} = \text{acos}(n_i^T * n_j)$$

berechnen. Die Ableitung der acos Funktion ist allerdings für den Wert 1 nicht eindeutig definiert. Statt den Winkel für die weitere Berechnung zu nutzen, kann in diesem Fall direkt das Ergebnis aus

$$\alpha_{\text{approx},i,j} = n_i^T * n_j$$

für die nachfolgenden Schritte verwendet werden. Die Funktion $w_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{n}_i)$ wurde definiert als

$$w_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{n}_i) = \frac{1}{1 + e^{-k_\alpha(\alpha_{approx,i,j} - t_\alpha)}}$$

Es wurde sich dafür entschieden, für die Berechnung des Winkelwertes die Normale des Sensors so zu definieren, dass die Normale des Sensors mit der Normalen des Punktes möglichst übereinstimmt, damit der Punkt messbar ist. Diese Definition ist genau entgegengesetzt der Kalibrierung, welche durch das sensorinterne Koordinatensystem bestimmt wurde. Für die Konvertierung zwischen den beiden Versionen müssen die Orientierungen lediglich um 180° um die x-Achse gedreht werden. Der Verlauf für $w_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{n}_i)$ mit $\alpha_{approx,i,j}$ und auch unter Verwendung von $\alpha_{i,j}$ direkt ist in Abbildung 17 dargestellt.

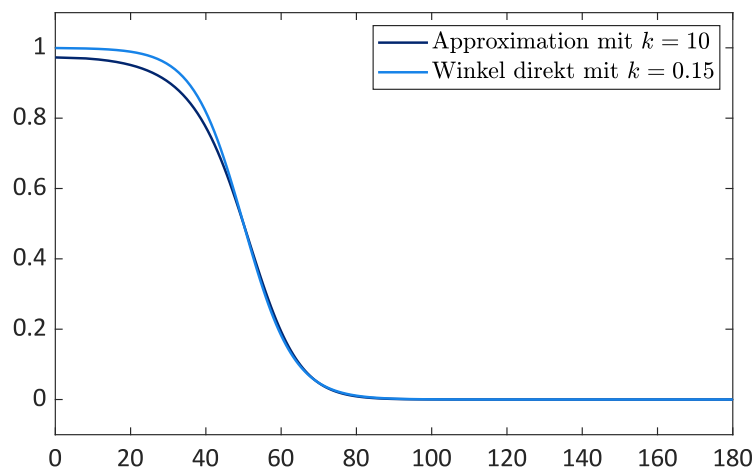


Abbildung 17: Funktionsverlauf Winkelapproximation mit Vergleich zum Funktionsverlauf mit dem eigentlichen Winkel

Der Wert für t_α wurde auf 50° als Grenzwert gesetzt. Für die Funktionen werden Werte für k_α verwendet, die empirisch ermittelt wurden und dafür sorgen, dass die Steigung annehmbar für die Optimierung ist aber auch das Sensorverhalten widerspiegelt. So ist die Messbarkeit eines Punktes bei 50° bereits reduziert und bei 90° nicht mehr gegeben. Der größte Unterschied der beiden Funktionsverläufe liegt darin, dass die Approximation durch die Normalen dafür sorgt, dass die Funktion die 1 nicht erreicht. Dem kann entgegengewirkt werden, indem mit dem Kehrwert des erreichten maximalen Funktionswertes skaliert wird.

Die notwendigen Funktionen für

$$f_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i) = v_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) * w_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{n}_i)$$

sind damit ausreichend definiert.

Würde man nun für jeden Punkt für jedes Messfeld diese Berechnung durchführen und alle Werte einfach aufsummieren, würden sich alle Messfelder in dem Bereich sammeln und es würde einfach nur sehr oft dieselbe Stelle vermessen. Ein Ansatz um dies zu verhindern ist, dass für denselben Punkt nur die Abdeckung durch ein Messfeld eingeht und zwar dem Messfeld, welches den höchsten Wert für die Abdeckung $f_{i,j}$ erzeugt. Allerdings ist eine Maximumsfunktion nicht differenzierbar. Stattdessen kann diese durch die Funktion

$$f_i(\mathbf{x}, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i) = \sqrt[n]{\sum_{j=1}^m f_{i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i)}$$

approximiert werden. Je höher der Wert für n , desto genauer ist dabei die Approximation. Anschließend können alle Abdeckungswerte für die einzelnen Punkte aufsummiert werden.

$$f_{Abd}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^p f_i(\mathbf{x}, \mathbf{P}_i, \mathbf{n}_i)$$

Die Funktion $f_{Mlaenge}(\mathbf{l})$ ist sehr simpel definiert als die Summe der Länge aller Messfelder

$$f_{Mlaenge}(\mathbf{l}) = \sum_{j=1}^m l_j$$

Im Rahmen der Erzeugung von Sensorposen musste noch ein Ansatz für die Kollisionskontrolle zwischen Sensor und Bauteil entwickelt werden. Durch den geringen Messabstand ist das Kollisionsrisiko ansonsten zu hoch. Für diesen Ansatz wird vereinfacht angenommen, dass das WLI ein Quader ist. In dieser Form ähnelt er dem Messfeld. Für die Kollisionskontrolle kann entsprechend fast derselbe Ansatz wie für die Sichtbarkeitsanalyse verwendet werden. Im Gegensatz zur Messbarkeitsanalyse wird hierbei allerdings immer eine Punkterepräsentation des gesamten Bauteils genutzt, da die Kollision mit dem gesamten Bauteil und nicht nur mit dem betrachteten Oberflächenabschnitt überprüft werden muss. Es wird wieder berechnet, ob ein Punkt des Bauteils im Quader liegt, der in diesem Fall den Sensor als Kollisionskörper repräsentiert. In diesem Fall ist es negativ, wenn ein Punkt innerhalb des Quaders liegt.

Für jedes Messfeld existiert ein quaderförmigen Kollisionskörper durch den Sensor. Dieser hat dieselbe Ausrichtung wie das Messfeld, ist jedoch gemäß Messabstand und Sensordesign verschoben. Die Breite des Kollisionsquaders berücksichtigt dabei auch die zweite Linearachse und ist unabhängig von der variablen Breite des Messfelds, um Kollisionsrisiken zu minimieren. Für jedes Messfeld wird für jeden Punkt ein Kollisionswert bestimmt. Die Ergebnisse für die einzelnen Punkte können für die Kollisionskontrolle einfach aufsummiert werden.

$$c_{Koll}(\mathbf{x}, \mathbf{l}) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^m c_{Koll,i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i)$$

$$c_{Koll,i,j}(\mathbf{x}_j, \mathbf{P}_i) = \left(\frac{1}{1 + e^{-k(q_{x,j,i} + \frac{q_x}{2})}} * \frac{1}{1 + e^{k(q_{x,j,i} - \frac{q_x}{2})}} \right) * \left(\frac{1}{1 + e^{-k(q_{y,j,i} + \frac{q_y}{2})}} * \frac{1}{1 + e^{k(q_{y,j,i} - \frac{q_y}{2})}} \right) * \left(\frac{1}{1 + e^{-k(q_{z,j,i} + \frac{q_z}{2})}} * \frac{1}{1 + e^{k(q_{z,j,i} - \frac{q_z}{2})}} \right)$$

Dabei stehen $q_{x,j,i}$, $q_{y,j,i}$ und $q_{z,j,i}$ für die Koordinaten von $\mathbf{P}_i$, transformiert in das KOS des Kollisionsquaders. Die Abhängigkeit der Funktion von $\mathbf{x}_j$ und $\mathbf{P}_i$ steckt in diesen Koordinaten. Die Variablen q_x , q_y und q_z sind die Dimensionen des Kollisionskörpers.

Die gefundenen Sensorposen sind nun zunächst relativ zum Bauteil-KOS definiert. So lassen sich die Posen direkt in ein Offlinepfadplanungstool übertragen, durch welches dann direkt Roboterpfade ge-

neriert werden. Bevor die Posen nun in ein Offlinepfadplanungstool übertragen werden können, müssen noch eine geeignete Reihenfolge (TSP lösen) für das Abfahren der Sensorposen ermittelt werden und die Poseninformationen in ein geeignetes Datenformat gebracht werden.

Lösen des Travelling Salesman Problems – Freiformbauteil

Auch das Lösen des TSPs kann durch die abgefahrte Reihenfolge der Punkte einen Teil dazu beitragen, Inspektionszeiten zu reduzieren. Durch die geringe Messgeschwindigkeit des Sensors und das notwendige Ausschwingen des Systems ist dieser Beitrag verhältnismäßig gering. Deshalb wurde sich im Rahmen des Projekts für einen Greedy-Ansatz entschieden. Die Basis für das Lösen des TSPs bilden die Informationen darüber, wie hoch die „Reisekosten“ zwischen einzelnen Punkten sind. In diesem Fall wären dies die Zeitaufwände um den Roboter von einer Sensorpose in die nächste zu bewegen. Eine realistische Zeitabschätzung beinhaltet dabei das tatsächliche dynamische Verhalten des Roboters. Da die Posen durch das kleine Messfeld immer relativ nah beieinander liegen und der Roboter keine großen Umsetzbewegungen tätigen muss, wird hier vereinfacht angenommen, dass die euklidische Distanz der Sensorposen in Relation zum Zeitaufwand für die Umsetzbewegung steht.

Es wird eine Distanzmatrix aufgestellt, die die euklidische Distanz zwischen allen Sensorpositionen beinhaltet. Anschließend wird über alle Distanzen die geringste Distanz ermittelt. Diese gehört zu einer Kombination aus zwei Sensorposen. Von diesen beiden Sensorposen aus wird die geringste Distanz zu allen anderen Sensorposen ermittelt. Abhängig davon, mit welcher die neue Sensorpose die geringste Distanz gebildet hatte, wird die Pose der Reihenfolge hinzugefügt. Dieser Vorgang wird jetzt jeweils mit den äußersten Posen der Reihenfolge fortgeführt, ohne dass Sensorposen doppelt angefahren werden dürfen. Ein anschauliches Beispiel ist nachfolgend dargestellt.

1. Ermitteln der kleinsten Distanz
 → kleinste Distanz ist 0.02
 → Punkt 1 und Punkt 5 sind die Startpunkte
 → Indexvektor $i = [1,5]$
 → Spalten 1 und 5 werden eliminiert
2. Suche in Zeilen 1 und 5
 → kleinste Distanz ist 0.12
 → Punkt 2 wird der Reihenfolge hinzugefügt
 → Indexvektor $i = [2,1,5]$
 → Spalte 2 wird eliminiert
3. Suche in Zeilen 2 und 5
 → kleinste Distanz ist 0.16
 → Punkt 4 wird der Reihenfolge hinzugefügt
 → Indexvektor $i = [4,2,1,5]$
 → Spalte 4 wird eliminiert
4. Suche in Zeilen 4 und 5
 → kleinste Distanz ist 0.21
 → Punkt 3 wird der Reihenfolge hinzugefügt
 → Indexvektor $i = [4,2,1,5,3]$
 → Suche wird beendet

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0.12 & 0.31 & 0.25 & \mathbf{0.02} \\ 0.12 & 0 & 0.22 & 0.16 & 0.81 \\ 0.31 & 0.22 & 0 & 0.43 & 0.21 \\ 0.25 & 0.16 & 0.43 & 0 & 0.33 \\ \mathbf{0.02} & 0.81 & 0.21 & 0.33 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0.12} & 0.31 & 0.25 & \mathbf{0.02} \\ 0.12 & 0 & 0.22 & 0.16 & 0.81 \\ 0.31 & 0.22 & 0 & 0.43 & 0.21 \\ 0.25 & 0.16 & 0.43 & 0 & 0.33 \\ \mathbf{0.02} & \mathbf{0.81} & 0.21 & 0.33 & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0.12} & 0.31 & 0.25 & \mathbf{0.02} \\ \mathbf{0.12} & \mathbf{0} & 0.22 & \mathbf{0.16} & \mathbf{0.81} \\ 0.31 & 0.22 & 0 & 0.43 & 0.21 \\ 0.25 & 0.16 & 0.43 & 0 & 0.33 \\ \mathbf{0.02} & \mathbf{0.81} & 0.21 & 0.33 & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0.12} & 0.31 & \mathbf{0.25} & \mathbf{0.02} \\ \mathbf{0.12} & \mathbf{0} & 0.22 & \mathbf{0.16} & \mathbf{0.81} \\ 0.31 & 0.22 & 0 & 0.43 & 0.21 \\ \mathbf{0.25} & \mathbf{0.16} & 0.43 & \mathbf{0} & \mathbf{0.33} \\ \mathbf{0.02} & \mathbf{0.81} & \mathbf{0.21} & \mathbf{0.33} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

So kann für eine Menge an Sensorposen einfach eine geeignete Reihenfolge ermittelt werden. Aus den Sensorposen und deren Reihenfolge müssen nun noch passende Parametrisierungen der Messbewegung errechnet und danach ein Roboterprogramm mit den notwendigen Pfaden generiert werden.

Post-Processing – Freiformbauteil

Für die Parametrisierung der Messbewegung und damit der Anpassung an die Bauteiloberfläche werden die durch das Bauteil abgedeckten Punkte ermittelt. Dafür wird diskret überprüft, welche Punkte endgültig im Messfeld liegen und ob deren Normale für den Blickwinkel passend ist. Für diese Punkte kann dann eine „Aufteilung“ einer Messung durch das Linien-WLI berechnet werden, wie in Abbildung 18 veranschaulicht.

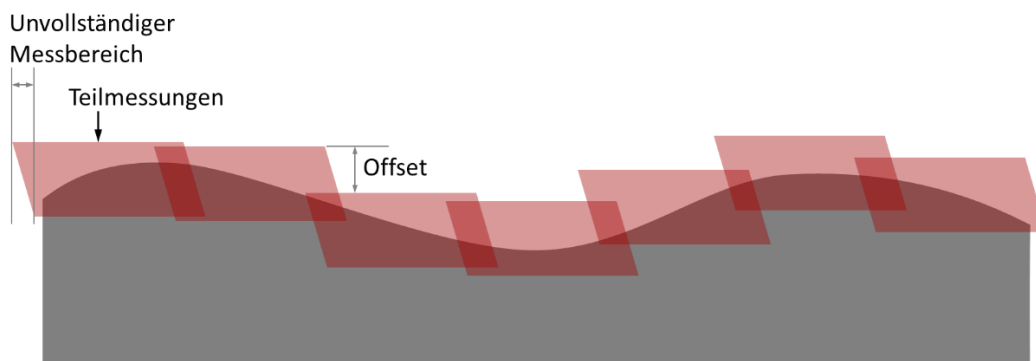


Abbildung 18: Parametrisierung der Linien-WLI Messung

Es sollten nur Messungen zwischen dem Be- und dem Verzögerungsbereich zweiten Linearachse durchgeführt werden. Dementsprechend muss der Bewegungsbereich der zweiten Linearachse größer definiert werden. Der Beschleunigungsbereich muss schon vor dem zu vermessenden Bereich aufhören. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Anzahl der Parallelgramm-Messungen n_{PM} pro Linien-WLI-Messung gewünschter Messlänge d_x

Die Erzeugung des Roboterpfades kann an sich unabhängig von der Parametrisierung der einzelnen Messungen durchgeführt werden, da sich der Roboter während der Messungen nicht bewegt und nicht gemessen wird, während der Roboter verfährt. Um ein lesbares Programm zu erzeugen, werden die Daten einfach mit Matlab gemäß KUKA-Robot-Language mit Header und LIN {<Pose>} Anweisungen in eine .src-Datei geschrieben. Danach wird die .src-Datei in das Robotersimulationsprogramm FAMOS robotic® geladen. In diesem Programm wird eine Simulation zur Kollisionsüberprüfung durchgeführt. Werden trotz der Berücksichtigung in der Optimierung Kollisionen festgestellt, müssen die dazugehörigen Punkte in diesem Schritt entfernt werden. Anschließend werden dann noch am Start- und Endpunkt der Bahn jeweils Anfahrpunkte und zusätzliche Anweisungen, die für die Kommunikation mit der MSS Steuerungssoftware notwendig sind, hinzugefügt.

Unterschiede für die rotationssymmetrischen Bauteile

Für rotationssymmetrische Bauteile ist das Vorgehen nahezu das gleiche. Nur das Pre- und das Post-Processing unterscheiden sich etwas. Bei der Inspektion der rotationssymmetrischen Triebwerkskomponenten wird die zusätzliche Drehachse genutzt, um das WLI als Linien-WLI zu nutzen. Während der Messbewegung wird das Bauteil kontinuierlich gedreht. Das funktioniert allerdings nur, um Elemente entlang der Rotationsrichtung zu vermessen. Bauteilbereiche, wie bspw. Nuten auf einem Bauteilumfang, können während dieser Art der Messbewegung nicht vermessen werden. Während des Pre-Processings sollte die zu vermessende Fläche zunächst auf ein Segment des rotationssymmetrischen Teils der Bauteiloberfläche reduziert werden. Das Segment sollte ungefähr die Breite eines normalen Messfelds haben. Dieses Segment wird anschließend zu Punkten mit Normalen verarbeitet. Auf dieser Basis

werden nun Messfelder geplant, die nicht flexibel sind und die Standardgröße des WLI Messfelds haben. Wenn diese Messfelder geplant sind, werden diese um die Rotationsachse vervielfältigt, sodass die rotationssymmetrischen Bereiche abgedeckt sind. Auf Basis dieser vervielfältigten Messfelder wird nun ermittelt, welche Bereiche des Bauteils noch nicht abgedeckt sind. Dazu wird das verfeinerte STL-Modell an den Kanten der Messfelder getrennt und es bleiben Dreiecke übrig, die noch nicht abgedeckt sind. Aus diesen Dreiecken wird wiederum ein Punktmodell erzeugt, auf dessen Basis anschließend ergänzende Sensorposen generiert werden.

Für die Messfelder entlang der Rotationsachse muss die Drehgeschwindigkeit für den Drehtisch berechnet werden. Dafür wird die Messgeschwindigkeit und die Frequenz f der Intensitätsmessung für das WLI festgelegt. Basierend darauf kann mithilfe des Umfangs des jeweiligen Bauteilbereichs die notwendige Geschwindigkeit des Drehtischs berechnet werden. Die Formel hierfür lautet

$$\Omega = f * 2 * \operatorname{atan}\left(\frac{\rho}{d}\right)$$

Dabei sind Ω , f , ρ und d die Winkelgeschwindigkeit, die WLI-Frequenz die laterale Auflösung des WLI und der Bauteildurchmesser an der betrachteten Stelle. Für die rotationssymmetrischen Bauteile wurde nach dem Projektstopp und der internen Verlagerung des Projekts bei LHT der Fokus auf die rotationssymmetrischen Anteile der Fahrwerkskomponenten gelegt.

2.3.3.2 Bahnplanung Triebwerksbauteile – Hybrider Ansatz

Beim hybriden Ansatz ist eine doppelte Bahnplanung notwendig. Zunächst muss für die Vermessung mit der Kamera ein Sensorpfad geplant werden. Anschließend muss gemäß der in den Kameradaten gefundenen Regions of Interest (ROI) ein Pfad für die darauffolgende WLI Inspektion geplant werden.

Für die Pfadplanung zur Vermessung mit der Kamera kann einfach der Pfadplanungsansatz wie für die ganzheitliche WLI-Inspektion genutzt werden. Statt einem variablen Messfeld wird dann jedoch ein starres Messfeld angenommen. So wird für die Optimierung die Formulierung des Optimierungsproblems ohne Längenänderung verwendet.

So können Freiformflächen abdeckend durch Kameraaufnahmen erfasst werden. In diesen Aufnahmen werden dann die ROI ermittelt, also mögliche Kratzer, Dellen und so weiter. Basierend auf diesen Informationen muss dann der Pfad für die WLI-Inspektion geplant werden, sodass alle ROI abgedeckt werden. Hierfür wurden zwei Ansätze entwickelt.

Im ersten Ansatz wird davon ausgegangen, dass durch das betrachtete Bauteilspektrum der Triebwerksschaufeln die Oberfläche innerhalb einer Kameraaufnahme kaum variiert. Dadurch können die ROI direkt in den Bildern geclustert werden, wenn mehrere ROI in einer WLI-Aufnahme erfasst werden können. Anhand der Pixel in den Bildern werden im Kamerakoordinatensystem Sensorposen definiert. Diese werden dann über die Kalibrierung der Kamera und das Wissen über die Roboterpose und damit der Bauteilpose zum Zeitpunkt der Kameraaufnahme in das Bauteilkoordinatensystem transformiert. Von dort aus werden die Posen dann in der Offline-Simulationsumgebung überprüft und danach können sie auf den Roboter übertragen und abgefahren werden. Der Ansatz ist im Detail im Zwischenbericht zum Berichtsjahr 2022 zu entnehmen.

Als zweiter Ansatz werden alle ROI zunächst in das Bauteilkoordinatensystem transformiert. Für die ROI wird anhand der Oberflächendaten des Bauteils an dieser Stelle eine Normale zugewiesen. Anschließend können Sensorposen für die Punkte mit zugehörigen Normalen mit dem zuvor vorgestellten ganzheitlichen WLI Pfadplanungsansatz generiert werden.

Der Vorteil des ersten Ansatzes ist die reduzierte Komplexität, während der zweite Ansatz flexibler ist. Der zweite Ansatz ist vor allem dann anzuwenden, wenn angenommen werden muss, dass eine Kameraaufnahme evtl. doch größere Normalenänderungen oder Flächenabweichungen erfasst hat.

2.3.3.3 Bahnplanung Fahrwerksbauteile

Nach Ende des Projektstopps musste sich damit beschäftigt werden, welche Änderungen und Herausforderungen das veränderte Bauteilspektrum für die Bahnplanung mit sich bringt. Die Fahrwerksbauteile weisen sowohl rotationssymmetrische als teilweise auch freigeformte Bereiche auf. Außerdem gibt es zwei unterschiedliche Messansätze zu berücksichtigen. Zum einen müssen Pfade basierend auf zuvor geteachten Posen (inkl. Angabe zu Ausdehnungen von Reworks) geplant werden, im Folgenden ist dies der hybride Ansatz. Zum anderen sollen unter Umständen auch Bereiche komplett durch das WLI vermessen werden. Der Linien-WLI Ansatz spielt hierbei keine Rolle.

Für den ganzheitlichen WLI Ansatz ist das gleiche Prinzip anzuwenden wie für die rotationssymmetrischen Triebwerksbauteile. Zunächst wird durch den Anwender ein Segment der gewünschten rotationssymmetrischen Fläche aus einem CAD-Programm als STL-Datei extrahiert. Dieses STL-Modell wird dann verfeinert und in Form einer Punktwolke mit Normalen verarbeitet. Basierend auf dieser Punktwolke werden anschließend Sensorposen geplant, dieser Satz an Sensorposen wird im folgenden Set 1 genannt. Diese Sensorposen werden anschließend entlang der Rotationsachse vervielfacht. Die Bereiche, die nicht durch diese vervielfältigten Sensorposen vermessen werden können, werden ermittelt. Für diese noch nicht betrachteten Bereiche werden anschließend Sensorposen geplant, im folgenden Set 2 genannt. Für Set 1 wird das TSP mit dem Greedy Ansatz gelöst, der entsprechende Roboterpfad generiert und die notwendigen diskreten Achswinkel für den Drehgeber berechnet. Anschließend wird das TSP für Set 2 gelöst und der dazu gehörige Roboterpfad mit Achswinkeln für den Drehgeber erzeugt.

Während für Set 1 die Roboterpose hauptsächlich nur entlang der Rotationsachse variiert und der Drehgeber die Rotation erzeugt, um die gesamte Fläche zu vermessen, müssen für Set 2 die Positionen für Roboter und Drehgeber gleichzeitig ermittelt werden. Die Posen werden, bevor sie auf der Validierungsplattform getestet werden, im Simulationsprogramm auf Kollisionen überprüft. Genauer es dazu ist im folgenden Kapitel beschrieben.

Für den neuen hybriden Ansatz wurde ebenfalls eine Pfadplanungsalgorithmik in Kooperation mit der 3D.aero entwickelt. Für das Einmessen sogenannter Reworks soll der Mitarbeiter die Sensorposen für die Mittelpunkte der normalerweise ovalen Reworks teachen. Durch einmaliges Messen an dieser Stelle wird eine optimalere Orientierung des Sensors zur Oberfläche ermittelt und die Position des Drehgebers zum Teachzeitpunkt gespeichert. Außerdem muss der ausführende Mitarbeiter die Größe der benötigten Messabdeckung um den Mittelpunkt angeben, also die ungefähre Länge des Reworks entlang der Bauteilachse und die ungefähre Breite des Reworks senkrecht dazu, sowie den Durchmesser des Bauteils an dieser Stelle. Das macht der Mitarbeiter für alle Reworks nacheinander. Basierend auf diesen Angaben werden anschließend Sensorposen und Bewegungspfade für Roboter und Drehgeber berechnet und ausgeführt. Für jedes eingeteachte Rework wird ein Gitter erzeugt mit notwendigen Sensorpositionen für die Vermessung des Reworks. Ein Beispiel für solch ein Gitter ist in Abbildung 19 dargestellt.

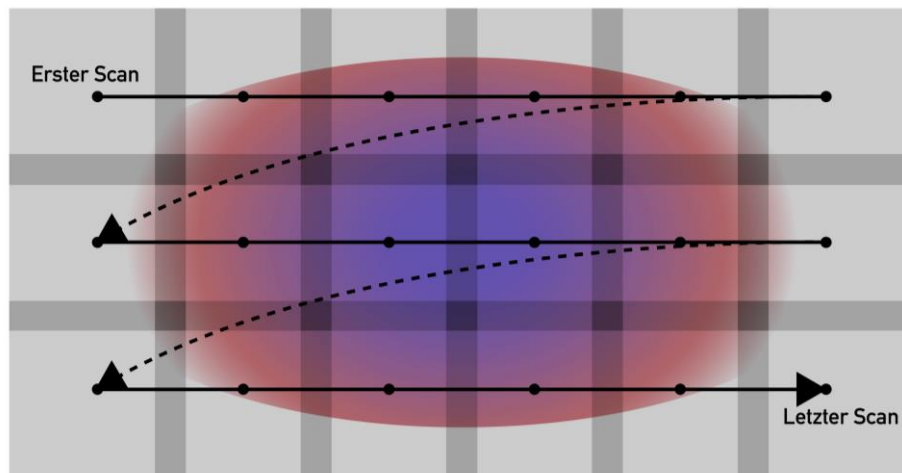


Abbildung 19: Gitteranordnung für das Abscannen eines Reworks (aus Studienarbeit 2023)

Die Orientierung des Sensors bleibt zwischen den einzelnen Aufnahmen für eine einzelne Reworkvermessung konstant. Auch die Position des Drehgebers bleibt während einer einzelnen Reworkvermessung konstant. Für die Pfade zwischen den Posengittern wird ein einfacher Pfadplanungsansatz gewählt. Es werden Viapunkte erzeugt, die weiter von der Bauteiloberfläche entfernt liegen, um Kollisionen während der Umsetzungbewegung zu verhindern. Das Konzept ist in Abbildung 20 veranschaulicht.

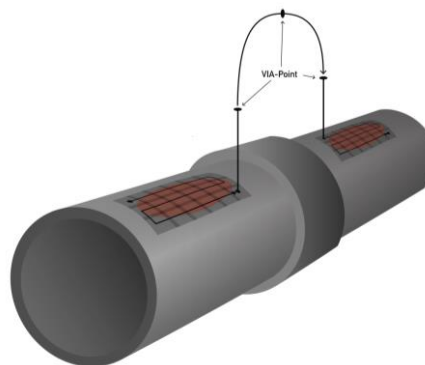


Abbildung 20: Konzeptdarstellung Via-Punkt zum Verfahren, zwischen zwei Rework-Messgittern (aus Studienarbeit 2023)

So ist die Pfadplanung effizient und einfach gestaltet, sodass die Vermessung quasi direkt nach dem eintreten der Posen gestartet werden kann.

2.3.4 AP 3.4 – Simulation Messvorgang

Ergebnis dieses Arbeitspakets ist eine Simulationsumgebung für die Simulation des Messvorgangs. Wie im Zwischenbericht 2021 beschrieben, wurden unterschiedliche Simulationstools verwendet. Zum einen wurde die Anlage in dem Simulationsframework der 3D.aero aufgebaut. In weiteren Entwicklungsschritten der 3D.aero wurden der Software in enger Absprache mit dem IFPT neue Kinematikfunktionalitäten hinzugefügt, um Roboter und Achsen in unterschiedlichen States abbilden zu können. Außerdem wurde für die Sensorplanung eine Simulationsumgebung in MATLAB implementiert. So werden während der Optimierung Bauteil, Messfelder und Kollisionsboxen visualisiert. Außerdem kann die Erreichbarkeit von Sensorposen überprüft werden und zukünftig auch Bahnen zwischen den Sensorposen und damit auch der Zeitaufwand für die Bewegung zwischen Posen simuliert werden. So kann das TSP auf Basis aussagekräftigerer „Reisekosten“ gelöst werden.

Für die zuverlässige Überprüfung und Validierung der geplanten Pfade wurde ein Simulationsmodell der Validierungsplattform inklusive kinematischer Komponenten in FAMOS robotic® aufgebaut. Dies war vor allem vorteilhaft für die zuverlässige inverse Kinematik und Kollisionskontrolle, welche im Rahmen dieser Software einsatzbereit zur Verfügung stand. Ein Screenshot des Plattformmodells in FAMOS robotic® ist in Abbildung 21 gezeigt.

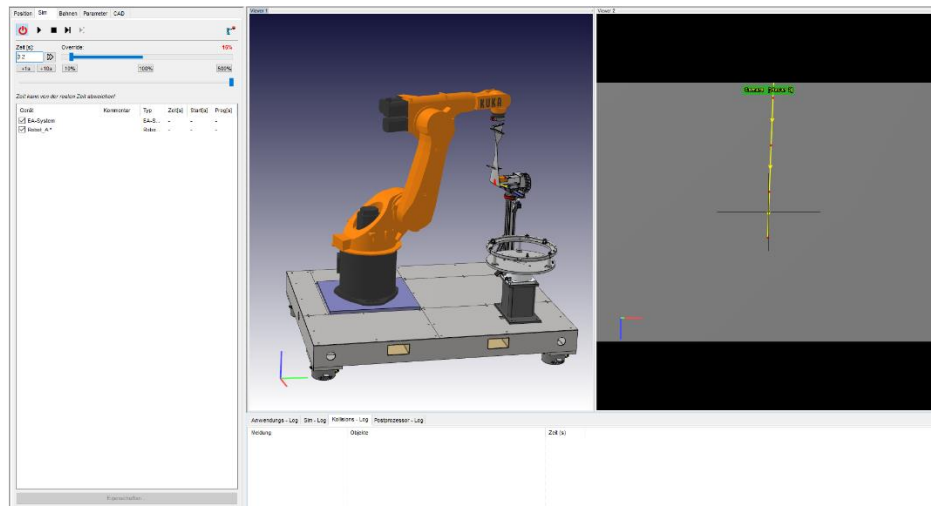


Abbildung 21: Screenshot der Simulationsumgebung in FAMOS robotic®

Das Bauteilmodell ist gemäß der zuvor durchgeführten Einmessung in das Simulationsmodell integriert. Die in Matlab erzeugten Pfade können simpel in der Simulationsumgebung hinzugefügt werden. So kann direkt erkannt werden, ob die Pfadpunkte anforderungsgerecht auf der Oberfläche liegen. Anschließend werden die Punkte abgefahren. Liegen keine Kollisionen vor, werden die Punkte mithilfe des integrierten Post-Processors in Kuka Robot Language übersetzt und können auf den Roboter übertragen werden.

2.4 HAP 5 – Gesamtsystemintegration & Prozessdemonstration

2.4.1 AP 5.1 – Gesamtsystemintegration

Als Ergebnis der TUHH dieses Arbeitspakets steht an der TUHH die integrierte Validierungsplattform inklusive des Sensors und der Pfadplanungs-Softwarebausteine zur Verfügung. Dieses Kapitel bezieht sich auf die Validierungsplattform, die ursprünglich für die Triebwerkskomponenten entwickelt wurde. Die Gesamtsystemintegration für die Validierungsplattform für die Reworkvermessung wurde durch die 3D.aero durchgeführt. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wurden die Hardwarekomponenten der Validierungsplattform erfolgreich integriert. Die notwendigen Softwarebausteine sind die Anwendungen

- zum Kalibrieren des Sensors und Drehtischs
- zum Einmessen der Bauteile
- zum Preprocessing des Modells
- für die Planung der Sensorposen und das Lösen des TSP für den ganzheitlichen Ansatz
- für die Planung der Sensorposen und das Lösen des TSP für den hybriden Ansatz
- für die Planung der Sensorposen basierend auf Kameraaufnahmen und ROI
- zur simulativen Validierung des geplanten Pfads
- zur Steuerung des Messablaufs

Die Kalibrierung des Sensors ist für den Fall, dass dieser am Roboter befestigt ist, bereits im 3D.OS integriert. Die Kalibrierung für den Drehtisch und den linear scannenden WLI Sensor, wenn er statisch in der Umgebung platziert wird, ist in Matlab implementiert. Das Einmessen der Bauteile erfolgt durch die Open Source Software CloudCompare [13]. Die Posen für die Kalibrierungen und das Einmessen der Bauteile müssen manuell geteacht werden. Die Softwarebausteine zum Preprocessing und die drei zur Pfadplanung sind in Matlab implementiert. Die simulative Validierung ist in FAMOS robotic® integriert. Anzudenken wäre hier, das Simulationsframework der 3D.aero soweit weiterzuentwickeln, dass dieses statt FAMOS robotic® dafür genutzt werden kann. Die Steuerung des Messablaufs läuft in 3D.OS. Alle Softwarebausteine sind auf einem Anlagen-PC integriert.

2.4.2 AP 5.2 – Prozessdemonstration Freiform-Bauteil

Ziel der TUHH in diesem Arbeitspaket war die Bereitstellung von Pfaden für die Prozessdemonstration für Freiform-Bauteile und die Begleitung der Versuche mit Fokus auf die Handlingmechanismen. Der Fokus seitens des IFPT lag dabei auf der Demonstration anhand einer Triebwerksschaufel, da der Anwendungsfall im Rahmen des Projekts für die Entwicklung der Linien-WLI weiterhin interessant war. Die Demonstration für die Fahrwerksbauteile lag bei hauptsächlich bei der 3D.aero.

Für die Demonstration ist das Kalibrieren und Einmessen notwendig. Pro Kalibrierung wurden insgesamt 20 Aufnahmen gemacht

- 8 Aufnahmen für die Bestimmung der kombinierten Rotationsmatrix ${}^B_L R \quad {}^L_S R$.
- 4 Aufnahmen für die Bestimmung der kombinierten Translation ${}^B_L R \quad {}^L_S t_i + {}^B_L t$ (Linearachse bei 160mm)
- 8 Aufnahmen entlang der zweiten Linearachse zur Bestimmung von ${}^B_L R$

Ein Beispiel für eine solche Aufnahme ist in Abbildung 22 gezeigt.

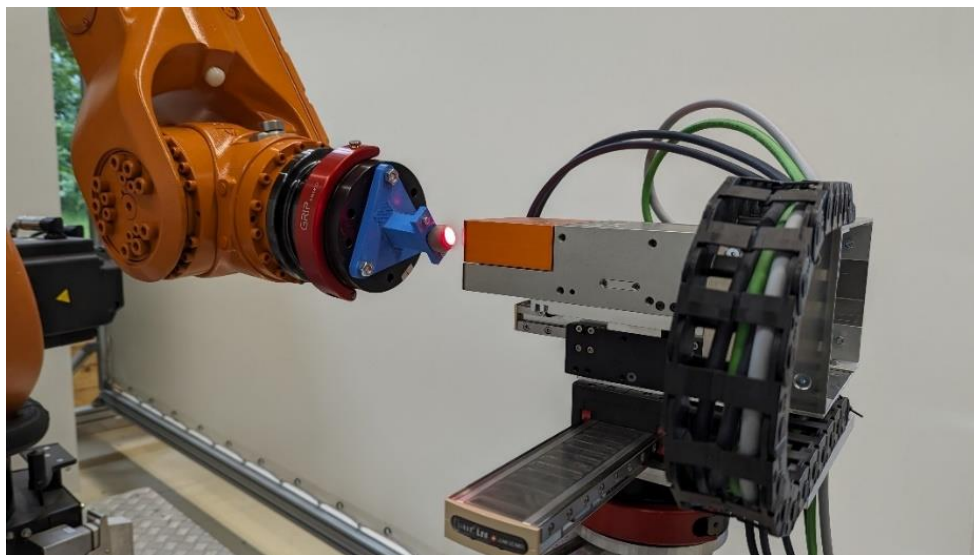


Abbildung 22: Darstellung der Messung während einer Kalibrierung

Für die Aufnahmen wurden jeweils Sphärenfits durchgeführt. So ergab sich für die Transformationsmatrizen bzw. Eulerwinkel (Z-Y-X) bspw.

$${}^B_L R \quad {}^L_S R = \begin{bmatrix} 0.98 & -0.01 & 0.18 \\ 0.18 & 0.01 & -0.98 \\ 0.01 & 0.99 & 0.01 \end{bmatrix} = \text{EulerZYX}(10.44^\circ - 0.19^\circ \quad 89.37^\circ)$$

$${}^B_R {}^L_S t_i + {}^B_L t = \begin{bmatrix} -363.54 \\ 1328.24 \\ 984.85 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$${}^B_L R = \begin{bmatrix} 0.98 & -0.01 & 0.17 \\ 0.17 & 0.01 & -0.98 \\ 0.01 & 0.99 & 0.01 \end{bmatrix} = \text{Euler}(9.97^\circ \quad -0.37^\circ \quad 89.37^\circ)$$

$${}^L_S R \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \text{Euler}(-0.18^\circ \quad -0.47^\circ \quad 0^\circ)$$

Dabei kann bei den sehr kleinen Winkeln von ${}^L_S R$ angenommen werden, dass diese durch Ungenauigkeiten in Messwerten und Roboterpositionen entstanden sind. In diesem Bereich kann angenommen werden, dass die Koordinatensysteme von Sensor und Linearachse von der Orientierung her übereinstimmen. Die Kalibrierung wurde mehrfach durchgeführt und ergab immer vergleichbare Ergebnisse. Eine manuelle Vermessung bestätigte dabei die Sinnhaftigkeit der Ergebnisse.

Ebenso wurden Kamerakalibrierungen durchgeführt. Da die Kamera an dem statischen Teil der Mess-Linearachse befestigt ist, kann sie durch das Verfahren der zweiten Linearachse ebenfalls Verfahren werden. Die Kalibrierung wurde bei 160mm der zweiten Linearachse durchgeführt. Im Abbildung 23 ist ein Foto aus dem Verlauf eines Kalibrierprozesses zu sehen.

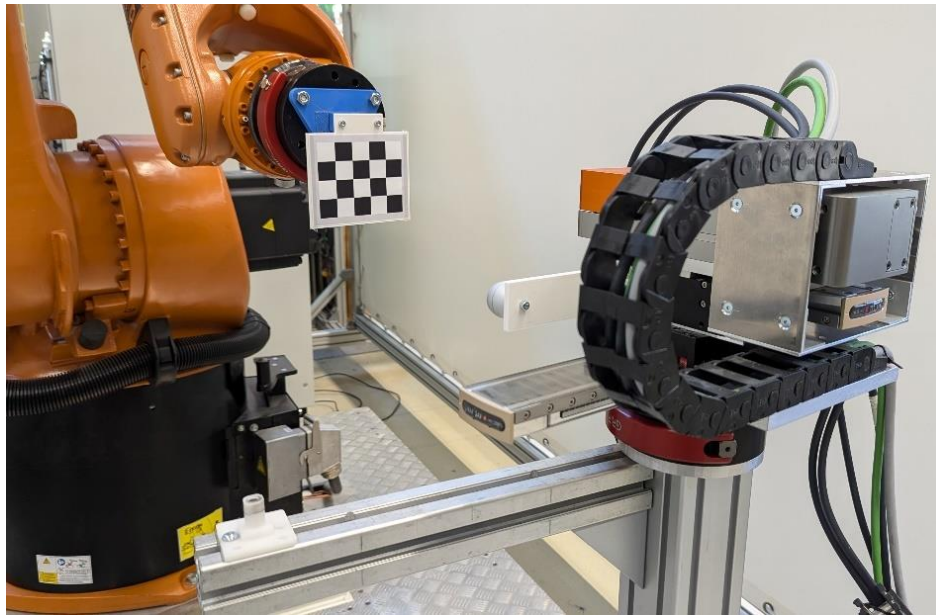


Abbildung 23: Beispielbild während der Kalibrierung der Kamera

Die Werte für die Kamera, die sich aus dem Kalibrierprozess ergeben sind.

$${}^B_R {}^L_{SK} R = \begin{bmatrix} -0.98 & 0.01 & 0.18 \\ -0.18 & 0.01 & -0.98 \\ -0.01 & -0.99 & -0.01 \end{bmatrix} = \text{EulerZYX}(-169.82^\circ \quad 0.49^\circ \quad -90.34^\circ)$$

$${}^B_R {}^L_S t_i + {}^B_L t = \begin{bmatrix} -295.19 \\ 1458.43 \\ 907.13 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Diese Ergebnisse passen auch im Verhältnis zur Kalibrierung des WLI.

Für das Einmessen der Triebwerksschaufel wurden 5 Punkte gewählt. Diese Punkte wurden geteacht Vermessen und in das Flansch Koordinatensystem des Roboters transformiert. Danach wurde in CloudCompare [13] das Fitting des Bauteils in die Messwerte vorgenommen. Das Ergebnis ist in Abbildung 24 dargestellt.

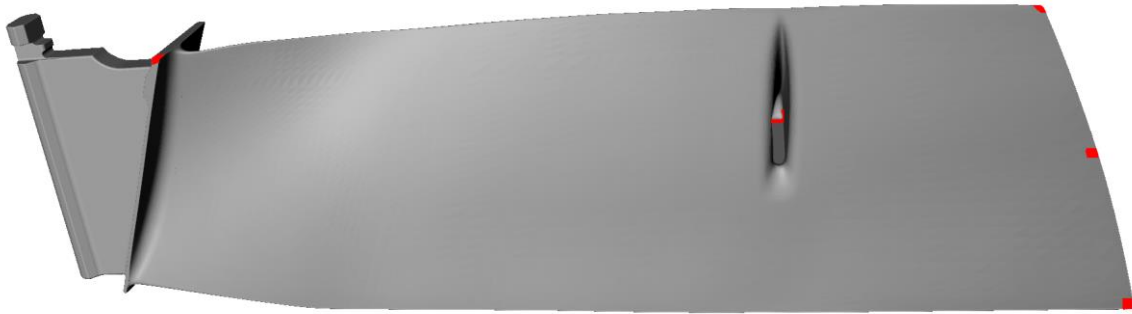


Abbildung 24: Bauteilfitting mit Messdaten von 5 unterschiedlichen prägnanten Features

Für die Demonstration der ganzheitlichen Pfadplanung wurden zwei Bereiche der Triebwerksschaufel gewählt, dargestellt in Abbildung 25. Die Bereiche wurden so gewählt, dass einer der beiden eine monotone Oberfläche ist und der andere hohes Kollisionspotential birgt. Dies sind zwei besondere Herausforderungen für die Pfadplanung.

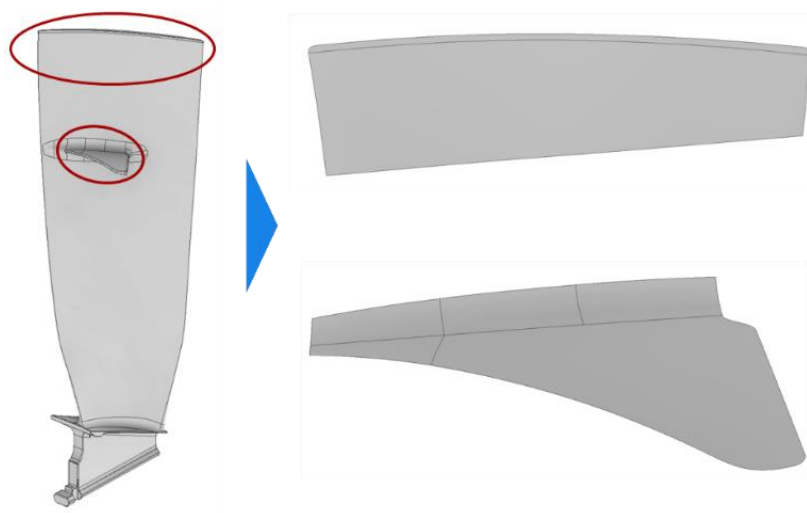


Abbildung 25: Auswahl der Flächen für die Erprobung der Pfadplanung bei Freiformbauteilen

Die Bereiche wurden exportiert und verarbeitet. Ein Beispiel für das Pre-Processing des gesamten Bauteils ist in Abbildung 26 dargestellt. Für die ausgewählten Abschnitte wird dies ebenso durchgeführt, jedoch mit feinerer Auflösung.

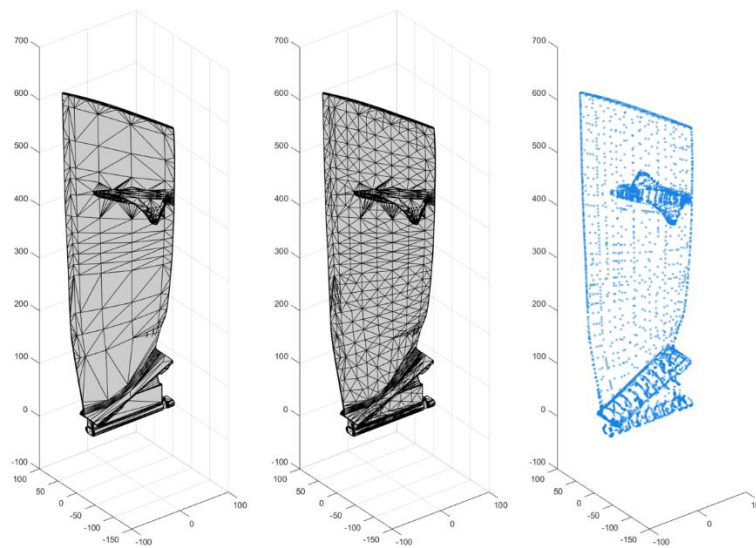


Abbildung 26: Darstellung der Preprocessing-Schritte zur Diskretisierung der Bauteiloberfläche als Punktwolke

Basierend darauf wurde die Optimierung der Sensorposen für die beiden Oberflächenbereiche durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 27 und Abbildung 28 zu sehen.

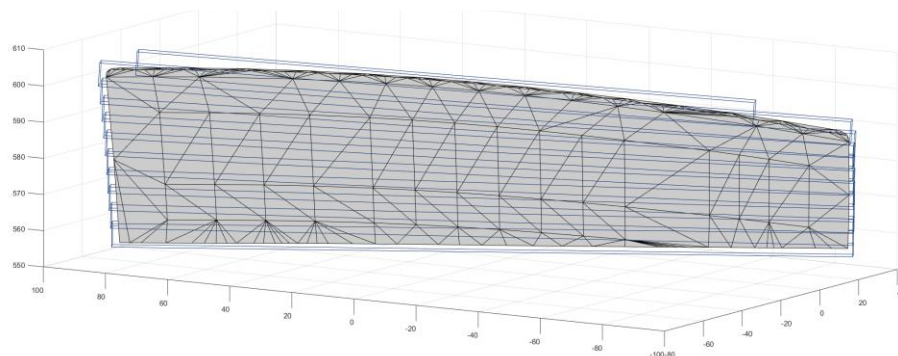


Abbildung 27: Ergebnis der Sensorplanung für die Vermessung der Spitze der Triebwerksschaufel

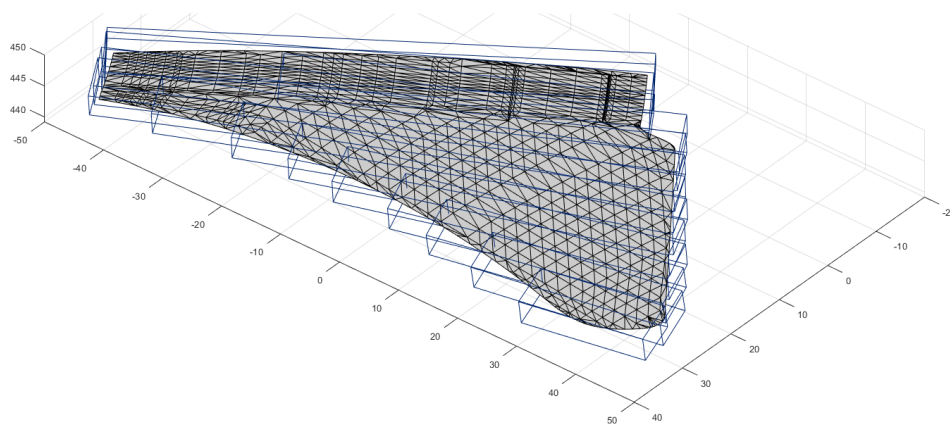


Abbildung 28: Ergebnis der Sensorplanung für die Vermessung des Midspanshrouds

Diese optimierten Posen wurden anschließend genutzt, um daraus einen Roboterpfad und Parametrisierungen für das Linien-WLI zu generieren. Die Roboterpfade wurden im Folgeschritt mithilfe von FAMOS robotic® auf Kollisionsfreiheit überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass die Posen für das Midspanshroud (Abbildung 28) zwar tatsächlich kollisionsfrei sind, jedoch war keine der Posen durch den Roboter erreichbar. Das Ergebnis dieses Prozessschritts ist demnach, dass das Midspanshroud nicht auf der Anlage messbar ist und in diesem Fall manuell inspiziert werden muss. Der Pfad für die Spitze der Triebwerksschaufel wurde anschließend auf der Validierungsplattform abgefahren, um die Bereiche Linieninterferometrisch zu vermessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 29 zu sehen.

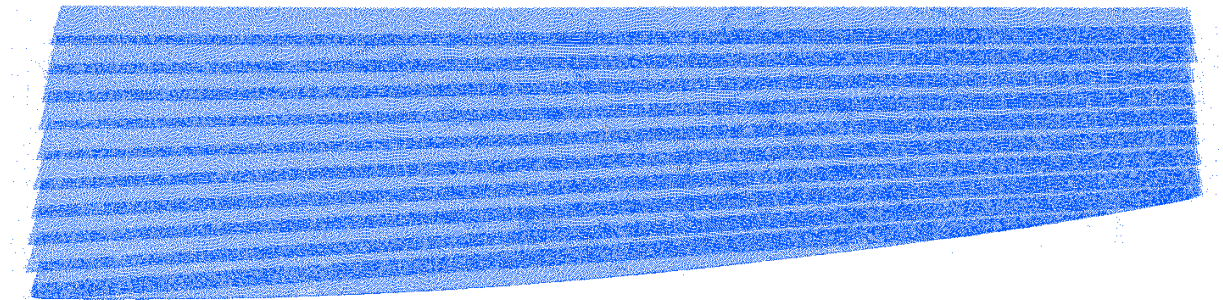


Abbildung 29: Ergebnis der Vermessung der Spitze der Triebwerksschaufel durch den zuvor geplanten Pfad

Für den hybriden Ansatz wurden Sensorposen für die Kamera für eine der großen Flächen generiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 30 zu sehen.

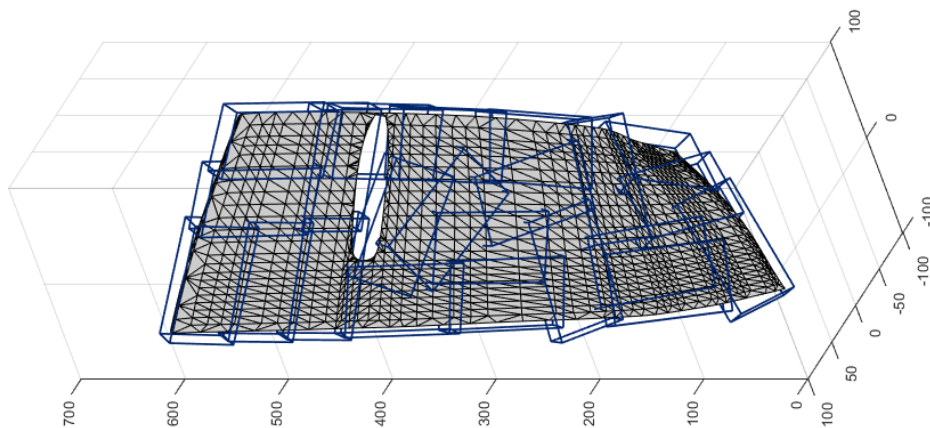


Abbildung 30: Ergebnis der Planung der Sensorposen für die Kamera im hybriden Ansatz

Aus den Kameraposen wurde ein Pfad generiert und dieser wurde auf Kollisionen überprüft und abgefahren. Beispielhaft ist eine Aufnahme der Oberfläche in Abbildung 31 zu sehen.



Abbildung 31: Kameraaufnahme an einer der automatisiert geplanten Posen

Um den zweiten Teil der Pfadplanung für das WLI zu demonstrieren, wurden beispielhaft ROI auf der Oberfläche des Bauteils definiert. Der Pfad für das WLI wurde anschließend für ausschließlich diese Punkte generiert und abgefahren.

2.4.3 AP 5.3 – Prozessdemonstration rotationssymmetrisches Bauteil

Ziel der TUHH in diesem Arbeitspaket war die Bereitstellung von Pfaden für die Prozessdemonstration für rotationssymmetrische Bauteile und die Begleitung der Versuche mit Fokus auf die Handling Mechanismen. Für die Demonstration war auch hier zunächst eine Kalibrierung und das Einmessen des Bauteils notwendig.

Gemäß Änderungsantrag lag der Fokus nach Ende des Projektstopps auf Freiform-Bauteilen. Die Prozessdemonstration für die Pfadplanung wurde dennoch in einem kleinen Maßstab durchgeführt. Für einen rotationssymmetrischen Bereich einer Fahrwerksachse wurde ein Segment ausgewählt und für dieses Sensorposen geplant. Das Ergebnis der Planung für den rein rotationssymmetrischen Anteil des kleinen Ausschnitts ist in Abbildung 32 dargestellt.

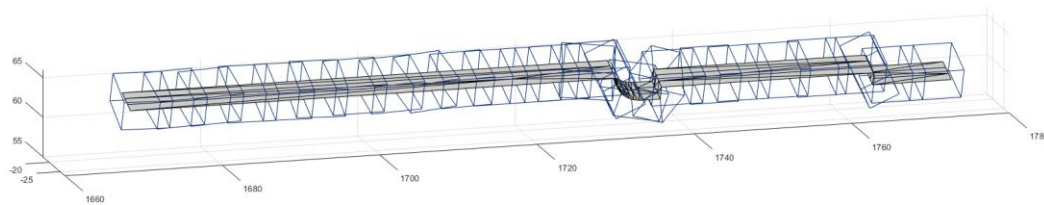


Abbildung 32: Ergebnis der Sensorplanung für einen Abschnitt einer A340 Achse

Rotationssymmetrisch erweitert decken die Messungen annähernd den gesamten Bauteilabschnitt ab, wie in Abbildung 33 zu sehen ist.

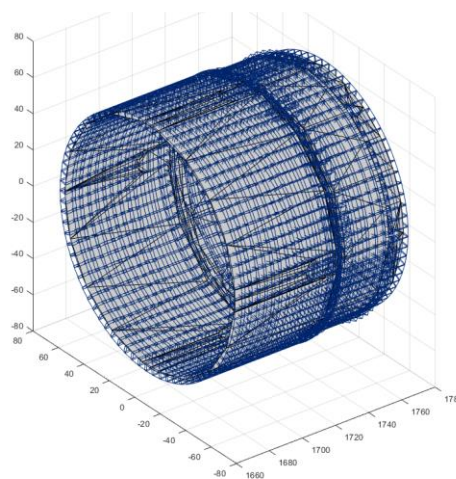


Abbildung 33: Rotationssymmetrische Vervielfältigung der Sensorposen für eine komplette Abdeckung des Achsen Abschnitts

Damit konnte die Pfadplanungsfunktionalität auch für rotationssymmetrische Bauteile demonstriert werden.

2.4.4 AP 5.4 – Auswertung

Ziel des Arbeitspakets auf Seiten der TUHH war die Ableitung von Optimierungspotentialen und die darauf basierende Verbesserung des Gesamtinspektionssystems hinsichtlich des Handlings und der Pfadplanung.

Die grundsätzliche Erprobung und Auswertung war ein iterativer Prozess, der über die gesamte Projektlaufzeit immer wieder Anwendung fand. Die aus mehreren Optimierungsschritten weiterentwickelten Ansätze wurden in den vorherigen Kapiteln bereits dargestellt. So wurden beispielsweise im Rahmen der Optimierung der Sensorposen unterschiedliche Ansätze entwickelt und schließlich der hier dargestellte Prozess bis zur aktuellen Reife optimiert.

Im Rahmen der Prozessdemonstration sind weitere Punkte aufgekommen, die den zeitlichen Rahmen des Projekts überschritten hätten. So ist die Erreichbarkeit anders als zuvor angenommen nicht für jedes Detail der Bauteile gegeben. Außerdem könnte eine Berücksichtigung der Orientierung der Sensorposen zueinander bei der Optimierung sinnvoll sein, um Umsetzbewegungen durch den Roboter zu verkürzen. Im Rahmen des Projekts wurde trotzdem erstmalig eine Planung von Sensorposen mit variablem Messvolumen befähigt.

2.4.5 AP 5.5 – Dokumentation & wissenschaftliche Verwertung

Ziel der TUHH war in diesem Arbeitspaket die Dokumentation der Prozessdemonstrationen und die Verwertung der Projektergebnisse in wissenschaftlichen Produkten. Während des Projekts wurden Demonstrationen und Versuche durch das IFPT dokumentiert. Nachwuchs im Luftfahrtbereich wurde im Rahmen von studentischen Arbeiten gefördert. Dabei sind besonders die gemeinschaftlichen Arbeiten von 3D.aero und IFPT hervorzuheben, die durch die Kooperation in diesem Forschungsprojekt entstanden sind.

Projektergebnisse wurden im Rahmen von nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert und durch Veröffentlichungen der wissenschaftlichen Welt zugänglich gemacht. Veröffentlicht wurden Paper zu den Themen

- Beschreibung des generellen Inspektionssystems mit Klarstellung des Neuheitsgrades und der Herausforderungen für den Inspektionsprozess
- Clusterungsalgorithmen für die WLI Bahnplanung im hybriden Ansatz für die Reduktion von Ansichtenkandidaten
- Inspektion von Reworks mithilfe der Weißlichtinterferometrie

Das Thema der Bahnplanung weist Forschungslücken auf, sodass dazu im Rahmen des Projekts eine Dissertation gestartet wurde. Diese wird auch nach Projektende fortgesetzt und es werden weitere Veröffentlichungen folgen.

2.5 HAP 6 – Zulassungsvorbereitung

2.5.1 AP 6.2 – POD-Studie

Aufgabe der TUHH in diesem Arbeitspaket war die Bereitstellung der Pfade und die Betreuung des Handlings während der Versuche für die POD-Studie.

Um einen wertschöpfenden Beitrag in diesem Arbeitspaket zu leisten, wurden Pfade generiert und diese mehrfach abgefahren, um die Wahrscheinlichkeit einer vollständigen Abdeckung zu überprüfen. Da es mit dem verwendeten Sensor immer wieder Temperaturprobleme bei Dauereinsätzen gab, wurde der Bereich für diese Abdeckungsuntersuchung relativ klein gewählt. Dafür wurde wiederum die Spitze der Triebwerksschaufel auf einer Seite verwendet. Das Ergebnis der Generierung der Sensorposen ist in Abbildung 34 dargestellt.

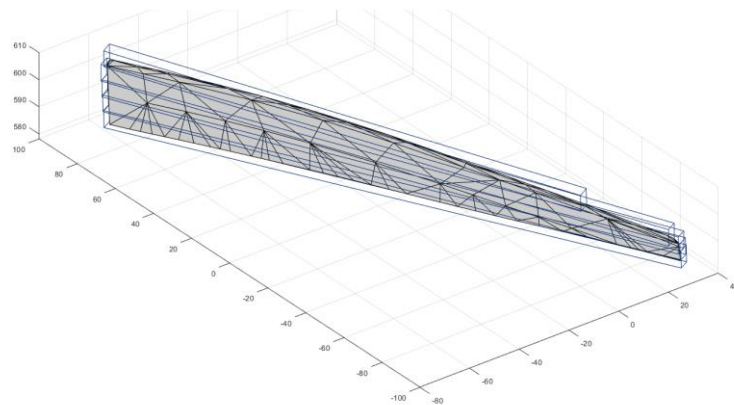


Abbildung 34: Ergebnis der Sensorplanung für die POD Versuche zur Pfadplanung an der Triebwerksschaufel

Es wurden iterativ Durchläufe gefahren. Beispielhaft ist eine der Punktwolken in Abbildung 35 zu sehen. Die Punktwolke deckt den geforderten Bereich komplett ab und weist ausreichend Überlappung für die Registrierung der Messdaten auf. Die fehlende Ecke, die hier unten rechts in der Abbildung zu sehen ist, entstand durch die noch nicht durchgeführte Registrierung, die Teil der Datenauswertung ist.



Abbildung 35: Beispielergebnis der Vermessung für die POD Messungen

3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Position des zahlenmäßigen Nachweises war die Validierungsplattform, die gemäß Antrag von der TUHH bei der 3D.aero erworben wurde. Diese umfasste die folgenden wichtigsten Positionen

- WLI (inkl. Optik und Steuerung)
- Linearachse (inkl. Steuerung)
- Drehtisch (inkl. Steuerung)
- Plattform (inkl. Entkopplung)
- Bauteilaufnahme

Durch die Validierungsplattform konnten mit realem Kinematik- und Sensorverhalten nachgewiesen werden, dass die Linien-WLI für Inspektionen einsetzbar ist. Außerdem war die Plattform zwingend notwendig, um die Pfadplanungsansätze zu validieren. Nur so konnte die Fähigkeit, zuverlässig die nötige Oberflächenabdeckung zu erreichen, gezeigt werden. Außerdem wurde sie im Rahmen erster Machbarkeitsversuche für die Fahrwerksbauteile nach Ende des Projektstopps benötigt. Ohne die Validierungsplattform wären die Forschungsarbeiten der TUHH im Rahmen des Projekts nicht möglich gewesen.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Durch die Zuwendung wurden die Projektpartner und die TUHH in die Lage versetzt, die oben vorgestellten Forschungsthemen zu bearbeiten. Dies wäre ohne die Zuwendung nicht möglich.

5 Nutzen/Verwertbarkeit

Die Verwertbarkeit für die TUHH sind einerseits der wissenschaftliche Fortschritt, der der Fachwelt durch Veröffentlichungen, die im Rahmen des Projektes entstanden sind (siehe Auflistung Veröffentlichungen), zugänglich gemacht ist, andererseits aber auch die forschungsnahe Ausbildung von Studierenden. Parallel zum Verlauf des Projektes ist die Einbindung in die Lehre erfolgt, wie z.B. der Durchführung studentischer Arbeiten.

In dem Projekt wurden Ansätze für die Inspektions-Pfadplanung entwickelt, die nicht nur für Linien-WLI sondern für alle Sensoren mit variablen und nicht variablen Messvolumina anwendbar sind. Mit diesem Fortschritt konnte ein innovativer Beitrag zur Einsetzbarkeit von Linien-WLI für die Inspektion geschaffen und erfolgreich demonstriert werden. Forschungsergebnisse und Kenntnisszuwachs fließen in neue Projekte mit den Themen Automatisierung und Pfadplanung wie bspw. die LuFo VI-3 Projekte LEGATO und GIGA ein.

6 Fortschritt anderer Stellen

Es wurde kein uns bekannter Fortschritt an anderen Stellen erzielt.

7 Veröffentlichungen, Vorträge, studentische Arbeiten

Veröffentlichungen und Vorträge, die auf Basis der beschriebenen Projektstätigkeiten basieren:

- 1 Ehrbar, J.; Schoepflin, D.; Schüppstuhl, T. (2023): **Robot-based inspection of freeform components: process analysis and challenges in using a lateral scanning WLI**. 32nd International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Porto, 18.-22.06.2023.
- 2 Ehrbar, J.; Kähler, F.; Schüppstuhl, T. (2023): **Automated assessment for grinding spots on aircraft landing gear components using robotic white light interferometry**. SPIE Optical Metrology, München, 26.-29.06.2023.
- 3 Ehrbar, J.; Röders, J.; Schüppstuhl, T. (2023): **Cycle time reduction through a novel view planning concept for hybrid white light interferometry-based inspection**. 56th CIRP International Conference on Manufacturing Systems 2023, Kapstadt, 23.-26.10.2023.

Geplante Veröffentlichungen

Noch geplant sind Veröffentlichungen, die spezifischer auf das Thema Ansichtenplanung für die Inspektion eingehen. In einer Veröffentlichung sollen die Approximationsansätze für die Ansichtenplanung wissenschaftlich verwertet werden. Anschließend soll die gesamte Bahnplanung für die WLI basierte Inspektion als ein wissenschaftlicher Beitrag verwertet werden. Außerdem steht noch die Dissertation mit Schwerpunkt der Ansichtenplanung in der Inspektion offen.

Studentische Arbeiten

- **Implementierung und Validierung einer Kalibrierstrategie für ein im Raum statisch fixiertes Weißlichtinterferometer zu einer Roboterbasis**, Studienarbeit 2021
- **Entwicklung verschiedener Konzepte zur Ansichtenplanung für die Inspektion von Freiformflächen mittels WLI in einem hybriden Ansatz**, Studienarbeit 2021
- **Konzipierung und Erprobung von Prozess und Pfadplanung zur teilautomatischen Vermessung von Fahrwerksbauteilen mit Weißlichtinterferometrie**, Studienarbeit 2023
- **Evaluation of 3D measurement data during inspection of aircraft landing gear components**, Masterarbeit 2023

8 Literaturverzeichnis

- [1] W. R. Scott, G. Roth und J.-F. Rivest, "View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection", *ACM Comput. Surv.*, 2003, doi: 10.1145/641865.641868.
- [2] T. Domaschke, „Automatisierung der Weißlichtinterferometrie zur Inspektion rotationssymmetrischer Triebwerksbauteile“, Dr. Hut GmbH, 2017, DOI: 10.15480/882.1501.
- [3] *EPSRC Fellowship in Manufacturing: Collaborative Metrology Systems for High Value Manufacturing*. Loughborough University, URL: <https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FL01498X%2F1#/tabOverview> (Zugriff am: 14. Oktober 2023).
- [4] I. Biro, J. Turner, J. Hodgson, N. Lohse und P. Kinnell, "Integration of a scanning interferometer into a robotic inspection system for factory deployment" in *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2020, DOI: 10.1109/SII46433.2020.9025972.
- [5] P. Kinnell, T. Rymer, J. Hodgson, L. Justham und M. Jackson, "Autonomous metrology for robot mounted 3D vision systems", *CIRP Annals*, 2017, DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.069.

- [6] A. Bircher *et al.*, “Three-dimensional coverage path planning via viewpoint resampling and tour optimization for aerial robots”, *Auton Robot*, 2016, DOI: 10.1007/s10514-015-9517-1.
- [7] L. Li, de Xu, L. Niu, Y. Lan und X. Xiong, “A path planning method for a surface inspection system based on two-dimensional laser profile scanner”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, DOI: 10.1177/1729881419862463.
- [8] S. Son, S. Kim und K. H. Lee, “Path planning of multi-patched freeform surfaces for laser scanning”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, DOI: 10.1007/s00170-002-1502-0.
- [9] F. Prieto, R. Lepage, P. Boulanger und T. Redarce, “A CAD-based 3D data acquisition strategy for inspection”, *Machine Vision and Applications*, 2003, DOI: 10.1007/s00138-003-0131-4.
- [10] D. Mosbach, P. Gospodnetić, M. Rauhut, B. Hamann und H. Hagen, “Feature-Driven Viewpoint Placement for Model-Based Surface Inspection”, *Machine Vision and Applications*, 2021, DOI: 10.1007/s00138-020-01116-y.
- [11] J. Giercker und T. Schüppstuhl, “Assembly specific viewpoint generation as part of a simulation based sensor planning pipeline”, *Procedia CIRP*, 2021, DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.165.
- [12] E. Glorieux, P. Franciosa und D. Ceglarek, “Coverage path planning with targetted viewpoint sampling for robotic free-form surface inspection”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101843.
- [13] *CloudCompare: 3D point cloud and mesh processing software*. Version 2, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cloudcompare.org/>