Echtzeitfähige Merkmalerkennung für eine adaptive roboterbasierte Bearbeitung und Dichtmittelauftrag

ADMAS

Abschlussbericht

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Laufzeit des Vorhabens:	01.10.2020 – 31.03.2024
Berichtszeitraum:	01.10.2020 – 31.03.2024
Förderkennzeichen:	20W1901B

3D.aero GmbH
Billhorner Deich 96
20539 Hamburg

Hamburg, den 27.05.2024

INHALT

1 Kurze Darstellung 3
1.1 Aufgabenstellung 3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 9
2 Eingehende Darstellung 10
2.1 Ergebnisse 10
a) AP 1.1: Definition der Anforderungen 10
b) AP 1.2: Entwicklung von Markierungen/lokalen Referenzen auf CFK-Bauteilen 12
c) AP 1.6: Auswahl und Entwicklung geeigneter Messtechnik und Software zur Bildauswertung 18
d) AP 1.7: Entwicklung des Echtzeit-Regelkreises 23
e) AP 6.2: Inbetriebnahme und Test von Teiltechnologien 27
f) AP 6.3: Integration der Teilkomponenten zum Gesamtsystem 30
g) AP 6.4: Inbetriebnahme und Optimierung des Gesamtsystems 32
h) AP 6.5: Validierung des Gesamtsystems 34
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 39
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 39
2.4 Voraussichtlicher Nutzen des Vorhabens 40
2.5 Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens 40
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen 40
3 Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur 42
4 Abbildungsverzeichnis 43

1 KURZE DARSTELLUNG

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Das Förderprojekt **Ad**vanced **Ma**chining and **S**ealing (ADMAS) hat sich mit der Fertigungsoptimierung von Flügelschalen für ein zukünftiges neues Verkehrsflugzeug befasst. Hierzu sollten heute noch sehr kostenintensive Prozessschritte nach dem Aushärten der Flügelschalen betrachtet werden: die Kantenbearbeitung (Umrissfräsen und Entgraten) und das anschließende Versiegeln.

So wie in fast allen heutigen Prozessen werden aktuell mittels Bohrschablonen Referenzbohrungen eingebracht, um das Bauteil zu referenzieren und gemäß Sollgeometrie zu bearbeiten. Hierfür ist allerdings eine steife und präzise Einspannung in Verbindung mit einer ebenso hochgenauen Bearbeitungsmaschine notwendig. Eine deutlich flexibleres und weniger kostenintensives Anlagenkonzept wäre durch eine wesentliche Strategieänderung bei der Referenzierung denkbar. Um mit einem roboterbasierten Anlagenkonzept die geforderten Bearbeitungsgenauigkeiten zu erreichen, sollte im Vorhaben untersucht werden, wie eine Referenzierung an lokalen Bauteilmarkierungen umsetzbar sein könnte. Dazu sollten hochgenaue Markierungen wie Harzkanten oder Nuten ins Bauteil eingebracht werden, die nur von der Geometrie des Aushärtewerkzeuges abhängen und nicht von einem nachgelagerten Prozess, wie dem Bohren von Referenzbohrungen.

Ein robotergeführtes Sensorsystem am Bearbeitungskopf sollte diese Markierung erkennen und nutzen, um mittels einer Ausgleichskinematik die Bahn lokal zu adaptieren. Die Grobpositionierung sollte z.B. durch einen Industrieroboter auf einer Linearachse erreicht werden. Gleichzeitig sollte im Verbund ein neuartiges Entgratwerkzeug entwickelt werden, um ein manuelles Entgraten zu ersetzen. Für das automatisierte Kantenversiegeln sollte eine Dosieranlage so entwickelt werden, dass sie mittels Wechselkopf integriert werden kann. Dadurch sollten die Technologien für eine hocheffiziente, integrale und flexible Bearbeitungszelle entstehen, die den Anforderungen einer Hochkadenzfertigung von zukünftigen Bauteilen gerecht werden kann.

Die einzelnen Aufgabenstellungen der Konsortialpartner bei diesem Vorhaben sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Aufgabe der 3D.aero war die Entwicklung eines geeigneten Messsystems zur echtzeitfähigen Erfassung der geometrischen Markierungen.

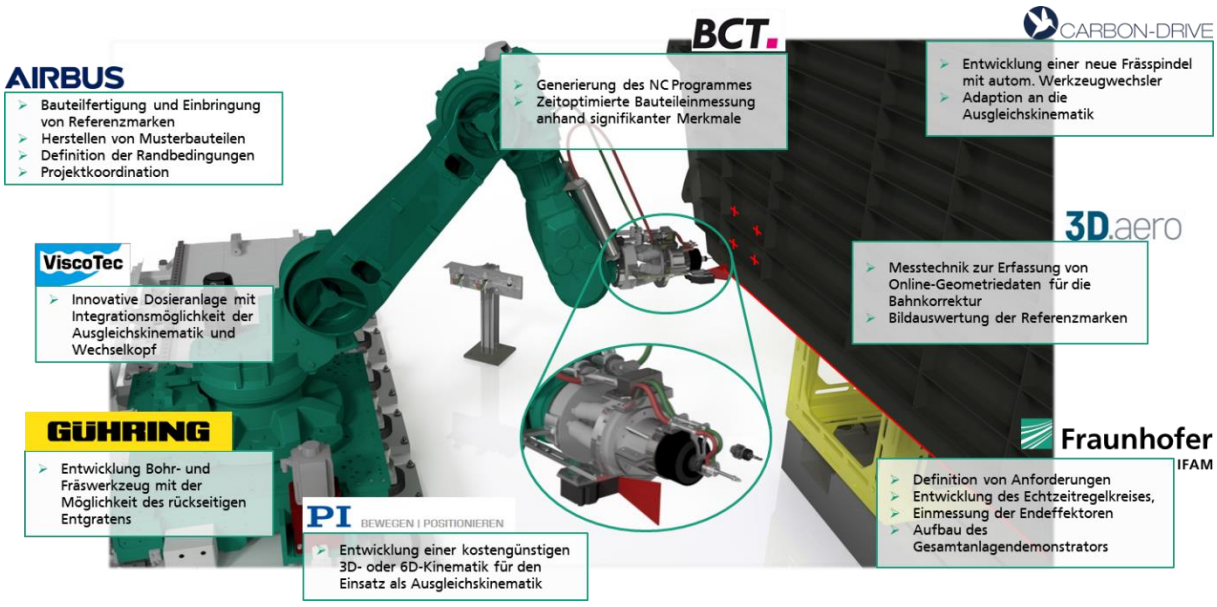


Abbildung 1: Darstellung der Beiträge der einzelnen Konsortialpartner zum Gesamtziel des Vorhabens

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Konsortium setzt sich aus verschiedenen Projektpartnern zusammen, zu denen die 3D.aero teilweise schon mehrjährige Beziehungen pflegt. So bestand schon vor dem Start des Vorhabens ADMAS eine Zusammenarbeit mit dem Konsortialführer und dem Fraunhofer IFAM in verschiedenen Forschungsprojekten, zum Beispiel im Rahmen von BiSconA (FKZ: 20W1724F) oder MFlex2025 (FKZ: 20X1720F). Betrachtet wurde im Rahmen von BiSconA ebenfalls ein Prozess aus der Produktion von Flugzeuggroßbauteilen, in diesem Fall der verformungs- und spannungskonforme Zusammenbau von Rumpfschalen. Zur hochgenauen Erfassung dieser Nietfelder wurden mehrere ortsfeste Stereokamerasysteme verwendet, die einzelne Nietfelder erfassen konnten. Anschließend wurden die Kamerabilder ausgewertet, um die Nietpositionen im Raum auch hier im Sinne natürlicher Referenzmarken zu bestimmen.

Bei MFlex2025 lag der Fokus auf dem roboterbasierten Setzen von Kollaren auf Hi-Lok-Verbindungselemente. Dazu muss die Robotereinheit sich zunächst in der Produktionshalle orientieren können und sich dann in einem zweiten Schritt relativ zum Bauteil (Flugzeugrumpf) ausrichten. Im dritten Schritt ist ebenfalls eine lokale Feinreferenzierung anhand natürlicher Merkmale (Hi-Lok-Verbindungselemente) notwendig. Zur lokalen Feinreferenzierung wurde ein robotergeführtes Stereo-Kamerasystem entwickelt, um eine hochgenaue Positionierung des Endeffektors zu ermöglichen.

Neben diesen Aktivitäten im Bereich der Forschung und Entwicklung, bringt die 3D.aero langjährige Expertise in der Umsetzung von industriellen 3D-Datenverarbeitungslösungena in das Projekt ein. Auch im Bereich Robotik hat die 3D.aero bereits einige industrielle Anwendungen umgesetzt und damit Knowhow aufgebaut, das bei der Entwicklung und Integration der Messtechnik eingeflossen ist.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Abbildung 2 zeigt die Arbeitspakte des Projekts ADMAS mit den jeweils daran beteiligten Partnern. Im Folgenden werden die Inhalte der Arbeitspakete mit Beteiligung der 3D.aero kurz zusammengefasst.

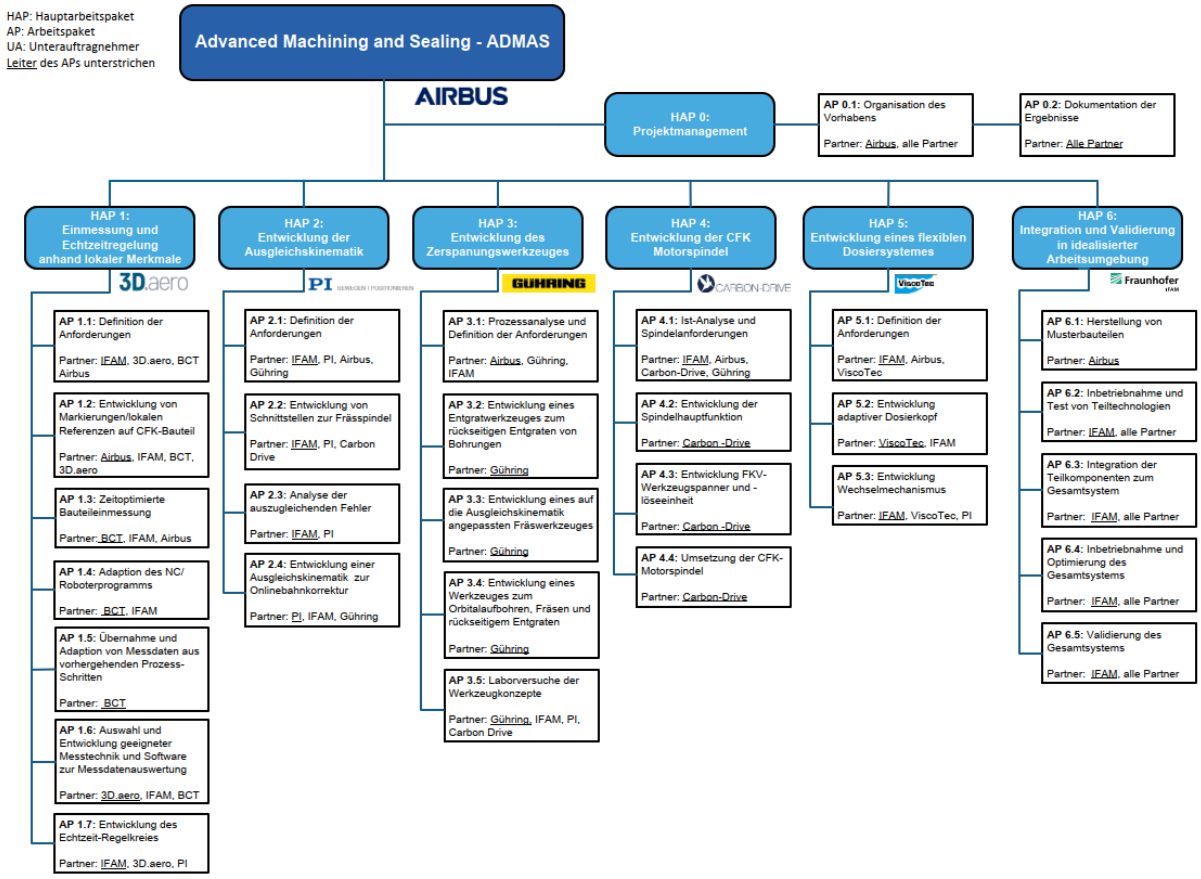


Abbildung 2: Projektstrukturplan des Projekts ADMAS

In HAP1 übernimmt die 3D.aero die Arbeitspaketleitung. Im Rahmen dieses Hauptarbeitspakets war aufseiten der 3D.aero geplant, die folgenden technischen Arbeitsziele umzusetzen:

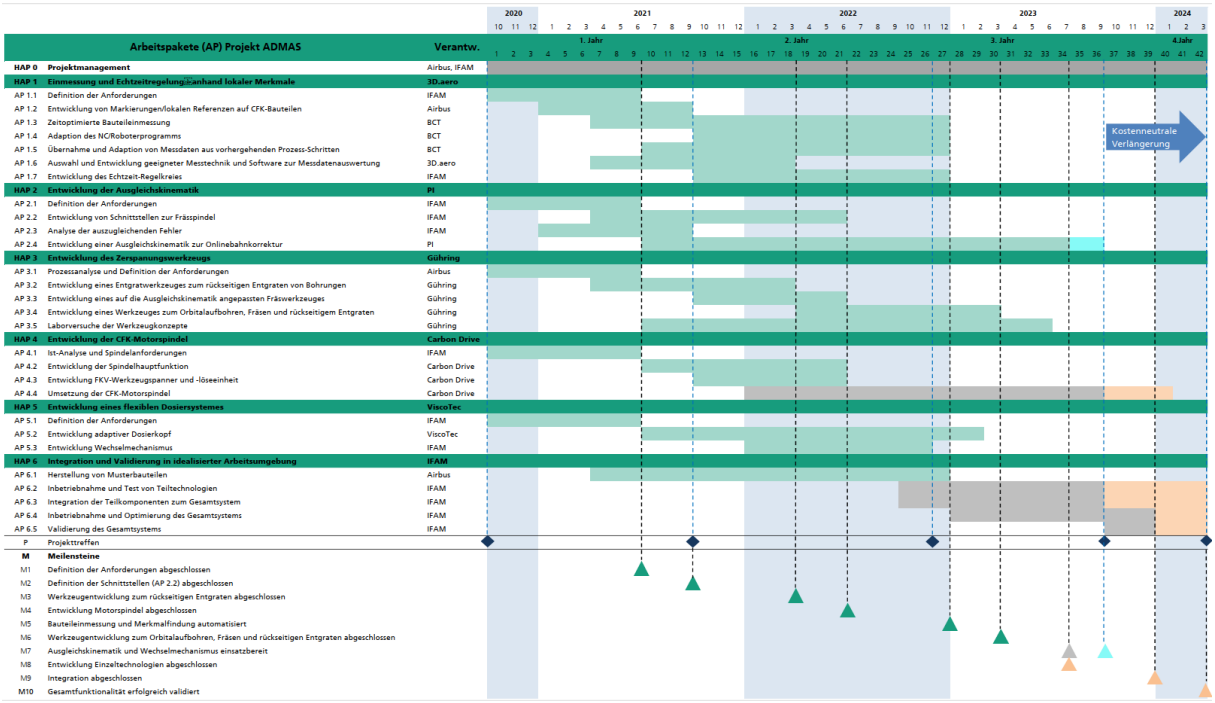
- Entwicklung eines optischen Messsystems zur Erfassung von geometrischen Referenzmarken
- Entwicklung geeigneter Softwarebausteine zur Kommunikation mit der übergeordneten Prozesssteuerung und zur Konfiguration des Messsystems
- Entwicklung geeigneter Softwarebausteine zur echtzeitfähigen Auswertung der Messdaten
- Entwicklung echtzeitfähiger Schnittstellen zur informationstechnischen Anbindung des Messsystems an den Regelkreis

In HAP6 werden die Einzeltechnologien zu einem Gesamtkonzept zusammengeführt und anhand des Demonstrators Versuche zur Validierung der Prozesse durchgeführt. Die hierbei verfolgten Arbeitsziele der 3D.aero waren:

- Integration des entwickelten Messsystems in das Gesamtkonzept
- Validierung des Messsystems im Hinblick auf das erzielte Bearbeitungsergebnis beim Fräsen, Bohren und dem Auftrag von Dichtmasse

Die ursprünglich geplante Laufzeit des Projekts war vom 01.01.2020 bis zum 31.12.2022. Mit dem Zuwendungsbescheid vom 01.10.2020 ist das Projekt dann zum 01.10.2020 gestartet, der Projektabschluss war entsprechend zum 30.09.2023 vorgesehen. Im Projektverlauf wurde seitens des Konsortiums eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 6 Monate angestrebt und

bewilligt, um eine vollumfängliche Evaluation des entwickelten Gesamtsystems sicherzustellen. Insbesondere die in HAP 6 geplante Validierung der seitens 3D.aero entwickelten Algorithmik erforderte es, dass die Integration der einzelnen Teilkomponenten zu einem Gesamtsystem abgeschlossen ist. Durch die direkte Einbindung der entwickelten Software in den Regelkreis für die mechanische Bearbeitung und den Sealing-Prozess war eine Erprobung und Optimierung der Softwaremodule im Rahmen von praktischen Versuchen und Prozessstudien erst mit einem funktionsfähigen Gesamtsystem möglich. Dadurch hat sich letztlich der in Abbildung 3 dargestellte zeitliche Ablauf der einzelnen Arbeitspakete und Meilensteine ergeben.



	Arbeitspakete (AP) Projekt ADMAS	Verantw.
HAP 0	Projektmanagement	Airbus, IFAM
HAP 1	Einmessung und Echtzeitregelung anhand lokaler Merkmale	3D.aero
AP 1.1	Definition der Anforderungen	IFAM
AP 1.2	Entwicklung von Markierungen/lokalen Referenzen auf CFK-Bauteilen	Airbus
AP 1.3	Zeitoptimierte Bauteileinmessung	BCT
AP 1.4	Adaption des NC/Roboterprogramms	BCT
AP 1.5	Übernahme und Adaption von Messdaten aus vorhergehenden Prozess-Schritten	BCT
AP 1.6	Auswahl und Entwicklung geeigneter Messtechnik und Software zur Messdatenauswertung	3D.aero
AP 1.7	Entwicklung des Echtzeit-Regelkreises	IFAM
HAP 2	Entwicklung der Ausgleichskinematik	PI
AP 2.1	Definition der Anforderungen	IFAM
AP 2.2	Entwicklung von Schnittstellen zur Frässpindel	IFAM
AP 2.3	Analyse der auszugleichenden Fehler	IFAM
AP 2.4	Entwicklung einer Ausgleichskinematik zur Onlinebahnkorrektur	PI
HAP 3	Entwicklung des Zerspanungswerkzeugs	Gühring
AP 3.1	Prozessanalyse und Definition der Anforderungen	Airbus
AP 3.2	Entwicklung eines Entgratwerkzeuges zum rückseitigen Entgraten von Bohrungen	Gühring
AP 3.3	Entwicklung eines auf die Ausgleichskinematik angepassten Fräswerkzeuges	Gühring
AP 3.4	Entwicklung eines Werkzeuges zum Orbitalaufbohren, Fräsen und rückseitigem Entgraten	Gühring
AP 3.5	Laborversuche der Werkzeugkonzepte	Gühring
HAP 4	Entwicklung der CFK-Motorspindel	Carbon Drive
AP 4.1	Ist-Analyse und Spindelanforderungen	IFAM
AP 4.2	Entwicklung der Spindelhauptfunktion	Carbon Drive
AP 4.3	Entwicklung FKV-Werkzeugspanner und -löseeinheit	Carbon Drive
AP 4.4	Umsetzung der CFK-Motorspindel	Carbon Drive
HAP 5	Entwicklung eines flexiblen Dosiersystemes	ViscoTec
AP 5.1	Definition der Anforderungen	IFAM
AP 5.2	Entwicklung adaptiver Dosierkopf	ViscoTec
AP 5.3	Entwicklung Wechselmechanismus	IFAM
HAP 6	Integration und Validierung in idealisierter Arbeitsumgebung	IFAM
AP 6.1	Herstellung von Musterbauteilen	Airbus
AP 6.2	Inbetriebnahme und Test von Teiltechnologien	IFAM
AP 6.3	Integration der Teilkomponenten zum Gesamtsystem	IFAM
AP 6.4	Inbetriebnahme und Optimierung des Gesamtsystems	IFAM
AP 6.5	Validierung des Gesamtsystems	IFAM
P	Projekttreffen	
M	Meilensteine	
M1	Definition der Anforderungen abgeschlossen	
M2	Definition der Schnittstellen (AP 2.2) abgeschlossen	
M3	Werkzeugentwicklung zum rückseitigen Entgraten abgeschlossen	
M4	Entwicklung Motorspindel abgeschlossen	
M5	Bauteileinmessung und Merkmalfindung automatisiert	
M6	Werkzeugentwicklung zum Orbitalaufbohren, Fräsen und rückseitigen Entgraten abgeschlossen	
M7	Ausgleichskinematik und Wechselmechanismus einsatzbereit	
M8	Entwicklung Einzeltechnologien abgeschlossen	
M9	Integration abgeschlossen	
M10	Gesamtfunktionalität erfolgreich validiert	

Abbildung 3: Projektplan (Stand: 31.03.2024)

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Aufgrund der Größe der Bauteile, der geringen Stückzahl sowie der hohen Schwankungen in Bezug auf die geometrischen Abmessungen ist eine konventionelle Automatisierung bei der Produktion von Großbauteilen aus Faserverbundmaterialen nur eingeschränkt umsetzbar. Vor allem fest vorgegebene Pfade in einem globalen Koordinatensystem auf Basis von geometrischen Solldaten für Bearbeitung und Kantenversiegelung führen aufgrund der individuell unterschiedlichen Bauteiltoleranzen zu fehlerhaften Ergebnissen.

Ein Ansatz, um diese Fehler zu kompensieren besteht darin, während der Bearbeitung die anhand der Soll-Geometrie programmierte Robotertrajektorie automatisiert und in Echtzeit an die Ist-Geometrie des Bauteils zu adaptieren. Dies erfordert zunächst eine sensorische Erfassung der Ist-Geometrie, die Auswertung der Messdaten zur Bestimmung der Abweichung zwischen Soll-Geometrie und Ist-Geometrie und schlussendlich einen echtzeitfähigen Regelkreis zwischen dem Sensorsystem und der Kinematik zur Adaption des Endeffektors. Ein Anwendungsfall für eine sensorgeregelte Roboterbewegung ist die Nahtverfolgung beim Schweißen. In der Forschung wurden bereits verschiedene Lösungsmöglichkeiten betrachtet. Dabei wird in der Regel die Schweißnaht erkannt, um diese

durch den Endeffektor verfolgen zu können. Besondere Herausforderungen beim Schweißen im Zusammenhang mit dem Einsatz optischer Sensorik sind hohe Prozesstemperaturen und Wärmestrahlung sowie Rauchentwicklung (Huang, Gao, You, & Li, 2012). In der Arbeit von (Liu, Fan, Olsen, Christensen, & Kristensen, 2015) ist die Schweißnahtverfolgung mit einer Kamera beispielhaft umgesetzt. Diese dient zum einen dazu, die Position und Orientierung der Schweißnaht zu berechnen und darüber hinaus der Überwachung des Schmelzbads. Die Herausforderung besteht darin, dass beide Merkmale deutlich unterschiedliche Randbedingungen haben. Beim Schmelzbad entsteht durch die hohe Wärme eine starke Illumination des Bereichs. Wohingegen die Schweißnaht diesen Effekt nicht aufweist. Deshalb müssen die Merkmale beim Einsatz optischer Sensorik mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommen werden. Auf Basis der Messdaten und deren Auswertung kann die Bahnführung entlang der Schweißnaht im Prozess angepasst und gleichzeitig die Qualität dieser Naht überwacht und die Schweißparameter nachjustiert werden. Die Geschwindigkeiten, die mit den implementierten Algorithmen erreicht werden, liegen bei lediglich 10 Hz für die Nahterkennung und 30 Hz für die Auswertung des Schmelzbads. In der Arbeit von (Kos, Arko, Kosler, & Jezersek, 2019) wird eine vergleichbare Anwendung vorgestellt, eine Nahtverfolgung für das robotergeführte Laserschweißen. Bei der verwendeten Sensorik handelt es sich um eine Kamera, die eine flächige Aufnahme der Naht erzeugt. In dieser Aufnahme wird die Position der Naht bestimmt und anhand dieser Information der Laserstrahl ausgerichtet. Des Weiteren wird auf Basis der Aufnahme die Laserstärke überwacht, um ein bessere Nahtqualität zu erzeugen. Einen anderen Ansatz für das Laserschweißen verfolgen (Zhang, Chen, Zhang, Sun, & Du, 2007). Hier werden für die Datenerfassung zwei Kameras in einer Stereo-Anordnung verwendet, um die Abweichung der Robotertrajektorie zur tatsächlichen Naht minimieren. Auf die Auswertezeit und damit die Echtzeitfähigkeit der Algorithmen wird in den genannten Arbeiten nicht näher eingegangen.

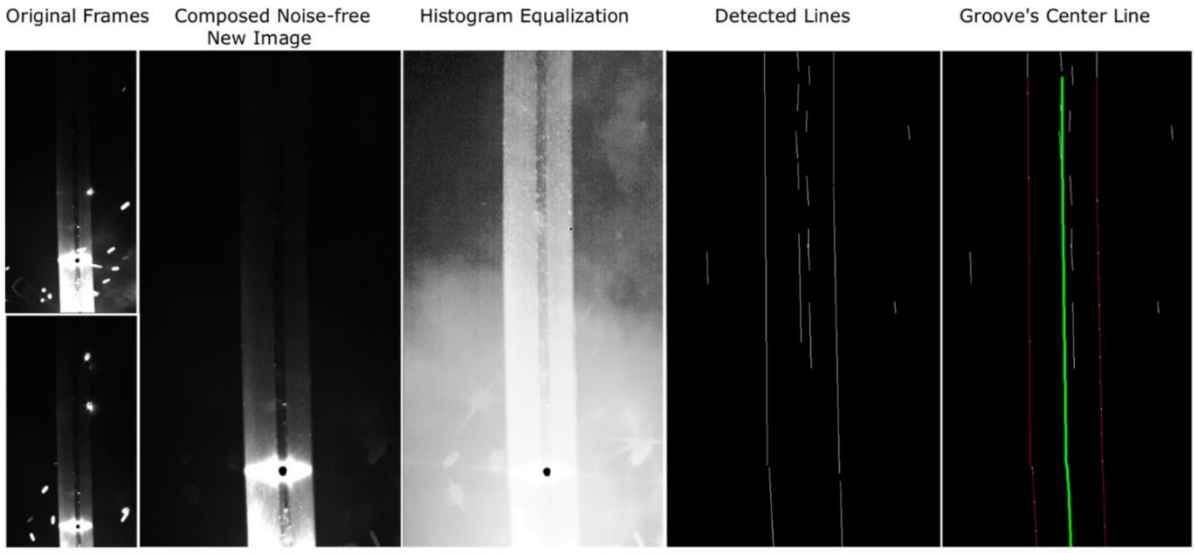


Abbildung 4: Einzelschritte der Bildverarbeitung zur Bestimmung der Naht (Kos, Arko, Kosler & Jezersek, 2019)

Auch bei Großstrukturen werden die beschriebenen Verfahren zur Regelung von Schweißprozessen bereits verwendet. So wird z.B. in (Kermorgant, 2018) ein mobiler Kletterroboter über Magnete über einen Schiffsrumpf bewegt. Statt eines Kamerasystems wird dabei ein triangulationsbasierter Sensor (Laserlichtschnittsensor) eingesetzt, um die Schweißnähte zu erkennen. Diese extrahierten Informationen dienen als Eingangsdaten, um die mobile Einheit an der Naht entlangzuführen. Da sich die mobile Robotereinheit lediglich

mit 0,02 m/s an der Struktur fortbewegt, ist die Ausführzeit der Algorithmen kein kritischer Punkt und wird in der Arbeit auch nicht näher betrachtet.

Neben den zumeist untersuchten Schweißanwendungen finden sich im Bereich der Forschung auch Untersuchungen zu den im Rahmen von ADMAS betrachteten Fertigungsprozessen: Aufbringen von Dichtmitteln und Fräsen. In der Arbeit von (Arakawa, Kakizaki, & Omyo, 2000) wird ein Industrieroboter genutzt, um Dichtmittel an einer Naht aufzubringen. Der Endeffektor des Roboters besteht aus der Applikationsdüse und einem davor montierten Laserlichtschnittsensor. Ein besonderer Fokus der Arbeit liegt darauf, den Algorithmus für die Nahterkennung und –lokalisierung echtzeitfähig zu gestalten, um dadurch auch schnellere Roboterbewegungen zu ermöglichen. Die erreichte Robotergeschwindigkeit liegt hier bei 400 mm/s, also durchaus im Bereich einer industriell einsetzbaren Größe. In der Arbeit von (Schindlbeck, Janz, Pape, & Reithmeier, 2017) wird ein Makro-Mikro-Manipulator eingesetzt, um anhand von visuellen Informationen die Präzision während einer Fräsbearbeitung zu erhöhen. Bei der Makro-Positioniereinheit handelt es sich um einen Roboter mit einem Endeffektor aufgebaut aus Mikro-Positioniereinheit und Frässpindel (Abbildung 5). Die Mikro-Positioniereinheit besteht aus piezoelektronischen Motoren. Am Manipulator ist des Weiteren ein Marker angebracht, der von zwei externen Kameras erfasst wird. So kann die Lage des Endeffektors und damit dessen die Abweichung zur Soll-Pose bestimmt werden. Diese Abweichung dient als Eingangsparameter für einen Regelkreis, der anhand der piezoelektronischen Motoren die ermittelte Abweichung kompensieren soll.

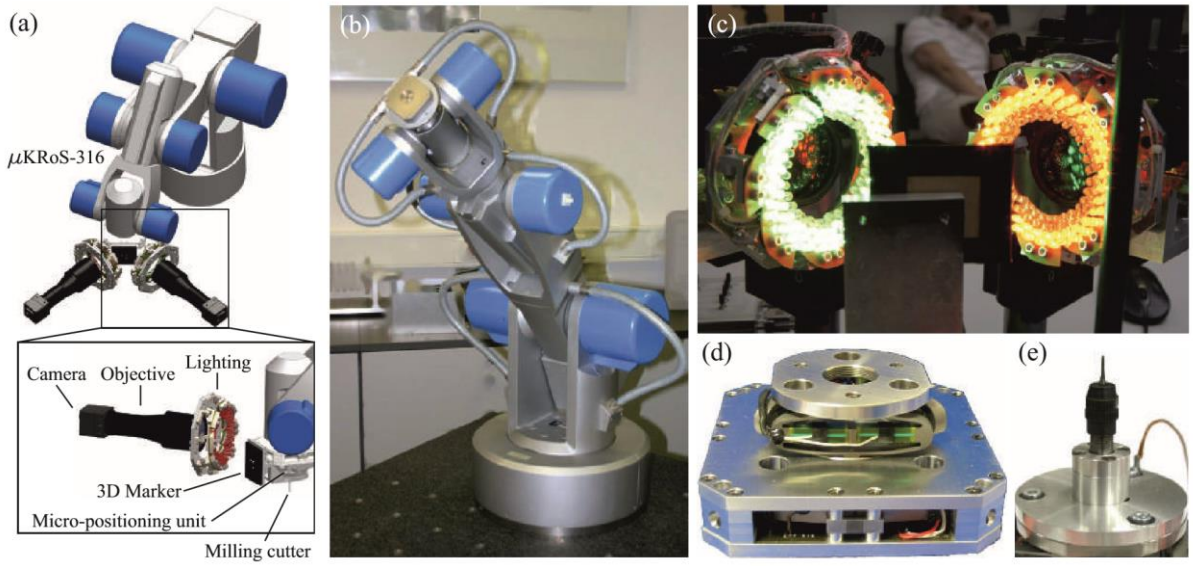


Abbildung 5: Aufbau des Demonstrators (Schindlbeck, Janz, Pape, & Reithmeier, 2017) a) Schematischer Aufbau des Makro-Mikro-Manipulators b) Makro-Positioniereinheit c) Stereovision-System d) Mikro-Positioniereinheit e) Endeffektor: Fräseinheit

Eine weitere Fräsanwendung wird in der Arbeit von (Höfener, 2017) betrachtet. Hier sollen an einer CFK-Großstruktur (Flugzeugrumpf, -flügel) zur Reparatur von Beschädigungen Schäftungen eingebracht werden. Ähnlich wie in der Arbeit von (Kermorgant, 2018) wird dazu ein mobiler Roboter mit einer Mikro-Positioniereinheit an der Struktur angebracht. Zur Generierung der Bearbeitungsbahn wird zunächst die Oberfläche mit einem robotergeführten Punktsensor digitalisiert. Auf Basis dieser Oberflächendaten wird die Bahn anschließend an die Ist-Geometrie angepasst. Als Mikro-Positioniereinheit wird zusätzlich eine Linearachse verwendet, mit deren Hilfe die Zustellung lokal und im Prozess angepasst werden kann. Die

echtzeitfähige Referenzierung am Bauteil während des Bearbeitungsprozesses erfolgt hierbei allerdings rein mechanisch, d.h. mit Hilfe einer Abstützung auf der Bauteiloberfläche. Dadurch kann die Roboterbewegung so geregelt werden, dass der Endeffektor einen definierten Abstand zur Oberfläche einnimmt. Diese Abstützung ist prinzipiell vergleichbar mit dem in ADMAS angedachten Konzept der lokalen Referenzierung, basiert allerdings auf einem rein mechanischen Konzept und funktioniert daher auch nur bei Bauteilen bzw. in Bauteilbereichen mit einer glatten Oberfläche ohne Störkonturen.

Insgesamt ist erkennbar, dass sich aktuelle Arbeiten meist mit Schweißanwendungen auseinandersetzen und das auch meist nur in einer Laborumgebung mit vergleichsweise kleinen Bauteilen und stark abstrahierten Anwendungsfällen. Eine echtzeitfähige und industriell einsetzbare Lösung für die betrachtete Problemstellung gibt es nicht. Forschungsarbeiten, welche die roboterbasierte Bearbeitung von Großstrukturen betrachten, gibt es vereinzelt und haben oft als Ansatz die Kinematik mechanisch mit der Großstruktur zu koppeln. Des Weiteren sind die Auswertealgorithmen zumeist auf die spezifizierten Prozesse beschränkt. Der Ansatz von ADMAS geht damit über den bestehenden Stand der Technik hinaus. So wird zum einen eine praxisnahe Umsetzung der betrachteten Prozesse angestrebt. Zum anderen bietet das Einbringen von künstlichen Markern in das Bauteil die Möglichkeit, bei deren Gestaltung verschiedene Anforderungen der Messtechnik zu berücksichtigen. So ist es z.B. möglich, wiederverwendbare Marker und damit Algorithmen zu entwickeln, die unabhängig vom Prozess einsetzbar sind. Eine geeignete Definition dieser Markierungen bzw. lokalen Referenzen kann ebenfalls die Konzeption echtzeitfähiger Algorithmen unterstützen. Dadurch kann eine signifikant höhere Genauigkeit der Fertigungsprozesse erzielt werden. Vor allem im Hinblick auf die Investitionskosten befähigt dieser Ansatz den Einsatz roboterbasierter Automatisierungslösungen, die wiederum einen deutlichen Kostenvorteil gegenüber der ansonsten in der Flugzeugproduktion oftmals angestrebten, aber sehr hochpreisigen Entwicklungen von Sonderlösungen aufweisen. Anders als bislang können durch ein solch anpassungsfähiges und intelligentes Produktionssystem die notwendige Flexibilität und die hohen Qualitätsanforderungen selbst bei geringen Stückzahlen und einer hohen Produktkomplexität erreicht werden.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Vorhaben wurde im Bereich der Anforderungsanalyse eng mit den Partnern zusammengearbeitet, insbesondere mit dem Verbundführer Airbus als Anwender und dem Fraunhofer IFAM als späterem Systemintegrator. Bei Inbetriebnahme und Test der Teiltechnologien wurde die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFAM weiter intensiviert, um die Schnittstellen des Teilsystem der 3D.aero sinnvoll testen und optimieren zu können.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1 ERGEBNISSE

Die 3D.aero war an den Entwicklungsarbeiten in den beiden Hauptarbeitspaketen HAP 1 und HAP 6 beteiligt. Im Folgenden werden die Ergebnisse gegliedert nach den Hauptarbeitspaketen und darin enthaltenen Arbeitspaketen detailliert beschrieben.

HAP 1: Einmessung und Echtzeitregelung anhand lokaler Merkmale

a) AP 1.1: Definition der Anforderungen

Ziel dieses Arbeitspakets war eine detaillierte Analyse der Fertigungsprozesse und die Ableitung der Anforderungen an das Bearbeitungssystem. Für das Sensorsystem haben sich aus der detaillierten Analyse vor allem folgende Anforderungen ergeben:

- Verwendung eines Messsystems auf Basis von Lichtschnittsensoren mit blauem Laser zur Erfassung transparenter Harzkanten

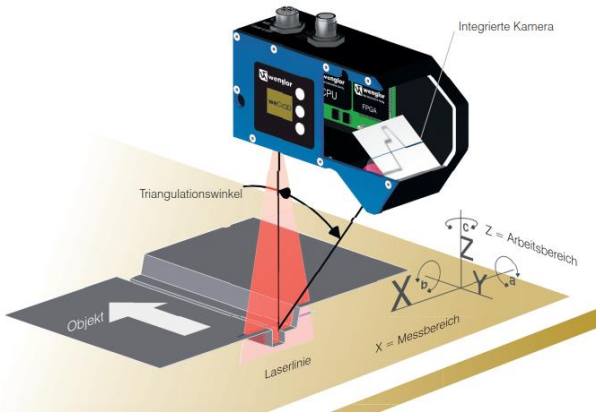


Abbildung 6: Funktionsprinzip eines Laserlichtschnittsensors (wenglor GmbH, 2023)

- Auflösung des Sensors muss Auflösung der einzelnen Flanken der Referenzkante mit mindestens 20 Datenpunkten sicherstellen (wünschenswert sind 50 Datenpunkte)
- Messung möglichst nah am TCP und hohe Messfrequenz
- Bestimmung der lokalen Abweichung in Form einer Pose: Hierbei ist zu beachten, dass bei der Verwendung eines Sensors nicht alle sechs Freiheitsgrade eindeutig bestimmt werden können. In Abbildung 7 sind schematisch drei Profilmessungen dargestellt. Die dargestellten äußeren Ebenen sind um 5° bzw. -5° zur z-Achse des Sensors (vgl. Abbildung 6) verdreht. In einer Aufnahme ist die Richtung einer solchen Verdrehung nicht erkennbar. Gleiches gilt für die Rotation um die x-Achse des Sensors. Mit einer Aufnahme können also drei Freiheitsgrade des Profils aus Sensorsicht bestimmt werden: Positionen x und z, Rotation um y.

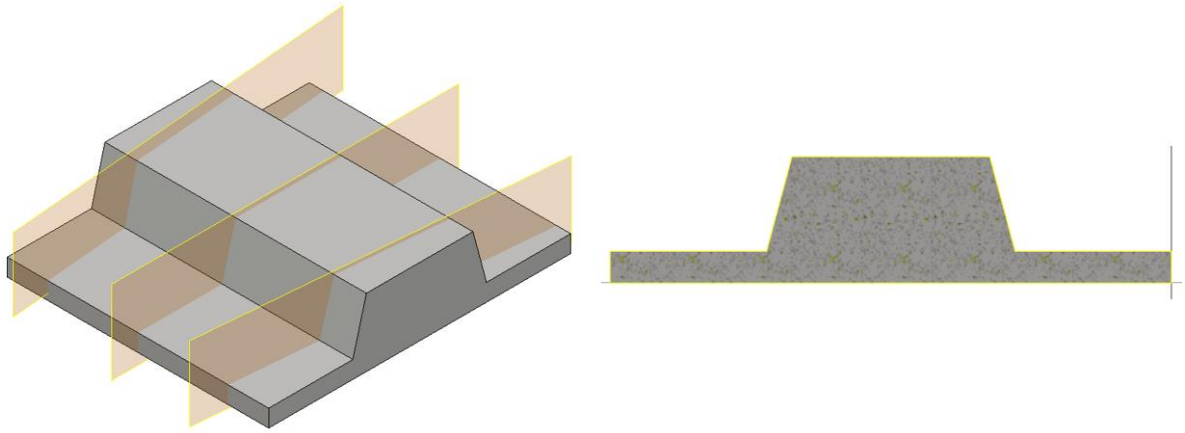


Abbildung 7: Schematische Darstellung verschiedener Posen auf die Messdaten eines Laserlichtschnittsensors

Um eine gute Messdatenqualität zu erzielen, sollten darüber hinaus folgende Anforderungen erfüllt sein. Diese Anforderungen betreffen zum Beispiel die mechanische Auslegung des Endeffektors und die Integration der Sensorik aber auch die Bahnplanung:

- Sichtachse des Sensors sollte orthogonal zur Bauteiloberfläche stehen (Abbildung 8): Begründet ist diese Forderung im verwendeten Messprinzip. Wenn die Oberfläche orthogonal zur Sensorik ausgerichtet ist, ist die Intensität de
- Messlinie sollte orthogonal zur Referenzkante stehen (Abbildung 9

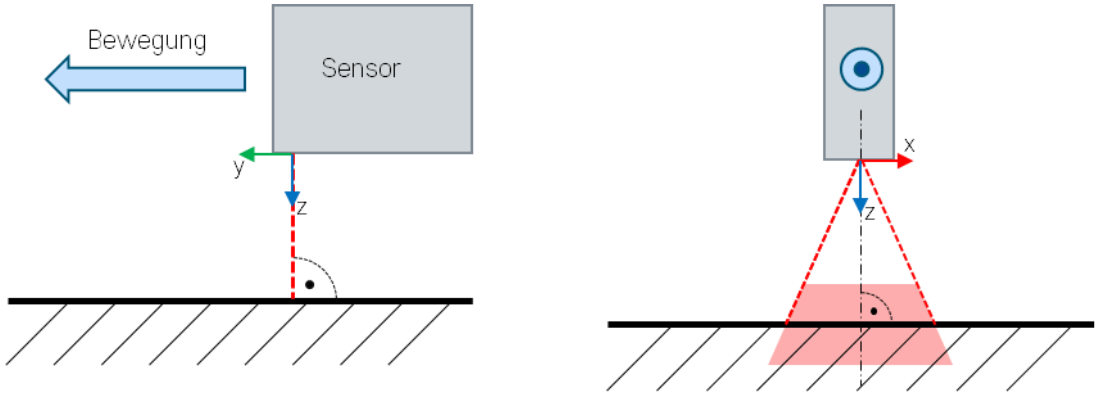


Abbildung 8: Orthogonale Ausrichtung der Sichtachse des Sensors

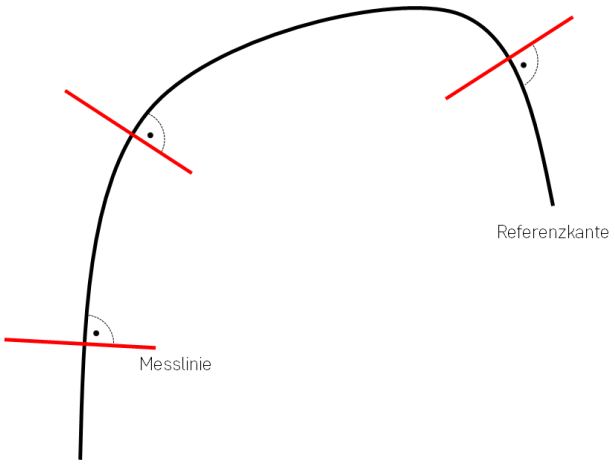


Abbildung 9: Orthogonale Ausrichtung der Messlinie zur Referenzkante

Bedingt durch die Anordnung des Fräsers und der Dosierdüse ergeben sich auch Einschränkungen und Randbedingungen zum Messbereich des Sensors:

- verfügbarer Bauraum unterhalb des Hexapods muss bei der Sensorauswahl beachtet werden
- Positionierung unterhalb des Hexapods, und Wunsch, die Bauteiloberfläche mittig im Messbereich zu positionieren, beschränken den erforderlichen Messbereich

Die beschriebenen Anforderungen an die Sensorik sind nur ein Ausschnitt der betrachteten Anforderungen an die Teilkomponenten des Gesamtsystems. Die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilsystemen wurden im Rahmen dieses Arbeitspakets diskutiert und wo notwendig Lösungsstrategien entwickelt und definiert. Ein Beispiel hierfür war die Abstimmung der notwendigen und verfügbaren Bauräume für das Messsystem und die übrigen Teilsysteme. Dies konnte nur in Abstimmung mit dem gesamten Konsortium stattfinden, da es sowohl seitens des Messsystems als natürlich auch des Fräs- und Sealingprozesses Anforderungen an notwendige Bauräume und insbesondere an die relative Positionierung des Endeffektors zum Bauteil gab. Ein weiterer zentraler Baustein für die Definition der Anforderungen war die teilweise parallel stattfindende Entwicklung von Markierungen und lokalen Referenzen. Die detaillierte Betrachtung dieser Anforderungen ist in Kap. 2.1 b) beschrieben.

b) AP 1.2: Entwicklung von Markierungen/lokalen Referenzen auf CFK-Bauteilen

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von Markierungen oder lokalen, geometrischen Merkmalen, die in die betrachteten CFK-Bauteile eingebracht werden können. Beim Sealingprozess sollte die Referenzierung an der zuvor gefrästen Bauteilkante erfolgen. Daher sind für diesen Prozess keine weiteren Merkmale entwickelt worden. Der Fokus der Arbeiten der 3D.aero wurde also darauf gelegt zu untersuchen, inwiefern die einzelnen Markierungen/lokalen Referenzen für eine echtzeitfähige und optische Erfassung und Referenzierung beim Fräsen geeignet sind. Gerade bei den vorrangig betrachteten optischen Funktionsprinzipien sind die Oberflächeneigenschaften entscheidend dafür, ob die Erfassung der Merkmale grundsätzlich und vor allem robust gelingt oder sich als problematisch darstellt. Zunächst ist dazu unter Leitung von Airbus und in Abstimmung mit den beteiligten

Projektpartnern IFAM und BCT das in Abbildung 10 schematisch dargestellte Probebauteil entstanden. Hier sind zunächst einmal die fertigungstechnischen Einschränkungen berücksichtigt worden, um eine Vielzahl an unterschiedlichen Referenzkanten und Nuten in das Bauteil einzubringen. Auch unterschiedliche Referenzkantenverläufe wurden in das Probebauteil eingebracht, um möglichst praxisnahe Tests durchführen zu können.

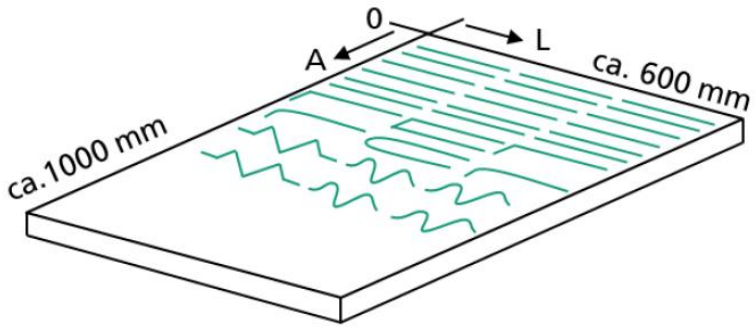


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Probebauteils (Fraunhofer IFAM, 2020)

In Abbildung 11 sind einige der unterschiedlichen Nutengeometrien dargestellt. Aus messtechnischer Sicht ist eine breite und möglichst flache Geometrie aus folgenden Gründen zu bevorzugen:

- Eine möglichst große Geometrie vereinfacht die sensorische Erfassung und erhöht durch die größere Anzahl an Messpunkten der Geometrie tendenziell die Genauigkeit der nachgelagerten Detektion der Referenzkante in den Messdaten.
- Aus sensorischer Sicht sollte die Anstellung der einzelnen Flächen zum Sensor möglichst gering sein, um die Intensität und damit die Qualität der Messdaten möglichst hoch zu halten. Auch dies wirkt sich positiv auf die Detektionsqualität der Referenzkante aus.

Referenz-Kante-Nr.:	Position A = 0-1000 mm	L = 5-195 mm	L = 205-395 mm	L = 405-595 mm
1-3	50	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=1 mm | h=1 mm	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=2 mm | h=2 mm	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=5 mm | h=2 mm
4-6	100	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=? mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°°	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°
7-9	150	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=? mm | h=2 mm (α=135°) | β=90°	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=5 mm | h=2 mm (α=135°) | β=90°	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=5 mm | h=2 mm (α=135°) | β=90°
10-12	200	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=5 mm | h=2 mm d=5 mm	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=? mm | h=2 mm (α=120°) | β=60° d=0 mm	Typ: line L=190 mm Geometrie: b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60° d=5 mm °

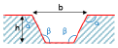
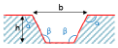
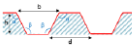
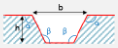
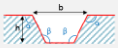
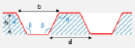
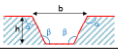
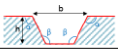
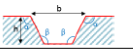
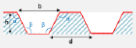
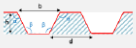
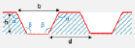
Referenz-Kante-Nr.:	Position A = 0-1000 mm	L = 5-195 mm	L = 205-395 mm	L = 405-595 mm
13-15	250	Typ: Ecke L=190 mm B=50 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°	Typ: U-Eck L=190 mm B=50 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°	Typ: Ecke L=190 mm B=50 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60° d=5 mm
16-18	350	Typ: Radius L=190 mm B=50 mm R=20 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°	Typ: U-Form L=190 mm B=50 mm R=20 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°	Typ: Radius L=190 mm B=50 mm R=20 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60° d=5 mm
19-21	450	Typ: Zacken L=190 mm B=50 mm C=50 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°	Typ: Sinus L=190 mm f(x)=25*sin(x/10) Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°	Typ: Sinus L=190 mm f(x)=25*sin(x/20) Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60°
22-24	550	Typ: Zacken L=190 mm B=50 mm C=50 mm Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60° d=5 mm	Typ: Sinus L=190 mm f(x)=25*sin(x/10) Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60° d=5 mm	Typ: Sinus L=190 mm f(x)=25*sin(x/20) Geometrie:  b=5 mm | h=2 mm (α=120°) | β=60° d=5 mm

Abbildung 11: Definition verschiedener Formen von Nuten und Kanten auf dem Probebauteil (Fraunhofer IFAM, 2020)

Aus diesen Gründen wurden für das Fräsen trapezförmige Kanten (vgl. Abbildung 12) als die sinnvollste geometrische Grundform ausgewählt, da hier anders als zum Beispiel bei quadratischen Kanten oder Nuten keine der Flächen parallel zur z-Achse des Sensors ausgerichtet ist.

Zur Bestimmung der Position der Referenzkante in der Sensordaten Roboterposition ist es notwendig, aus einer Einzelaufnahme zunächst markante Punkte zu extrahieren. Als solche markanten Punkte eignen sich insbesondere die Eckpunkte des Trapezes, bei denen zwei Bauteilkanten aufeinandertreffen und einen Winkel bilden. In die einzelnen Kanten können zum Beispiel Geradensegmente gefittet werden, um so die Schnittpunkte bestimmen zu können. Somit lassen sich bei einem Trapez theoretisch vier markante Punkte bestimmen. Um für eine algorithmische Auswertung der Kante ausreichend Messpunkte pro Kante zu erhalten, kann eine minimale Länge der Kante definiert werden. Diese hängt ab von der Auflösung des Sensors und dem Anstellwinkel der Kante zum Sensor. Unter Anwendung des Shannon-Theorems, der minimalen Anzahl an Messpunkten zur Schätzung der einzelnen Trapezflächen in den Messdaten und messtechnischen Überlegungen wurden in Abhängigkeit der Sensorauflösung minimale Trapezgrößen bestimmt. Daraus wurde der Schluss gezogen, eher flache Winkel ($\alpha = \beta \geq 45°$) anzustreben und Profilhöhen $h < 1mm$ aus sensorischer zu vermeiden. Allerdings stehen diese messtechnischen Anforderungen den Anforderungen der Fertigung und Produktion teilweise entgegen. Aus Sicht der Fertigung ist es vorteilhaft, die Referenzkanten möglichst flach auszuführen. Denn je höher eine Kante ist, desto mehr zusätzliches Material ist nötig und desto größer wird die Störgeometrie. Außerdem besteht die Gefahr, dass mit einem hohen Materialauftrag die Kante nach dem Aushärten zusammenfällt und nicht formstabil ist.

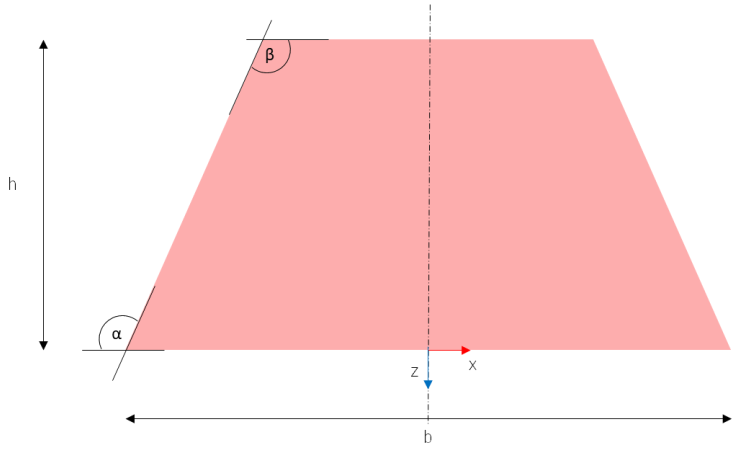


Abbildung 12: Trapezförmige Referenzkante

In Abbildung 13 ist ein resultierendes erste Probebauteil mit unterschiedlichen Profilverläufen zu erkennen. In der Nahaufnahme der Harzkante (Abbildung 13, rechts) ist zu erkennen, dass die Referenzkanten auf dem CFK-Bauteil nahezu ausschließlich aus Harz bestehen und daher eine hohe Transparenz aufweisen. Die Aufnahme ist nur kurz nach der Fertigung entstanden, danach erfolgt im Laufe der Materialalterung eine schnelle Änderung der optischen Eigenschaften der Referenzkante. Ein solch transparenter Zustand ist für den späteren Prozess zu erwarten. Die durchgeführten Versuche fanden allerdings in zeitlichem Abstand zur Herstellung statt, sodass das Bauteil andere optische Eigenschaften aufgewiesen hat. Diese Änderung der Eigenschaften hat erheblichen Einfluss auf die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf einen praxisnahen Prozess. Es ist im Rahmen einer möglichen Industrialisierung demnach empfehlenswert, die Versuche in ähnlicher Form mit gerade hergestellten Bauteilen zu wiederholen und die Änderung der optischen Eigenschaften über die Zeit an einem beispielhaften Bauteil zu dokumentieren.

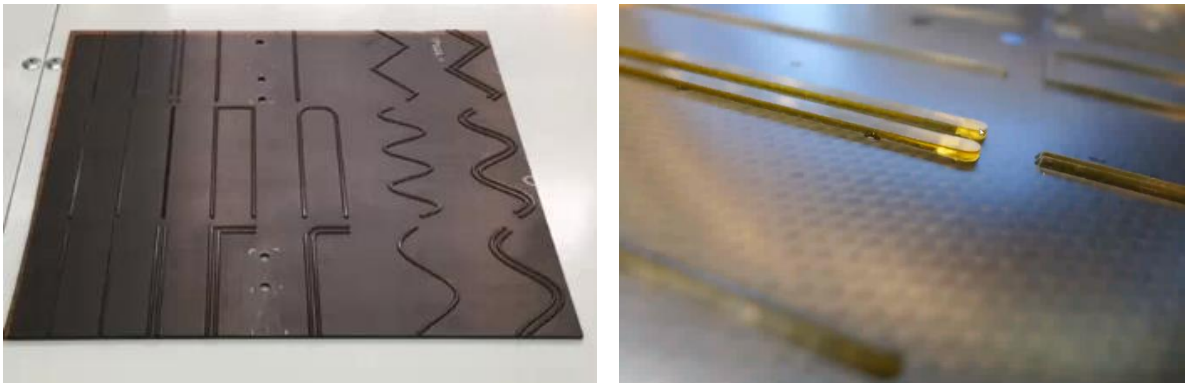


Abbildung 13: Probebauteil (links) und visueller Eindruck einer Referenzkante aus Harz kurz nach der Herstellung (rechts)

Im abgeschlossenen Projekt wurde die zunächst theoretische Entwicklung der Markierungen mit praktischen Versuchen validiert, um praktische Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Referenzkantengeometrie, Sensorausrichtung und -auflösung zu bekommen. In Abbildung 14 ist der grundlegende Versuchsaufbau dargestellt. Die verwendete Sensorik wurde für eine flexible und wiederholbare Positionierung an einem KUKA-Industrieroboter befestigt. Somit war es möglich, sowohl Einzelaufnahmen an definierten Positionen zu machen als auch eine kontinuierliche Messung der Oberflächengeometrie durchzuführen. Nach der Definition und dem Design der Probemarken für Versuche, soll mit Hilfe dieses

Aufbaus validiert werden, ob sich die entwickelten Referenzen grundsätzlich erfassen lassen und ob dies robust gelingt.

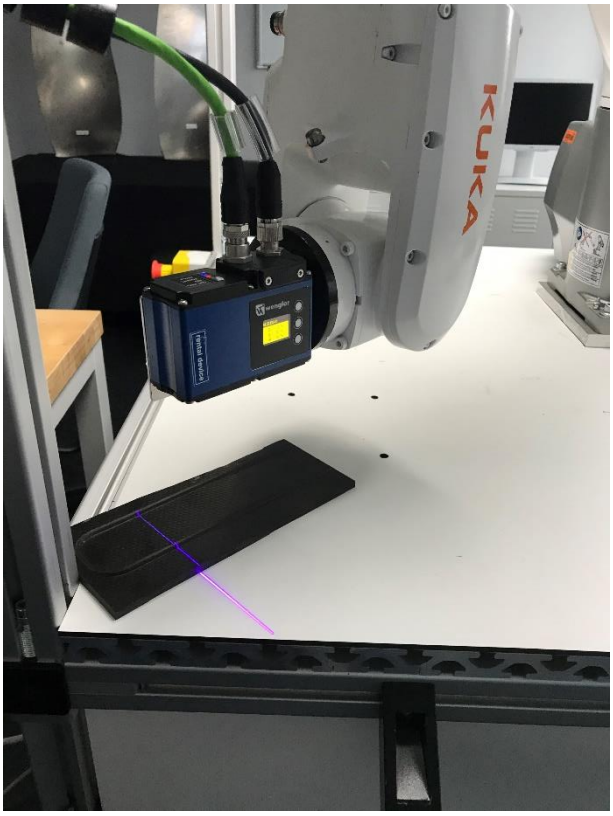


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Vermessung von Referenzgeometrien

In Abbildung 15 ist eine Einzelaufnahme einer trapezförmigen Referenzkante mit einem Laserlichtschnittsensor zu erkennen. Die hier gezeigte Aufnahme zeigt eine Referenzkante mit den Trapezwinkeln $\alpha = \beta = 45°$. Erst einmal war festzustellen, dass die ausgewählte Sensorik grundsätzlich in der Lage war, die Referenzkante zu erfassen. Ein Augenmerk lag allerdings auf den seitlichen Flächen der Referenzkante. Da diese Flächen nicht orthogonal zum Sensor ausgerichtet sind, war hier durchaus mit Problemen bei der Erfassung zu rechnen. Es hat sich gezeigt, dass die gewählte Belichtungszeit ein entscheidender Einflussfaktor auf die Robustheit der Erfassung der seitlichen Flächen ist. Mit steigender Belichtungszeit nahm die Qualität der Messwerte insbesondere an den seitlichen Flächen zu, das Rauschen in den Daten nimmt also ab. Eine Erhöhung der Belichtungszeit hat allerdings Auswirkungen auf die Auslegung des Regelkreises, da die realisierbare Messfrequenz mit höherer Belichtungszeit entsprechend sinkt. Es ist also vorteilhaft, die Trapezwinkel größer als 45° zu wählen, um höhere Abtastraten zu ermöglichen.

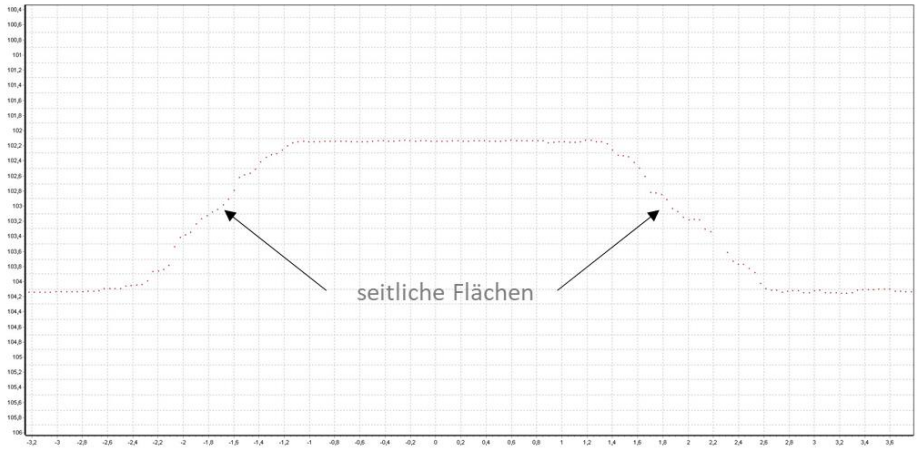


Abbildung 15: Einzelaufnahme einer Referenzkante

Dieser Effekt ist auch in Abbildung 16 noch deutlicher zu erkennen. Hier wurden mehrere Aufnahmen des in Abbildung 14 erkennbaren Bauteils mit α = β = 45° zusammengesetzt. Es ist zu erkennen, dass insbesondere an den seitlichen Flächen die Messdaten lückenhaft sind. Dies ist darin begründet, dass die seitlichen Flächen umso weniger Licht zurückwerfen, desto größer der Anstellwinkel zum Sensor wird. Auch hier zeigt sich also, dass flacher als 45° angestellte Flanken aus sensorischer Sicht vorteilhaft sind. Es wurde also im Konsortium festgelegt, dass die trapezförmigen Referenzkanten mit α = β = 60° und einer minimalen Höhe von h_{min} = 1 mm ausgeführt werden sollen.

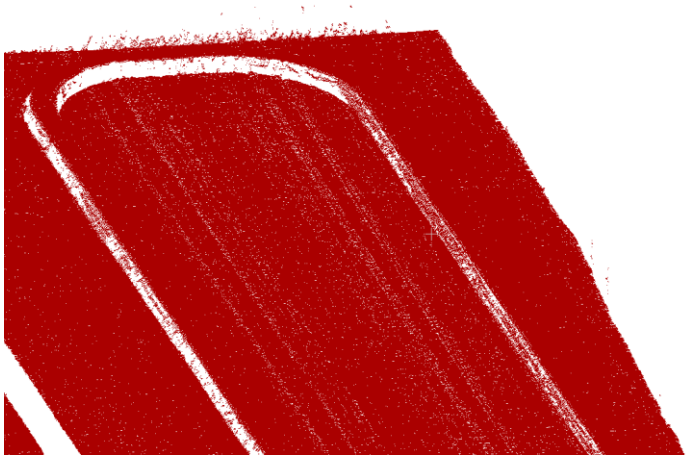


Abbildung 16: Aus Einzelaufnahmen zusammengesetzte Aufnahme eines Probebauteils

c) AP 1.6: Auswahl und Entwicklung geeigneter Messtechnik und Software zur Bildauswertung

Zunächst wurden im Rahmen von AP 1.6 drei verschiedene Sensorkonzepte ausgehend von der Verwendung von Laserlichtschnittsensoren erstellt. Diese spezifischen Messtechnikkonzepte wurden anschließend bewertet, um ihre jeweiligen Stärken und Schwächen zu analysieren und das beste Konzept für den vorgesehenen Anwendungsfall zu bestimmen. Die betrachteten Konzepte sind:

Rotierende Sensorik in V-Stellung (Konzept 1): Dieses in Abbildung 17 dargestellte Konzept nutzt zwei um die z-Achse rotierende Sensoren, die in einer V-förmigen Anordnung positioniert sind. Die Rotationsbewegung ermöglicht eine dynamische Nachführung der Messlinie zur Referenzkante. Außerdem lässt sich durch eine Anstellung der Sichtachsen und der Verwendung von zwei einzelnen Sensoren die Ausrichtung auf die Bauteilkontur anpassen (vgl. Kap. 1.5). Nachteilig sind hier der große Bauraum und der hohe Entwicklungsaufwand für die zusätzliche Rotationsachse.

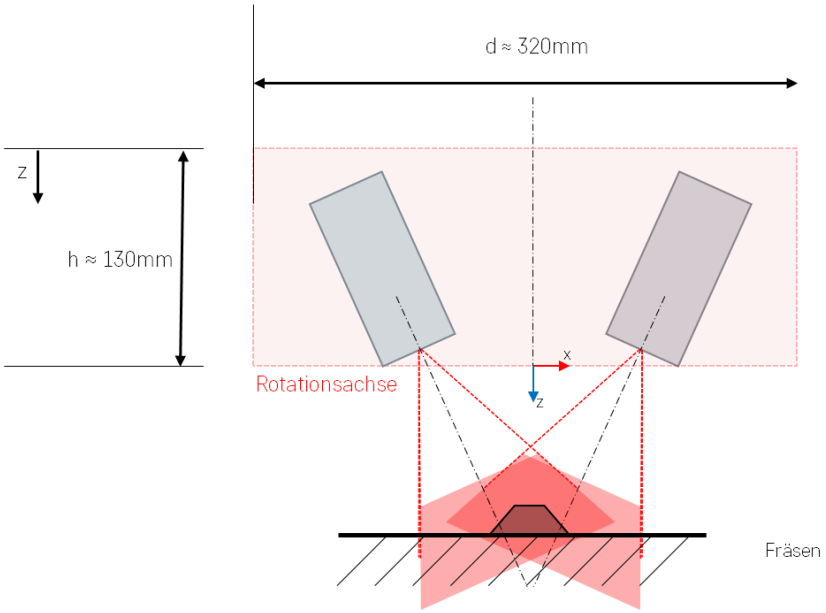


Abbildung 17: Rotierende Sensorik in V-Stellung (Konzept 1)

Feste Sensorik in V-Stellung (Konzept 2): Im Gegensatz zum ersten Konzept sind die Sensoren in diesem Fall fest in einer V-förmigen Anordnung montiert. Diese statische Positionierung könnte Vorteile in Bezug auf die Stabilität und Langlebigkeit bieten, da keine zusätzliche Rotationsachse vorhanden ist (vgl. Abbildung 18). Ein Nachteil dieses Konzepts ist der größere Bauraum, zumindest im Vergleich zu Konzept 3. Im Vergleich zu Konzept 1 ist auch eine dynamische Nachführung der Messlinie nur durch Achse 6 umsetzbar, was bei engen Kurvenradien zu einem Herauslaufen der Referenzkanten aus dem führen kann.

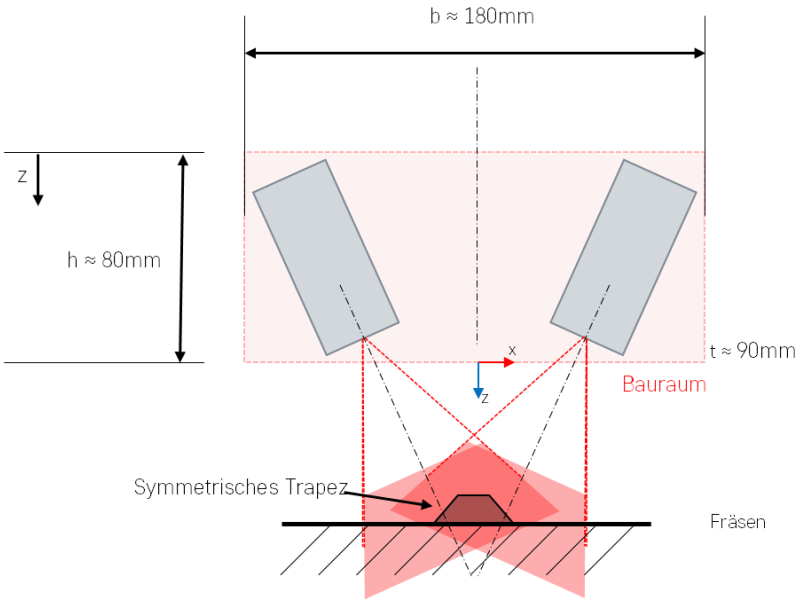


Abbildung 18: Feste Sensorik in V-Stellung (Konzept 2)

Fester Sensor (Konzept 3): Hierbei handelt es sich um ein System mit einem einzelnen, fest montierten Laserlichtschnittsensor. Dieses einfachere Konzept könnte durch seine geringere Komplexität und mögliche Kosteneffizienz attraktiv sein, allerdings sind die Messmöglichkeiten im Vergleich zu den beiden V-förmigen Anordnungen eingeschränkter. Bei diesem Konzept kann nur ein Sensor zur Oberfläche ausgerichtet werden, entsprechend den Vorversuchen muss demnach ein flacheres Profil für die Referenzkanten verwendet werden. Andernfalls wären die Messdaten lückenhaft und teilweise verrauscht, was wiederum die Berechnung der Stellgrößen für die nachfolgende Regelung negativ beeinflusst. Durch das Fehlen einer zusätzlichen Rotationsachse treten dieselben Nachteile auf wie bereits bei Konzept 2 beschrieben.

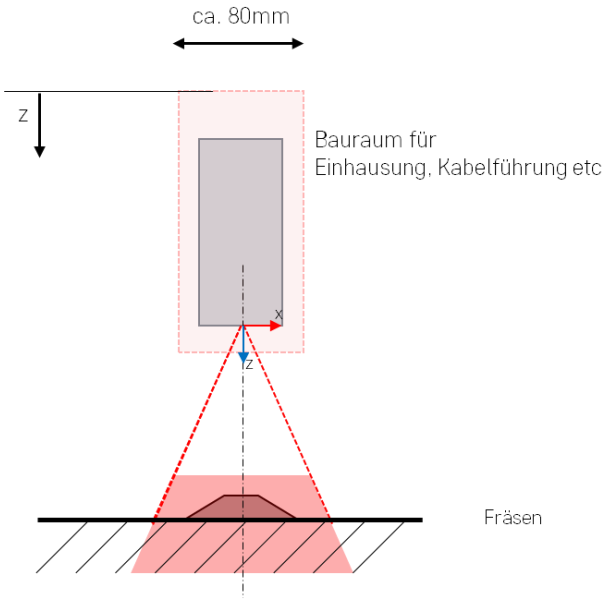


Abbildung 19: Fester Sensor (Konzept 3)

Messabdeckungsanalyse: Der größte Nachteil der Konzepte 2 und 3 gegenüber dem ersten Konzept ist das Herauslaufen der Referenzkante aus dem Messbereich. Um diesen Nachteil bewerten zu können, wurde eine Analyse der Messabdeckung für das Fräsen des Testbauteils (TP 4) durchgeführt. Hierzu wurden beispielhaft die Sensoren Wenglor MLSL132 und MLSL133 in ein Modell des Endeffektors integriert (vgl. Abbildung 20). Dieses Modell wurde dazu verwendet, um die Bereiche zu bestimmen, bei denen die Referenzkante aus dem Messfeld läuft. Dazu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Vorschubrichtung entgegen dem Uhrzeigersinn
- Kontinuierliche Fräsbewegung (auch bei Ecken)
- Referenzkante soll mittig im Sichtbereich des Sensors liegen
- Nominelle Linienbreite um 10% reduziert (Sicherheitsfaktor)

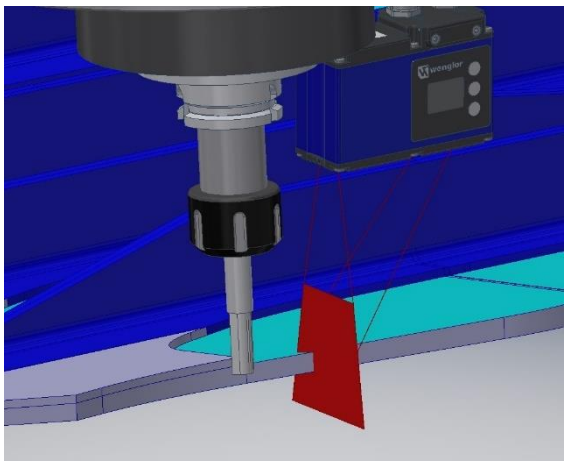


Abbildung 20: CAD-Modell mit Wenglor MLSL132 und Sensorvorlauf a = 50mm

Bei der Analyse wurden dann folgende Parameter verändert:

- Messbereich des Sensors (Wenglor MLSL132 und MLSL 133)
- Sensorvorlauf a: 25 mm, 50 mm
- Schwenkwinkel: starr (keine Rotation möglich), ±10°

In Abbildung 21 ist beispielhaft ein Ergebnis der Messabdeckungsanalyse dargestellt. Bei den grün eingefärbten Bereichen liegt kein Problem vor, die Bauteilkante befindet sich innerhalb des Messbereichs. Bei den gelben und lila markierten Kanten würde es zu einer Unterbrechung in den Messdaten kommen. Hierbei fällt auf, dass dies an Bauteilecken der Fall ist. Ein Neuansetzen des Fräsers nach einer Kante würde an diesen Stellen schon zu einer Lösung des Problems führen würden. Auch prozesstechnisch und im Hinblick auf die kinematische Umsetzung würde ein kontinuierliches Fräsen einer rechtwinkligen Ecke ein Problem darstellen.

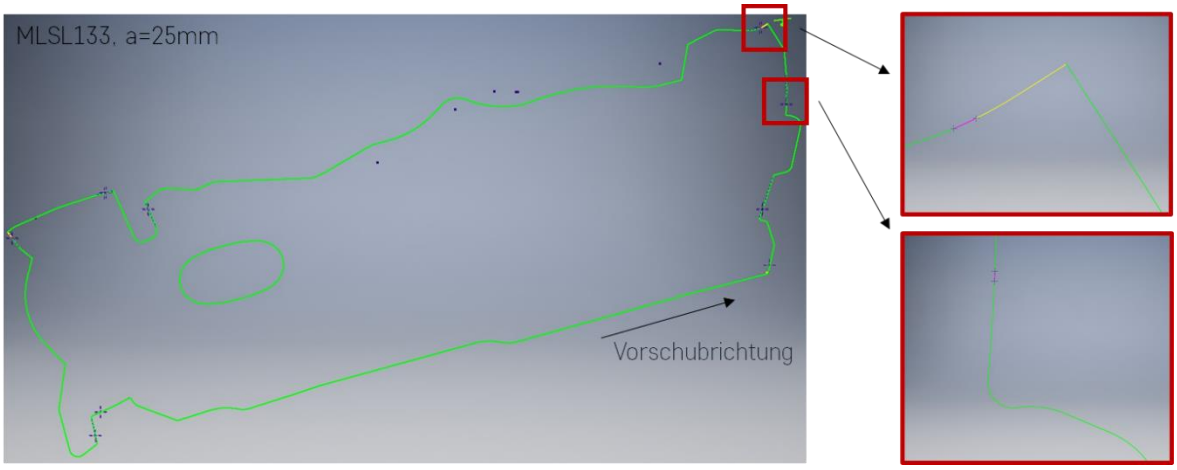


Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung der Messabdeckungsanalyse und der kritischen Stellen (Messabdeckung ca. 99%)

Die Ergebnisse der Messabdeckungsanalyse sind in Abbildung 22 dargestellt. Es ist erkennbar, dass unabhängig von den variierten Parametern immer mehr als 90% der Bauteilkante mit einem starren Sensor erfasst werden können. Bei geringem Vorlauf und größerem Messfeld kann dieser Wert auf bis zu 99% ansteigen.

	MLSL 132				MLSL 133	
Sensorvorlauf a [mm]	50	25	50	25	50	25
Schwenkwinkel [°]	starr	starr	+/- 10°	+/- 10°	starr	starr
Messabdeckung [%]	90,9	98,2	94,7	99,2	95,8	99

Abbildung 22: Ergebnisse der Messabdeckungsanalyse

Eine Messabdeckung von über 90% wird für diese Anwendung als ausreichend betrachtet, da sie ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Erfassungsgenauigkeit und Ressourcenaufwand bietet. Eine Steigerung der Messabdeckung deutlich über 90% hinaus würde durch die Entwicklung einer Zusatzachse zu einem unverhältnismäßig hohen Anstieg der Kosten und des Aufwands führen. Der Nutzen für die Messgenauigkeit ist hingegen nur geringfügig. Die letzten Prozentpunkte der Abdeckung sind also mit erheblichen technischen und finanziellen Investitionen verbunden, ohne dass ein proportionaler Gewinn an Informationsgehalt erzielt werden könnte. Außerdem kann mit einer Messabdeckung von über 90% gewährleistet werden, dass das System nur an speziellen Stellen keine Informationen liefert, sodass die Analyse des Gesamtsystems trotzdem fundiert erfolgen kann. Als letzter Punkt sei hier noch die Bauraumbeschränkung angeführt, welche die Integration einer Zusatzachse in den Endeffektor technisch unmöglich gemacht hat. Die Rotation des Sensors um die z-Achse kann zumindest im Fräsprozess durch die sechste Achse des Roboters umgesetzt werden. Außerdem wurde sich im Konsortium darauf verständigt, die Flanken der Referenzgeometrien auf $\alpha = \beta = 60°$ abzuflachen, sodass auch bei einem Sensor eine gute Ausrichtung der Sensorik zur Oberfläche erzielt werden kann. Insgesamt wurde damit die **Auswahl von Konzept 3** als die sinnvollste Lösung für den betrachteten Anwendungsfall ausgewählt und weiterverfolgt.

Sensorauswahl: Im nächsten Schritt wurde die Sensorauswahl detaillierter betrachtet. Hierzu wurden mit unterschiedlichen Sensoren weitere Testmessungen durchgeführt. Unter anderem sind dabei die Sensoren Wenglor MLSL132 und MLSL 133, P+F LineRunner sowie

microEpsilon 2910-100 und 2910-50/BL getestet worden. Hierbei konnte festgestellt werden, dass aufgrund der Transparenz der Harzkanten die Sensoren mit blauem Laser deutlich bessere Ergebnisse geliefert haben als die Sensoren mit rotem Laser.

Neben der Farbe des Sensors war auch die notwendige Einbauhöhe ein entscheidendes Kriterium bei der Sensorauswahl. In Abbildung 23 ist hier beispielhaft die Position des Messfeldes bei Einbau der Sensorik Wenglor MLWL131 und microEpsilon 3000-50/BL neben der Frässpindel eingezeichnet. Beide Sensoren sind vergleichbar, weisen eine nahezu identische Auflösung auf und sind jeweils mit blauem Laser verfügbar. Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass der Messbereich des Wenglor-Sensors deutlich oberhalb des Fräserendes liegt, wohingegen der microEpsilon-Sensor den Messbereich unterhalb der Fräserendes hat. Die Referenzkante wird im späteren Fräsprozess natürlich oberhalb des Fräserendes liegen. Eine Verwendung des hier dargestellten microEpsilon-Sensors ist demnach bei den dargestellten konstruktiven Randbedingungen nicht möglich.

Darüber hinaus war es möglich, mit den Wenglor-Sensoren eine geringere Belichtungszeit zu verwenden als bei vergleichbaren microEpsilon-Sensoren. Dies ist für die spätere Integration in den Regelkreis vorteilhaft, dass die Belichtungszeit ein maßgeblicher Einflussfaktor auf die Messfrequenz und damit die Frequenz ist, in der der Regelkreis mit neuen Stellgrößen versorgt wird.

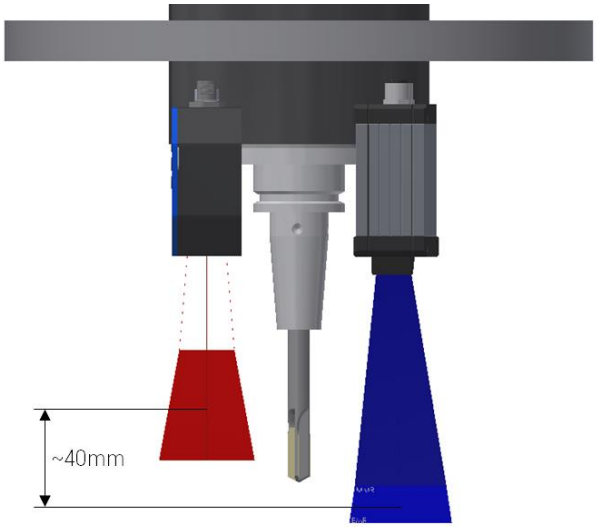


Abbildung 23: Vergleich der notwendigen Einbauhöhe zwischen Wenglor MLWL131 (links) und microEpsilon 3000-50/BL (rechts)

Ausgewählt wurden schließlich zwei verschiedene Sensoren der Firma Wenglor für das Fräsen und das Sealing (s. Abbildung 24). Der Sensor MLWL 131 wurde für die Integration in den Fräsendeffektor vorgesehen. Er weist eine höhere Auflösung und kleineren Messbereich auf, um so möglichst kleine Referenzkanten erfassen zu können. Die kompakte Bauform ermöglicht einen geringen Abstand zum TCP des Fräsers. Für das Sealing wurde ein MLSL 133 mit etwas geringerer Auflösung und dafür größerem Messbereich ausgewählt. Diese beiden Sensoren wurden im Rahmen des Förderprojekts durch die 3D.aero beschafft und im Rahmen von HAP 6 in das Gesamtsystem integriert.

	MLWL 131	MLSL 133
Arbeitsbereich Z	70 - 130 mm	90 - 280 mm
Auflösung Z	2 – 4,9 µm	9,4 – 49 µm
Messbereich X	30 - 52 mm	62 - 145 mm
Auflösung X	17 – 26 µm	54 – 123 µm
Lichtart	Laser (blau)	Laser (blau)
Messpunkte	>2000	1280

Abbildung 24: Spezifikation der ausgewählten Wenglor-Sensoren

d) AP 1.7: Entwicklung des Echtzeit-Regelkreises

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die notwendigen Softwarebausteine zu entwickeln und zu implementieren. In Abbildung 25 ist eine Übersicht zu den Schnittstellen zwischen den einzelnen Systembausteinen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Sensor zwei Schnittstellen zum Softwaremodul der 3D.aero hat. Hier ist zum einen eine Prozesskommunikation implementiert, über die der Sensor konfiguriert werden kann. Zum anderen ist eine zweite Schnittstelle zum Empfang der Messdaten implementiert. Beide Schnittstellen sind in einem Softwaretreiber integriert. Da der Empfang der Messdaten zwingend echtzeitfähig sein muss, wurde entschieden, auch die nicht notwendigerweise echtzeitfähige Konfiguration des Sensors in diesen echtzeitfähigen Treiber zu integrieren. Um die Echtzeitanforderungen erfüllen zu können, wird in Abstimmung mit den Projektpartner EtherCAT als Kommunikationsschnittstelle verwendet.

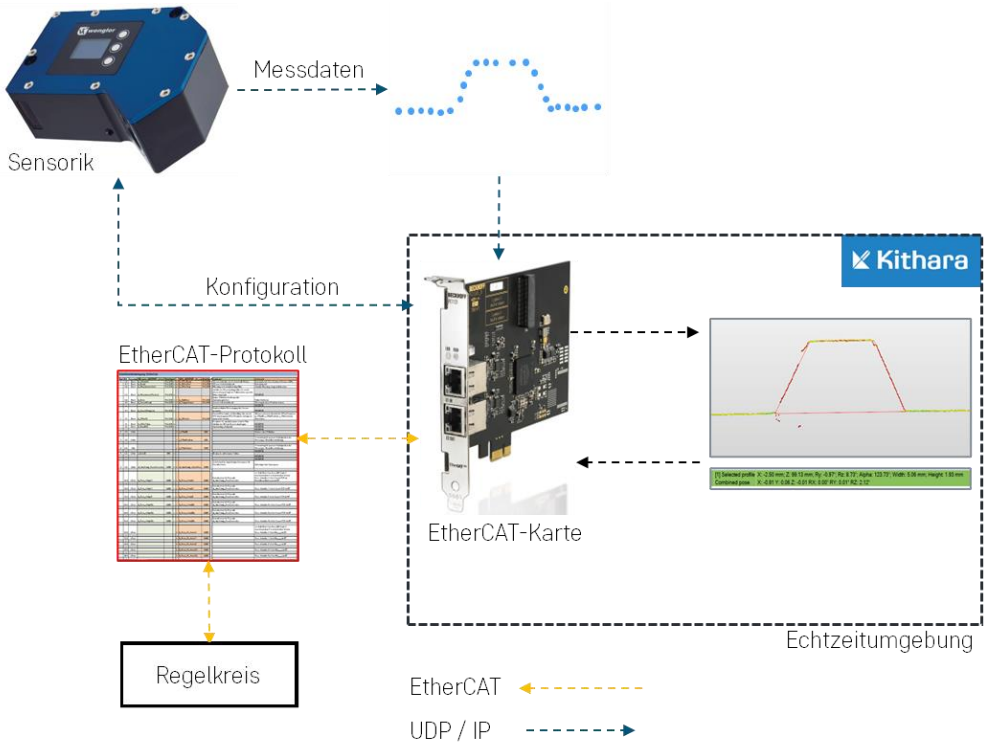


Abbildung 25: Übersicht zu den Schnittstellen zwischen den einzelnen Systembausteinen

Neben der Sensorik wurde im Rahmen des Projekts auch die entsprechende Hardware für die Integration der Softwarebausteine beschafft. Dazu zählt neben einem Industrie-PC eine

EtherCAT-Karte der Firma Beckhoff und die notwendigen Elektrokleinteile wie zum Beispiel Anschlusskabel für die Sensorik.

Softwareseitig wurde zur Umsetzung der echtzeitfähigen Softwaremodule Kithara ausgewählt. Kithara ist ein modulares Echtzeitbetriebssystem für Windows und unterstützt auch die echtzeitfähige Kommunikation über EtherCAT. Für die Umsetzung der Prozesskommunikation zwischen dem Regelkreis und der Echtzeitumgebung wurden zunächst folgende Unterprozesse definiert:

- Messung starten
- Messung stoppen
- Sensorverbindung trennen
- Fehler

Für jeden dieser Unterprozesse wurde dann ein Kommunikationsablauf zwischen der Echtzeitumgebung und dem Regelkreis definiert. In Abbildung 26 ist beispielhaft für diese verschiedenen Unterprozesse der Ablauf zum Start einer Messung dargestellt. In grün hinterlegt sind die seitens 3D.aero gesetzten Variablen. In orange hinterlegt ist die jeweilige Antwort der seitens des IFAM implementierten Prozesssteuerung. Die einzelnen Prozessabläufe für die vier Unterprozesse wurden beidseitig implementiert und erfolgreich getestet.

Messung starten				
3D.aero_OUTPUT (SPS_INPUT)		**SPS_OUTPUT** (3D.aero_INPUT)	**WERT**	**KOMMENTAR**
Sensor eingewechselt				
b_Ready	→		HIGH	3D.aero Software initialisiert
	←	b_CPlanSet	LOW	
	←	i_CPlanID	1	Beispiel für Prozess "Fräsen der Außenkontur"
	←	i_CPlanVariant	0	Default = 0, bei Bedarf erweitern
	←	i_CPlanPosition	0	Default = 0, bei Bedarf erweitern
	←	b_CPlanSet	HIGH	
b_SensorReady	→		HIGH	Sensor ist bereit
b_CPlanTaken	→		HIGH	
	←	b_CPlanSet	LOW	
b_CPlanTaken	→		LOW	
b_CPlanID	→		1	
b_CPlanOK	→		HIGH	
	←	i_CPlanID	0	
	←	b_CPlanStart	HIGH	Messung starten
Messung gestartet				
b_MeasurementActive	→		HIGH	
	←	b_CPlanStart	LOW	
b_CPlanOK	→		LOW	Folge von MeasurementActive

Abbildung 26: Prozessablauf für den Start einer Messung

Außerdem wurde eine einheitliche Koordinaten- und Drehkonvention definiert, um die Position und Orientierung der detektierten Referenzgeometrie einheitlich übertragen und für die Regelung korrekt verwerten zu können. In Abbildung 27 ist die Koordinatendefinition schematisch dargestellt. Wir zu erkennen ist, wird die ermittelte Pose der Referenzgeometrie relativ zum Sensorkoordinatensystem beschrieben. Als Nullpunkt der Harzkante wird ein Koordinatensystem am Fuß des Trapezes verwendet. So kann die Pose der Harzkante aus Sensorsicht über drei translatorische und drei rotatorische Werte eindeutig beschrieben werden. Dabei sind die y-Position sowie die Rotationen um die x-Achse und z-Achse standardmäßig null, da diese Werte nicht eindeutig aus den Messdaten bestimmt werden können.

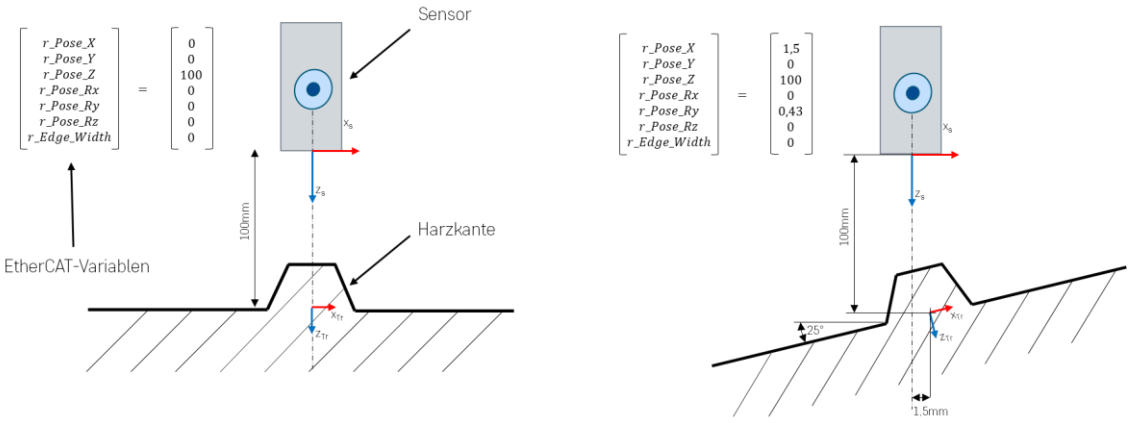


Abbildung 27: Definition der Koordinatensysteme und beispielhafte EtherCAT-Variablen zur Bestimmung der Referenzgeometrie für zwei verschiedene relative Posen der trapezförmigen Harzkante zum Sensor

Durch die Auswahl der Echtzeitumgebung und Kombination mit einem industriellen Feldbus wurde der Grundstein für eine robuste und leistungsfähige Integration der Messtechnik gelegt.

Nach der Definition der einzelnen Schnittstellen wurden die notwendigen Softwaremodule für die Aufnahme und Auswertung der Sensordaten implementiert. In Abbildung 28 ist beispielhaft ein Screenshot der Extraktion eines Trapezes in einer Aufnahme des Sensors MLWL131 dargestellt. Auf Basis der Punktewolke wurden die einzelnen Parameter des Trapezmodells in Bezug zum Koordinatensystem des Sensors (vgl. Abbildung 12) berechnet:

- *x* x-Translation des trapezförmigen Referenzprofils
- *z* z-Translation des trapezförmigen Referenzprofils
- *Ry* y-Rotation des trapezförmigen Referenzprofils
- *Rz* z-Rotation des trapezförmigen Referenzprofils
- *Alpha* Trapezwinkel α
- *Width* Trapezbreite b
- *Height* Trapezhöhe h

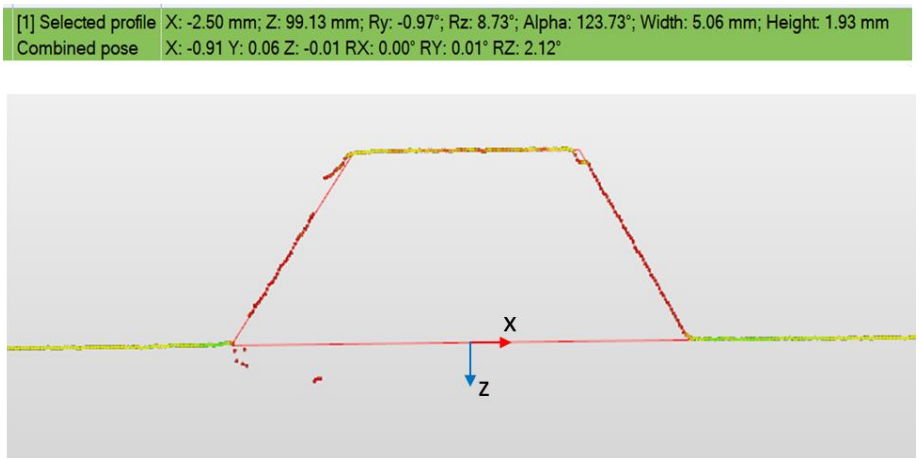


Abbildung 28: Ergebnis der Auswertung der Messdaten einer trapezförmigen Referenzprofils und Abweichung zu den vorgegebenen Soll-Werten

Neben der echtzeitfähigen Auswertung der Messdaten wurde auch der Abruf der Messdaten in der Echtzeitumgebung implementiert, sodass ein voll funktionsfähiges und echtzeitfähiges

Softwaremodul entstanden ist, das im nun folgenden HAP 6 in die idealisierte Arbeitsumgebung integriert werden konnte.

HAP 6: Integration und Validierung in idealisierter Arbeitsumgebung

e) AP 6.2: Inbetriebnahme und Test von Teiltechnologien

Zum Test des in AP 1.7 entwickelten Softwaremoduls wurde zunächst interner Versuchsaufbau umgesetzt. Dieser Aufbau ist in Abbildung 29 dargestellt. Für diesen Zweck wurde der Laserlichtschnittsensor an einem Franka Emika Roboter befestigt, sodass eine definierte Bewegung und Positionierung des Sensors zum Bauteil möglich waren.

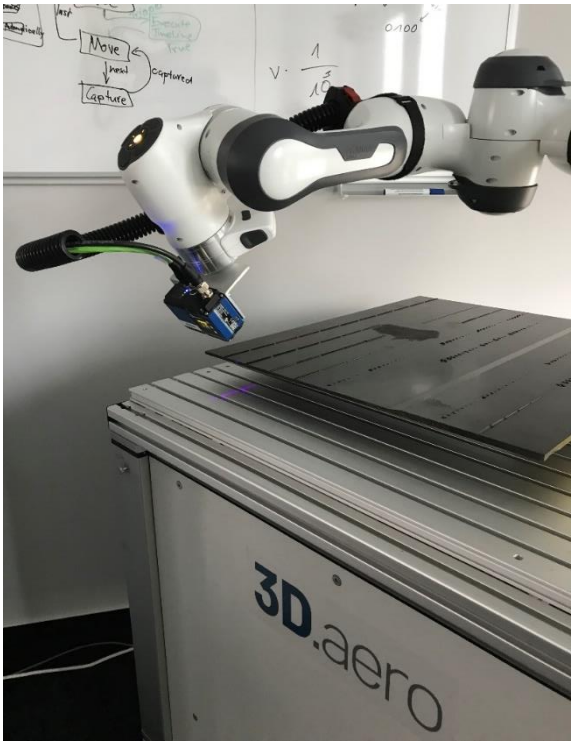


Abbildung 29: Versuchsaufbau mit robotergeführtem Laserlichtschnittsensor und Probebauteil

Des Weiteren wurde mit dem *Sensor Display* eine grafische Benutzeroberfläche implementiert, die unter anderem die eine Live-Anzeige der Messdatenauswertung enthält und das das Starten und Stoppen einer Messung ermöglicht. Die Messdatenauswertung und Anzeige im *Sensor Display* ist, wie in Abbildung 30 dargestellt, für rechtwinklige Kanten umgesetzt. Hier wird zum einen der Winkel der theoretisch rechtwinkligen Kante (*Alpha*) ausgegeben, dazu die Rotation um die y-Achse des Sensors *Ry* sowie die beiden translatorischen Verschiebungen des Eckpunktes der Kante im Sensorkoordinatensystem *TX* und *TZ*. Wie in Abbildung 30 zu erkennen ist, wertet das Softwaremodul die Sensordaten aus und gibt alle detektierten, rechtwinkligen Ecken zurück. Wenn mehrere Ecken detektiert werden, wird standardmäßig die Ecke mit der geringsten translatorischen Verschiebung als die gesuchte Ecke ausgewählt und zurückgegeben.

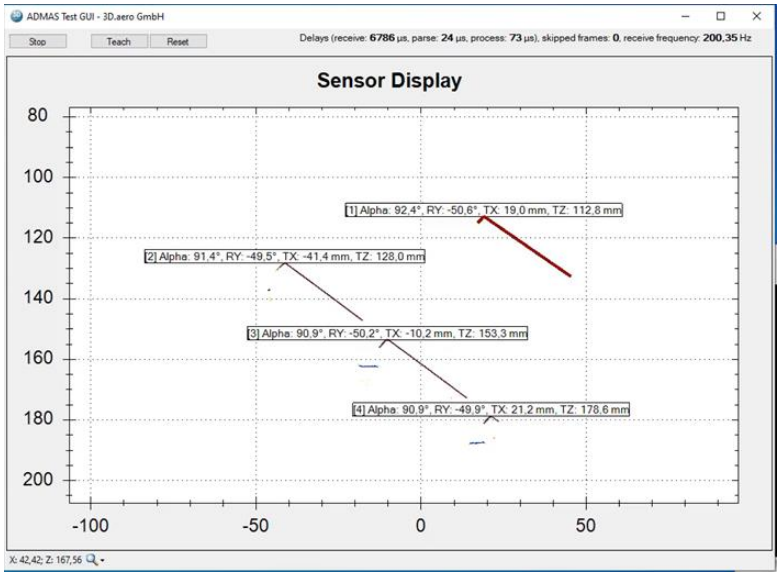


Abbildung 30: Screenshot der GUI der Echtzeit-Anwendung während der Detektion einer rechtwinkligen Referenzkante

Abbildung 31 zeigt einen Screenshot der Live-Auswertung für eine trapezförmige Referenzkante des Probebauteils. Auf Basis des dargestellten Versuchsaufbaus und der implementierten GUI konnten die grundlegende Funktionalität und auch die Anforderungen an die Auswertezeiten der implementierten Softwarebausteine erfolgreich validiert werden. Daher wurde im nächsten Schritt die Teiltechnologie in einer ersten Testumgebung am Fraunhofer IFAM getestet.

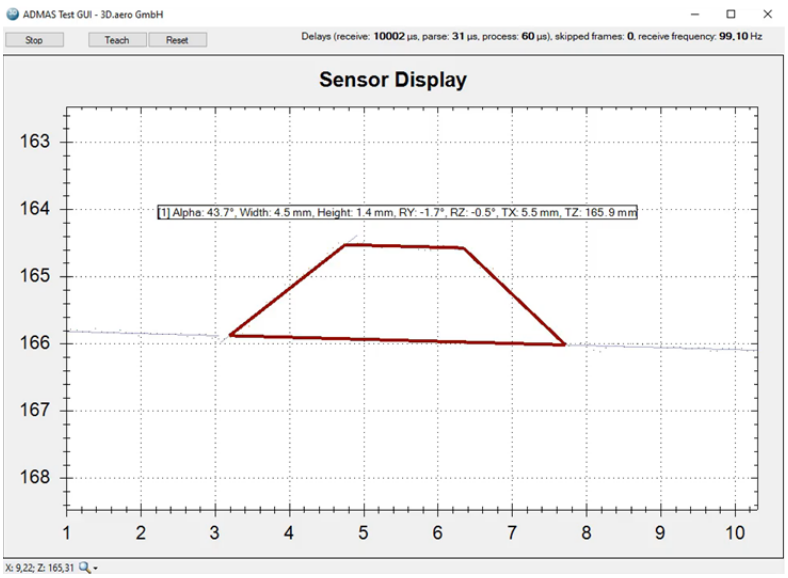


Abbildung 31: Screenshot der GUI der Echtzeit-Anwendung während der Detektion einer trapezförmigen Referenzkante

In Abbildung 32 ist dieser erste Aufbau der Messtechnik in der Testumgebung zu sehen. Hierzu wurde die Sensorik zunächst ohne den vorgesehenen Hexapod am Roboterflansch befestigt. Um erste Tests mit der Sensorik in ähnlicher Roboterkonfiguration durchführen zu können, wie mit integriertem Hexapod, wurde ein entsprechendes Verbindungsstück

zwischen Roboterflansch und Sensor eingebaut. Auf Basis dieses Setups konnte die Funktionsfähigkeit der entwickelten Messtechnik getestet werden.

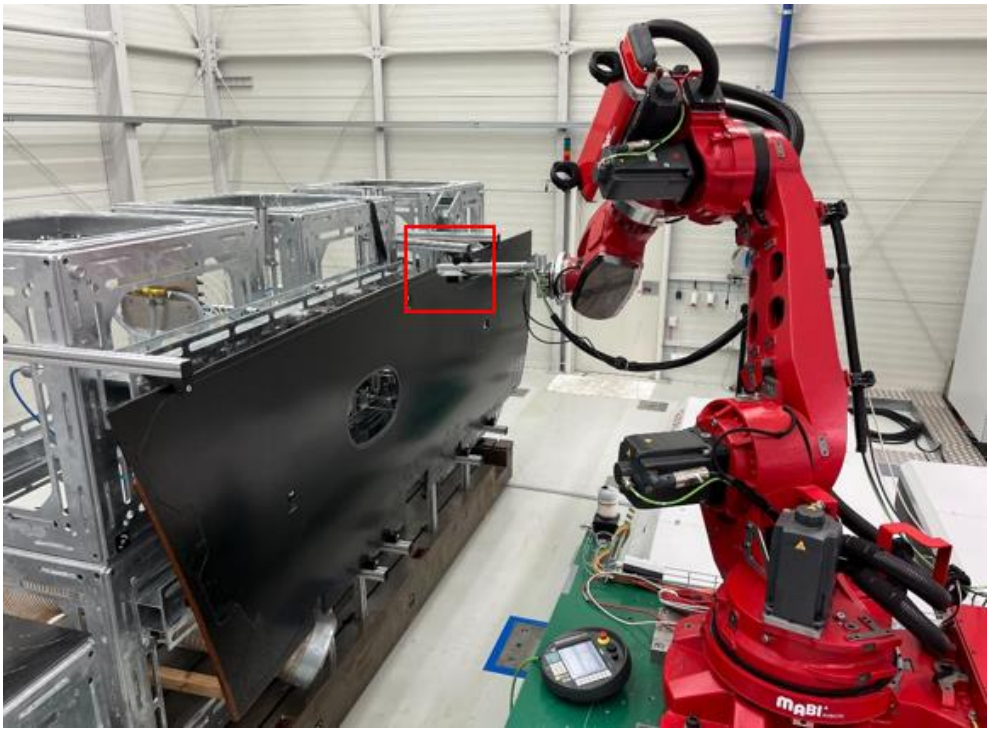


Abbildung 32: Inbetriebnahme und erste Tests der Messtechnik in der Testumgebung

Neben der Position der Bauteilkante für den Sealing-Prozess hat sich im Verlauf der ersten Versuche herausgestellt, dass insbesondere für diesen Prozess auch eine Information über die aktuell lokal vorliegende Bauteildicke für eine optimierte Prozesssteuerung notwendig ist. Daher wurde der in Abbildung 33 abgebildete Versuchsaufbau definiert, um zu untersuchen, ob die Bauteildicke mit der aktuellen Sensorkonfiguration in ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann. Der Sensor MLSL133 der Fa Wenglor, der für die Kantendetektion während des Sealing-Prozesses verwendet werden soll, wurde dazu an einem Hexapod befestigt. Im Sichtbereich des Sensors befindet sich ein Ausschnitt eines Probebauteils mit einer entsprechenden Bauteilkante. Der Sensor ist dabei in etwa 45° zur relevanten Fläche für die Dickenmessung ausgerichtet. Diese Ausrichtung entspricht der Sensorausrichtung im späteren Sealing-Prozess. Mit Hilfe des Hexapods kann der Sensor nun entlang der Bauteilkante bewegt werden. Diese Bewegung wurde mehrfach wiederholt und dabei die Messdaten ausgewertet.

Abbildung 33: Versuchsaufbau zur Bauteildickenmessung

In Abbildung 34 ist die Auswertung für eine von diesen Messfahrten dargestellt. Über den Verfahrweg ist die ermittelte Bauteildicke (y-Achse) für jede Messlinie einzeln aufgetragen. Über die einzelnen Dickenwerte wurde ein Mittelwert gebildet, in diesem Fall liegt er bei 12,48 mm mit einer Standardabweichung von 0,12 mm. Diese Werte konnten bei weiteren Messfahrten reproduziert werden. Die gleiche Bauteildicke wurde manuell mit einem Messschieber vermessen. Hierbei wurden an verschiedenen Stellen der Kanten Dicken von 12,5-12,8 mm ermittelt.

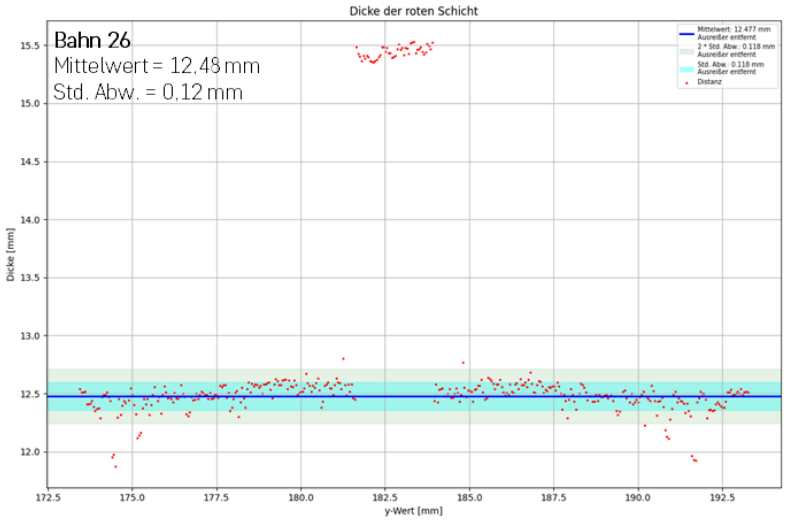


Abbildung 34: Auswertung der Bauteildicke bei einer Messfahrt

Als Ergebnis dieses Versuchs wurde festgehalten, dass mit der vorliegenden Sensorkonfiguration eine für den Anwendungsfall ausreichend robuste und genaue Bauteildickenmessung umsetzbar ist.

f) AP 6.3: Integration der Teilkomponenten zum Gesamtsystem

Nach der Inbetriebnahme der Teiltechnologien wurde die Messtechnik unter Leitung des IFAM mit den anderen Teilkomponenten mechanisch, elektrisch und softwareseitig in das

Gesamtsystem integriert. Hierzu wurden seitens der 3D.aero zwei Sensoren vom Typ Wenglor MLSL133 und MLWL131 sowie die notwendigen Anschlussleitungen bis zur Werkzeugkupplung beigestellt. Die beiden Endeffektoren für den Sealing- und den Fräsprozess sind in Abbildung 35 mit der jeweils integrierten Sensorik dargestellt.

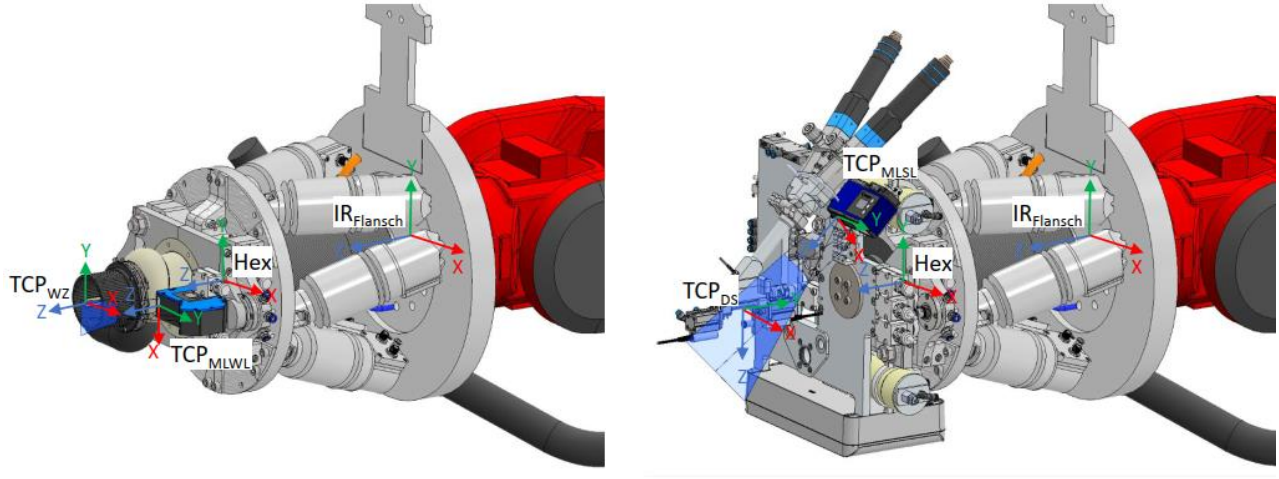


Abbildung 35: Integration der Sensorik in den Endeffektor für den Fräsprozess (links) und Sealing-Endeffektor (rechts) (Fraunhofer IFAM, 2023)

In Abbildung 36 ist beispielhaft der am Fräs-Endeffektor integrierte Sensor vom Typ MLWL131 zu erkennen. Auch ein Industrie-PC mit integrierter EtherCAT-Karte der Fa. Beckhoff wurde in die IT-Infrastruktur des Gesamtsystems eingebracht. Auf diesem PC läuft die Software zur Messdatenaufnahme und -auswertung in einer Kithara-Echtzeitumgebung.

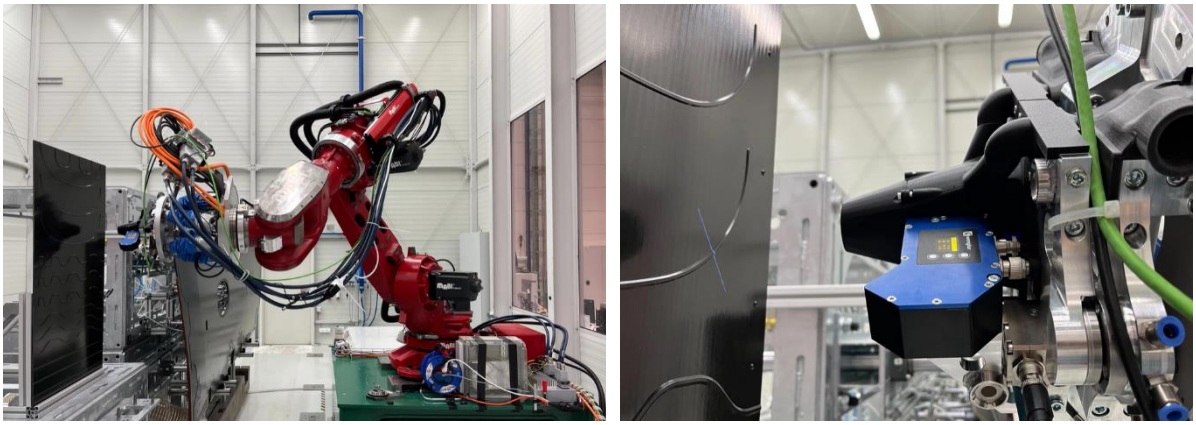


Abbildung 36: Mechanische Integration der Sensorik Wenglor MLWL131 am Endeffektor für den Fräsprozess

Somit konnten die einzelnen Prozessabläufe für die vier im Rahmen von AP 1.7 definierten Unterprozesse beidseitig getestet werden. Hierbei wurde die EtherCAT-Schnittstelle zur Übermittlung der Referenzkante um einen weiteren Wert ergänzt. Als siebter Wert neben den notwendigen Variablen zur Beschreibung einer trapezförmigen oder rechteckigen Referenzkante wurde noch die Breite der Fräskante als EtherCAT-Variable eingeführt (vgl. Kap. 2.1 d) und den Variablen hinzugefügt. Im Falle der trapezförmigen Harzkante wurde dieser Werte als null definiert, da er nur beim Sealing-Prozess auf Basis der rechtwinkligen Fräskante ermittelt werden muss.

g) AP 6.4: Inbetriebnahme und Optimierung des Gesamtsystems

Nach der erfolgreichen Integration konnte die Messtechnik im Gesamtsystems in Betrieb genommen und getestet werden. Dazu wurde der Sensor in zwei Versuchsanordnungen entlang einer trapezförmigen Referenzkante bewegt, um die Robustheit der Kantenerkennung zu überprüfen.

Im ersten Versuch wurde die Sensorik ausschließlich mit Hilfe eines Roboters bewegt, um längere Bewegungen und Laufzeiten der Software zu ermöglichen. Dabei wurden einige Bugs entdeckt, die die Stabilität der Software beeinträchtigten. Diese Bugs wurden anschließend behoben.

In einem zweiten Versuch wurde der Sensor ausschließlich durch den Hexapod bewegt, um schnelle und präzise Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen zu ermöglichen. Abbildung 37 zeigt schematisch den Ablauf einer solchen Testmessung von der Harzkante über die zusammengesetzten Messdaten hin zu den ausgewerteten x- und z-Positionen.

Hierbei ist zu erkennen, dass die Sensorik in der Lage ist, durchgängige Messdaten von der flachen, trapezförmigen Referenzkante (α = β = 60°) zu erzeugen. Anders als bei den ersten Versuchen mit steileren Trapezflanken (α = β = 45°) treten hier keine Lücken in den Messdaten auf. Basierend auf diesen Messdaten wird für jede Einzelmessung die Position des Trapezes relativ zum Sensorkoordinatensystem bestimmt. In Abbildung 37 sind die x-Position und die z-Position geplottet. In beiden Koordinaten ist jeweils ein leichter Anstieg zu erkennen. Bei der x-Koordinate von -11,7 auf -10,4 mm. In z-Richtung von 99,1 mm auf 101,7 mm. Beide Positionsänderungen sind linear und mit der linearen Bewegung des Sensors entlang der Referenzkante zu erklären. Sowohl die Sensorbewegung als auch die Referenzkante sind nicht perfekt parallel zum Koordinatensystem des Sensors ausgerichtet.

Des Weiteren fällt auf, dass die x-Positionen stärker verrauscht sind als die z-Positionen. Das liegt daran, dass zur Bestimmung der z-Position die gesamte Messlinie verwendet werden kann, einschließlich der Bereiche seitlich der Referenzkante Dadurch liegen der Berechnung mehr und weiter auseinanderliegende Punkte zugrunde, was die Fehler beim Fitting einer Geraden zur Bestimmung der Bauteiloberfläche reduziert. Zudem gibt es weniger Defekte oder Beschädigungen auf der Bauteiloberfläche als auf den Flanken und an den Übergängen des trapezförmigen Referenzprofils. Besonders die leicht beschädigten Kanten des Profils (blaue Bereiche in den Messdaten) beeinträchtigen die Qualität der Kantenextraktion zur Bestimmung des Trapezes negativ.

Insgesamt konnte jedoch festgestellt werden, dass die Messtechnik robust funktioniert und auch qualitativ gute Ergebnisse liefert.

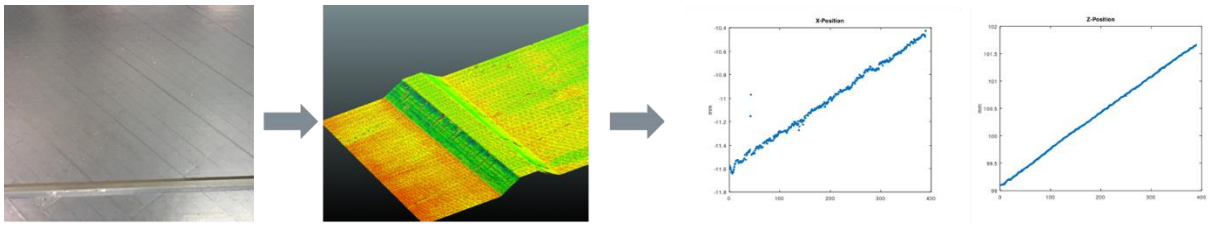


Abbildung 37: Schematischer Ablauf der Testmessungen zur Bestimmung der Referenzkante

Im nächsten Schritt wurden diese linearen Bahnen mit verschiedenen Schwingungen überlagert. Die Schwingungen werden durch den Hexapod erzeugt und sind dadurch

hochgenau einstellbar. Durch diesen Versuch sollte ermittelt werden, ob die detektierten Schwingungsamplituden in der x-Position der Referenzkante mit den Amplituden des Hexpoden korrelieren. Auch die Frequenz der Schwingung wurde von 0,2 bis 10 Hz moduliert, um die Abtastrate der Kantendetektion zu überprüfen. In Abbildung 38 sind die Ergebnisse eines Versuchs beispielhaft dargestellt. Hier wurde der Hexapod mit einer Frequenz von 0,3 Hz angeregt. Es ist zu erkennen, dass die in Realität gerade Harzkante aus Sensorsicht bei schwingendem Hexapod genau wie die detektierte x-Position mitschwingt. Insgesamt wurde bei verschiedenen Schwingfrequenzen eine sehr gute Übereinstimmung mit den detektierten Schwingungen in der x-Position festgestellt.

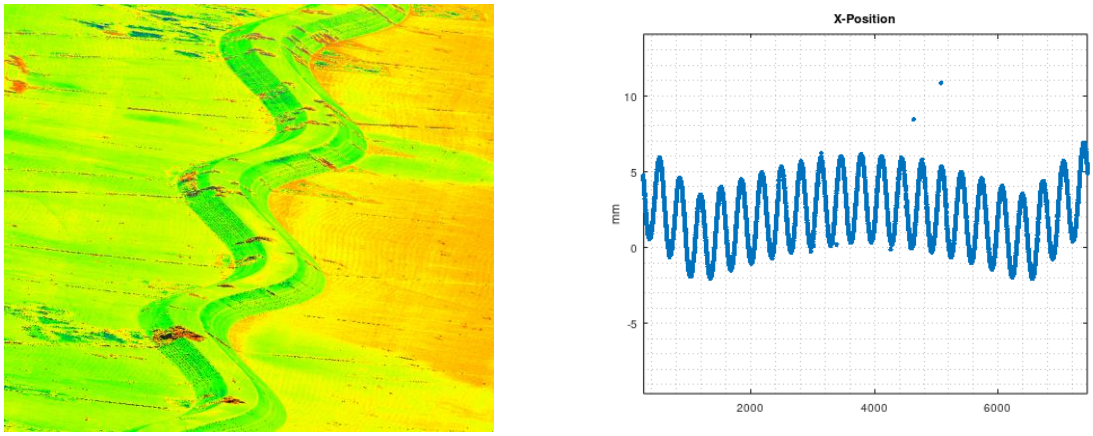


Abbildung 38: Testmessungen mit schwingendem Hexapod: Messdaten (links) und Auswertung der entsprechenden x-Position des Trapezes (rechts)

In Abbildung 39 ist eine zweite Auswertung dieser Versuchsreihe dargestellt. Hier wurde der Sensor der Abstand des Sensors zum Bauteil zunächst sukzessive vergrößert und der Sensor an der Referenzkante entlanggeführt. Die zweite Hälfte der Trajektorie ist die Rückfahrt zum Ausgangspunkt mit derselben Bahn. Dies ist an den Messdaten und auch an der Symmetrie in den ausgewerteten Messdaten zu erkennen. In den Messdaten sind zwei Bereiche rot markiert. Durch die Hin- und Rückfahrt handelt es sich auf dem Bauteil tatsächlich um denselben Bereich. In diesem Bereich liegen einige kleine Beschädigungen an der Harzkante vor. Diese Beschädigungen tauchen so auch wiederholbar in den Messdaten auf. Das zeigt, dass die gewählten Einstellungen zu guten Ergebnissen führen und es sich nicht um statistische Fehler in den Messdaten handelt. Auch in der Auswertung von Trapezbreite sowie -höhe und der ermittelten x-Position sind diese beiden rot markierten Bereiche deutlich verrauschter als die übrigen Bereiche der erfassten Referenzkante. Lediglich die extrahierte z-Position zeigt bei beschädigter Referenzkante keine signifikante Erhöhung des Rauschens. Dies ist, wie schon erwähnt, mit der höheren Unabhängigkeit dieser Auswertung von der Trapezgeometrie zu erklären. Insbesondere die Bestimmung der Trapezbreite ist anfällig im Falle kleiner Beschädigungen. Um hier zu vermeiden, dass ungültige Ergebnisse an den Regelkreis übergeben werden, wurde in die Schnittstelle ein binärer Wert eingefügt. Dieser Wert beschreibt die Gültigkeit der Ergebnisse und wird entsprechend auf 0 gesetzt, wenn in einer Aufnahme kein gültiges Trapez erkannt wurde. Dies kann zum Beispiel in Bereich mit großflächigen Beschädigungen der Referenzkante vorkommen oder auch dann, wenn die Referenzkante nicht mehr im Sichtbereich der Sensorik liegen sollte.

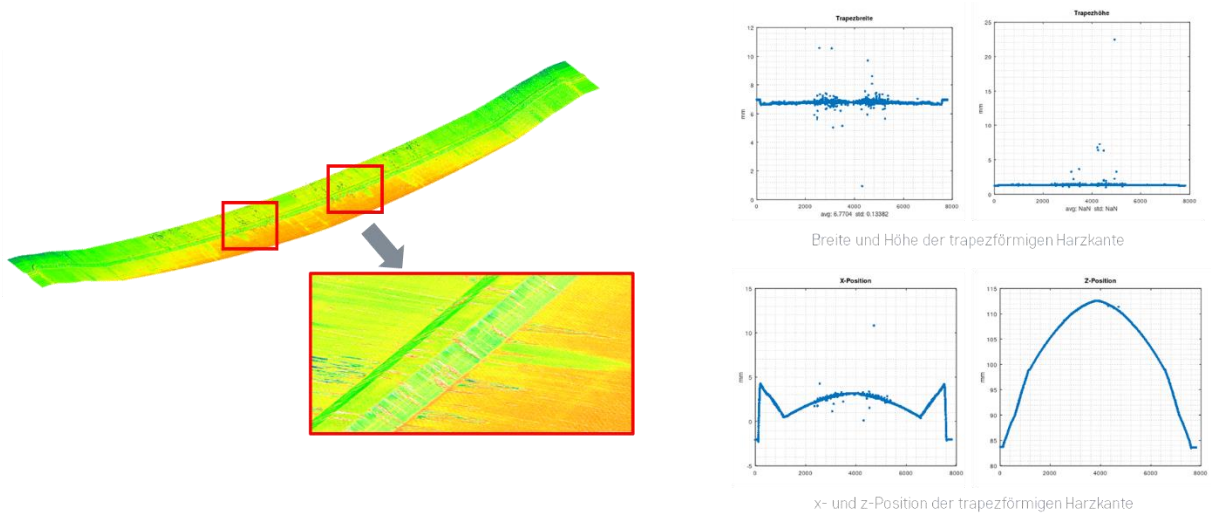


Abbildung 39: Testmessung mit Änderung des z-Abstands mit Darstellung der Messdaten (links) und der Auswertung von Trapezbreite und -höhe (rechts oben) sowie der x- und z-Position des Trapezes

Insgesamt haben diese Versuche gezeigt, dass die Messtechnik funktionsfähig ist. Es wurden noch kleinere Anpassung an der Software gemacht, um die Robustheit des Gesamtsystem noch weiter zu verbessern.

h) AP 6.5: Validierung des Gesamtsystems

Die Ergebnisse eines ersten Versuchs zur Validierung des Gesamtsystems sind in Abbildung 40 und Abbildung 41 dargestellt. Hierzu wurde die Sensorik roboterbasiert entlang einer längs verlaufenden Harzkante des Bauteils TP4 verfahren. Die Positionsregelung durch den Hexapoden auf Basis der Kantendetektion ist bei diesem Versuch noch nicht aktiv gewesen.

In den folgenden Abbildungen sind die Werte der EtherCAT-Variablen *r_Pose_X* und *r_Pose_Z* über dem zeitlichen Verlauf dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Abstand von 120 mm auf 80 mm, also um insgesamt 40 mm abnimmt. Anschließend steigt er fast sprunghaft wieder auf knapp 130mm an. Vorgabewert für die Bahnplanung ist die Mitte des Messfeldes des Sensors MLWL131, um bei Abweichungen der Bauteilgeometrie nicht aus dem Messbereich zu laufen. Die Mitte des Messbereichs liegt beim Sensor MLWL131 bei z = 100 mm. Das Messfeld hat eine maximale z-Tiefe von 60 mm. Das aufgespannte Bauteil passt also noch in den Messbereich. Allerdings können leichte Änderungen zum Beispiel in der Aufspannung dazuführen, dass der Abstand zwischen Sensor und Bauteil 130 mm übersteigt und das Bauteil damit aus dem Sichtfeld der Sensorik läuft. Dieser Fall ist im späteren Prozess zu vermeiden. Die Bauteilverformung von etwa 50 mm in z-Richtung des Sensors liegt bei 60 mm Messtiefe des Sensors also fast an den Grenzen des Sichtbereiches.

Der Verlauf des Abstands vom Sensor zum Bauteil, also *r_Pose_Z*, deutet darauf hin, dass das Bauteil TP4 verformt ist, denn bei der Offline-Programmierung der Roboterbahn wurde der Abstand zwischen Sensor und Bauteiloberfläche relativ konstant gehalten. Um Fehler bei der Auswertung ausschließen zu können, wurde die Bauteilgeometrie durch das IFAM überprüft und eine entsprechende Verformung festgestellt. Es lag also kein Fehler bei der Auswertung der Messdaten vor. Grund für die Verformung des Bauteils war die Anbringung des Bauteils an den einzelnen Befestigungspunkten der Bauteilaufnahme.

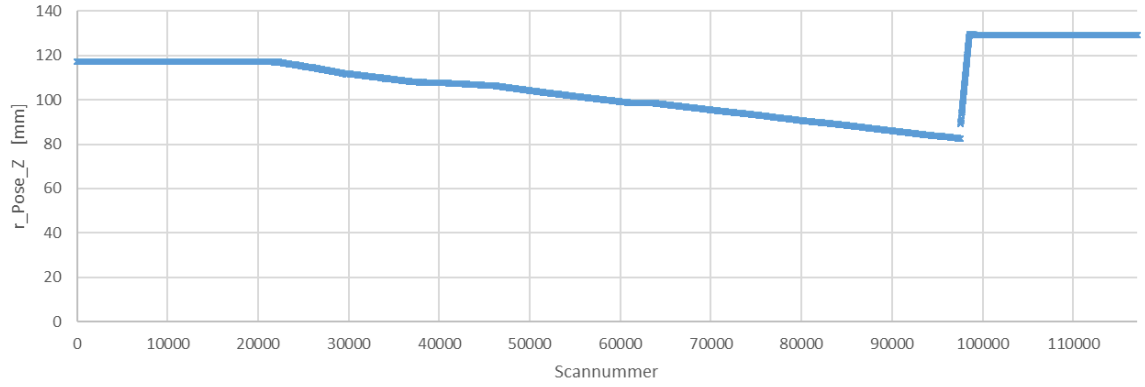


Abbildung 40: z-Abstand der Harzkante des TP4 zum Sensorkoordinatensystem

In Abbildung 41 ist der seitliche Versatz der Harzkante zur Mitte des Sensors dargestellt. Als Ziel für die Bahnplanung wurde ein Wert von *r_Pose_X* vorgegeben, damit die Harzkante auch bei Abweichungen der tatsächlichen Bauteilgeometrie zum Modell nicht aus dem Sichtbereich des Sensors läuft. Abweichungen der Bauteilgeometrie können dabei durch die Aufspannung oder auch aufgrund von Fertigungstoleranzen entstehen. Wie zu erkennen ist, schwankt die Position der Harzkante zwischen +5 mm und -0,5 mm. Dies ist im Hinblick auf die spätere Prozessstabilität als gut zu bewerten, da die Grenzen des Messbereiches in x-Richtung bei ±15mm liegen.

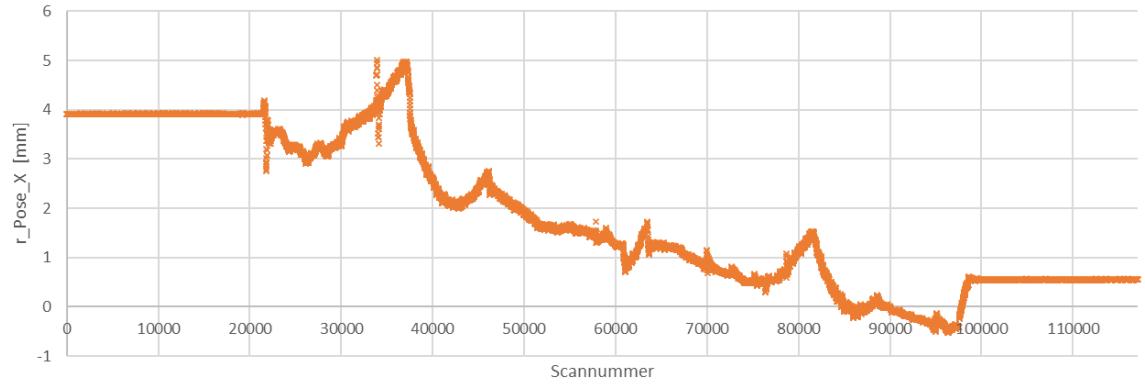


Abbildung 41: x-Position der Harzkante des TP4 im Sensorkoordinatensystem

Um die dynamischen Eigenschaften des Systems validieren zu können, wurde im Rahmen der Inbetriebnahme des Gesamtsystems der Hexapod in einem Frequenzbereich von 0,2 Hz bis 10 Hz angeregt. Dabei wurde die Soll-Position des Hexapods, in dem Fall der z-Abstand zum Werkstück, und die gemessene Ist-Amplitude des Sensors, auch der z-Abstand zum Werkstück, aufgezeichnet, um sie daraufhin vergleichen zu können. Es wurde erwartet, dass die Amplitudenverläufe Soll-Hexapod und Ist-Sensor nahezu deckungsgleich sind. Eine genaue Übereinstimmung der Soll- und Ist-Amplitudenverläufe ist ein Indikator für die korrekte Funktion des Systems. Abweichungen können auf Probleme in der Systemsteuerung, mechanische Defekte oder fehlerhafte Sensoren hinweisen.

In Abbildung 42 sind zwei beispielhafte Amplitudenverläufe für verschiedene Anregungsfrequenzen abgebildet. Es ist ersichtlich, dass es signifikante Unterschiede zwischen der Soll-Position des Hexapods und der gemessenen Ist-Amplitude des Sensors gibt. So wurde bei diesen und weiteren Versuchen wiederholbar ein zeitlicher Versatz von

50 ms zwischen der Soll-Position des Hexapods und der nachlaufenden Ist-Position des Sensors festgestellt. Dass deutet darauf hin, dass die Reaktion des Sensors um 50 ms verzögert ist im Vergleich zur Soll-Vorgabe des Hexapods. Weiterhin zeigten die Messungen unterschiedliche Amplitudenverläufe in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz des Systems. Bei Frequenzen unter 4 Hz war die Amplitude des Sensors stets größer als die Amplitude der Soll-Position des Hexapods. Dies deutet darauf hin, dass das System bei niedrigeren Frequenzen stärker ausschwingt als erwartet. Im Gegensatz dazu wurde bei Frequenzen über 4 Hz beobachtet, dass die Amplitude des Sensors geringer war als die Amplitude der Soll-Position des Hexapods. Diese Diskrepanz kann auf ein unzureichendes dynamisches Verhalten des Systems bei höheren Frequenzen hinweisen, möglicherweise verursacht durch Dämpfungseffekte oder eine ungenügende Reaktionsgeschwindigkeit der mechanischen Komponenten.

Diese Beobachtungen sind wichtig für die Optimierung des Gesamtsystems. Der zeitliche Versatz von 50 ms muss durch Anpassungen in der Systemsteuerung oder der Sensorik korrigiert werden, um eine synchronisierte Bewegung zu gewährleisten. Die unterschiedlichen Amplitudenverläufe bei verschiedenen Frequenzen erfordern eine detaillierte Analyse der Systemdynamik, um die Ursache der Abweichungen zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung der Systemleistung zu ergreifen. Daher wurden weitere Versuche geplant und zusätzlich ein Lasertracker zur Positionsbestimmung integriert, um die einzelnen Effekte für das gezeigte Verhalten gezielt ermitteln und anschließend beseitigen zu können.

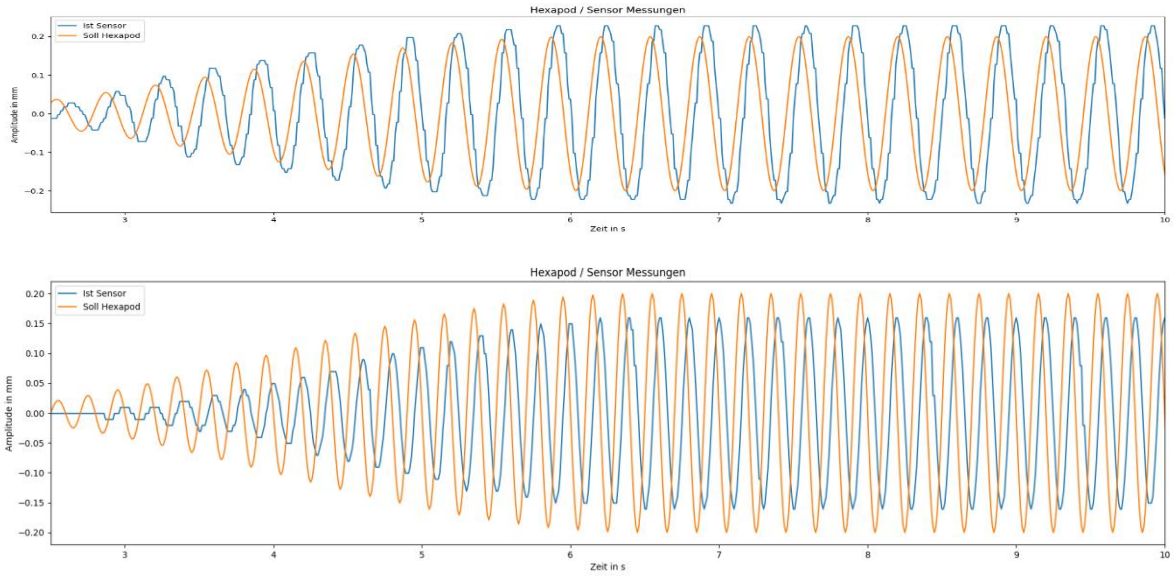


Abbildung 42: Beispielhafte Amplitudenverläufe Soll Hexapod und Ist Sensor für unterschiedliche Bewegungsfrequenzen des Hexapoden (Fraunhofer IFAM, 2024)

Zunächst wurde im Detail analysiert, welche Aspekte den zeitlichen Versatz zwischen den Amplitudenverläufen beeinflussen könnten. Aus dieser Analyse haben sich folgende wesentliche Punkte und Verbesserungen ergeben:

1. **Datenaufnahme und Verarbeitung im Sensor inkl. Belichtungszeit**: Erhöhung der Messfrequenz auf 200 Hz durch Optimierung von Belichtungszeit und ROI des Sensors
2. **Empfangen, Einlesen und Auswerten der Messdaten in Echtzeitumgebung:** Zur Bestimmung der gesamten Verarbeitungszeit wurde eine Timing-Funktion in der Software implementiert. Die gesamte Verarbeitung der Messdaten dauert weniger als

1 ms und hat damit keinen signifikanten Einfluss auf den Zeitversatz. Außerdem wurde eine Verbesserung des TCP-Pufferhandlings implementiert, um die Dauer für das Empfangen und Einlesen der Messdaten zu optimieren. Allerdings hat sich daraus keine weitere Verbesserung ergeben. Der Empfang und die Übermittlung der Datenpakete ist aufgrund der hohen Sensorauflösung und damit Datengröße ein Bottleneck und als wesentlicher Einflussfaktor auch nach der Optimierung zu nennen. Um hier eine signifikante Verbesserung zu erzielen und die Menge an übermittelten Informationen zu verringern, müsste die Datenauswertung bereits auf dem Sensor stattfinden. Eine solche Auswertung der Daten auf dem Sensor setzt allerdings Zugriff und Änderung der Sensorfirmware voraus. Das war im Rahmen des abgelaufenen Projekts nicht möglich, sollte aber im Rahmen einer potenziellen Industrialisierung des Systems umgesetzt werden.

3. **Datenübermittlung von Echtzeitumgebung an Regelkreis:** Um eventuelle Probleme festzustellen, wurde im Rahmen eines Softwareupdates eine zusätzliche Funktion eingebaut, mit der die Zeit zur Übermittlung eines Datenpakets vom Regelkreis zur Echtzeitumgebung und wieder zurück bestimmt werden kann. Hierbei konnte kein signifikanter Delay festgestellt werden.
4. **Empfangen und Einlesen der Daten durch den Regelkreis:** Dieser Punkt wurde untersucht und hatte keinen wesentlichen Einfluss auf den Zeitversatz.
5. **Zustellzeit Hexapod von SOLL zu IST:** Um die Zustellzeit des Hexapod zu bestimmen wurde ein Lasertracker verwendet und so ein Zeitversatz von 12 ms festgestellt.
6. **Verzögerung und Amplitudenversatz durch mechanische Effekte:** Bei Messungen mit dem Lasertracker hat sich gezeigt, dass die Hexapodbewegung den Industrieroboter anregt und der Roboter daher ebenfalls schwingt. Durch die Schwingungen des Roboters ließen sich die Unterschiede in den Amplitudenhöhen erklären. Um hier für eine höhere Steifigkeit zu sorgen, wurden die Bremsen des Roboters bei den weiteren Versuchen aktiviert. So konnte die Systemnachgiebigkeit deutlich verringert werden.

Nach diesen Optimierungen wurden die Versuche noch einmal wiederholt, um den Einfluss der Verbesserungen validieren zu können. In Abbildung 43 ist das Ergebnis nach dieser Optimierung dargestellt. Die Messungen zeigten, dass der Amplitudenversatz zwischen dem Lasertracker und dem Sensor kleiner als 0,1 mm ist. Dies zeigt noch einmal, dass der Versatz in den Vorversuchen durch die Schwingungen des Roboters zustande gekommen ist. Die geringe Abweichung bestätigt die hohe Präzision beider Messsysteme und ihre Fähigkeit, die Bewegungen des Robotersystems nahezu identisch zu erfassen. Ein solch geringer Versatz liegt innerhalb der gesetzten Toleranzgrenzen für und unterstreicht die Zuverlässigkeit der entwickelten Messtechnik. Die zeitliche Stabilität der Messungen ist ein weiterer wichtiger Aspekt der Systemkalibrierung. Die Messungen zeigten, dass der Versatz zwischen dem Sensor und dem Lasertracker nun stabil bei etwa 20 ms liegt. Die Optimierungen haben also dazu geführt, den ursprünglichen Versatz signifikant zu verringern. Die Konstanz des Zeitversatzes ist entscheidend für die Synchronisation der Datenströme beider Systeme sowie für die Regelung der Hexapodbewegung bei den Bearbeitungsprozessen.

Durch eine sorgfältige Analyse und Anpassung des Gesamtsystems konnten die Ursachen für die Abweichungen also identifiziert und behoben werden, um so die gewünschte und erwartete Übereinstimmung der Amplitudenverläufe zu erreichen. Das bestätigt die Eignung der Messtechniken für präzise Robotikanwendungen.

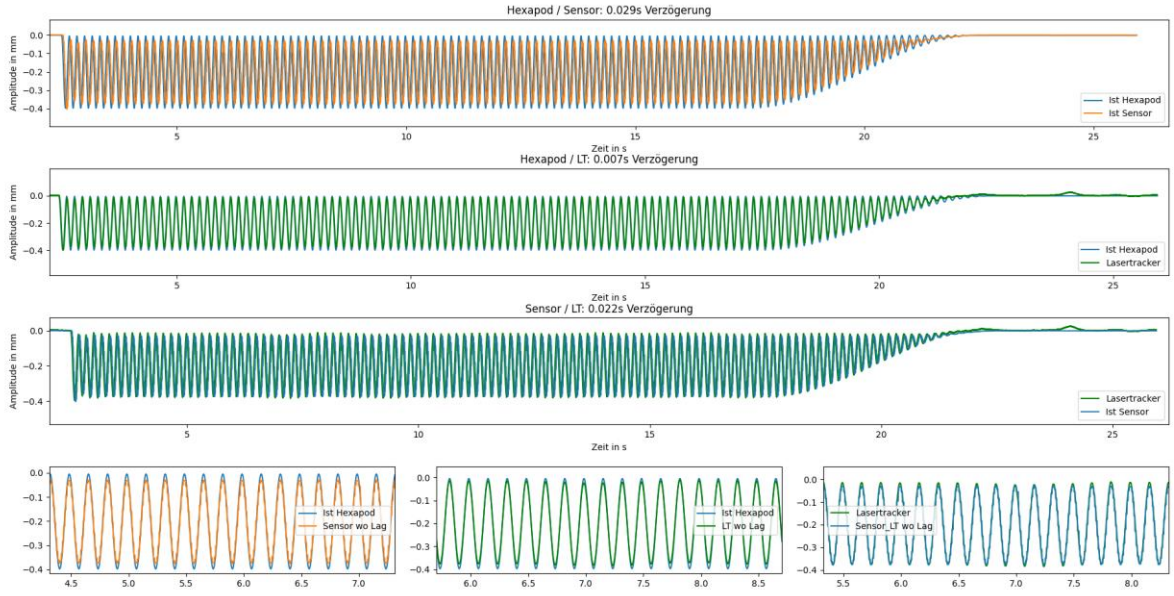


Abbildung 43: Zeit- und Amplitudenversatz nach Optimierung (Fraunhofer IFAM, 2024)

Zum Abschluss des Projekts wurden, koordiniert durch das Fraunhofer IFAM, Versuche zum Fräsen und Sealing durchgeführt. Die Regelung auf Basis der Erfassung geometrischer Referenzmarken kam dabei erfolgreich zum Einsatz. Die zwei definierten Referenzgeometrien, trapezförmige Harzkante und rechtwinklige Fräskante, wurden vom Messsystem detektiert. Die Genauigkeit der Detektion wurde im Rahmen von Schwingungsmessungen mit dem Hexapod in x-Richtung und mit einer Lasertrackermessung in z-Richtung validiert. Die gemessenen Abweichungen in diesen relevanten Koordinatenrichtungen lagen dabei jeweils und dem Zielwert von 0,5 mm. Das SMARTe Ziel zur Entwicklung eines optischen Messsystems zur Erfassung von geometrischen Referenzmarken wurde demnach als erreicht angesehen.

Das zweite SMARTe Ziel war die Entwicklung geeigneter Softwarebausteine zur echtzeitfähigen Auswertung der Messdaten. Hier war die Anforderung, dass die Auswertung in der Lage sein muss, die Messdaten in hoher Frequenz zu analysieren. Um einen hochdynamischen Prozess zu realisieren, sollte die Auswertung der Referenzmarken im Regeltakt möglich sein. Auch dieses Ziel wurde erreicht. Die Auswertung der Messdaten in der Echtzeitumgebung dauerte weniger als 1 ms. Das Bottleneck war somit die Datenaufnahme im Sensor und die nachgelagerte Übermittlung an den Industrie-PC zur Auswertung der Messdaten.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Position des zahlenmäßigen Nachweises sind die Personalkosten (0837). Durch den hohen Anteil an Arbeiten im Bereich der Softwareentwicklung und Messtechnikhardware waren diese Aufwände notwendig. Im Laufe des Projekts hat sich gezeigt, dass das Messsystem neben der Detektion der Referenzgeometrien auch zur Abschätzung der lokalen Bauteildicke verwendet werden kann. Die Erweiterung der Algorithmik um diese zusätzliche Funktionalität und deren Erprobung erforderten einen zusätzlichen Personalaufwand, der im Rahmen einer Mittelumwidmung (16.06.2023) beantragt wurde.

Gestiegen sind im Projektverlauf auch die sonstigen unmittelbaren Vorhabenkosten (0850). Hierfür war ursprünglich kein Budget vorgesehen. Im Laufe des Projekts hat sich allerdings gezeigt, dass eine effiziente Umsetzung der echtzeitfähigen Softwarebausteine durch die Verwendung einer Windows-Echtzeiterweiterung möglich ist. Für diese Echtzeiterweiterung (Kithara) wurden im Rahmen der Mittelumwidmung entsprechende Kosten von beantragt. Allerdings sind hier Mehrkosten in Höhe von etwa 12% entstanden, da eine zusätzliche Lizenzerweiterung für die Funktionalität EtherCAT-Slave notwendig war. Diese Funktionalität war in der ursprünglichen Lizenz für das EtherCAT Module nicht enthalten.

Deutlich gesunken sind im Vergleich zur Beantragung die Materialkosten (0813), die im Laufe des Projekts benötigt wurden. Hier konnten durch Verwendung vorhandener Materialien und eines bereits existierenden Versuchsstands die geplanten Aufwände signifikant gesenkt werden. So wurde das Materialbudget im Rahmen der bereits erwähnten Mittelumwidmung vom 16.06.2023 signifikant gesenkt. Allerdings wurde im restlichen Projektverlauf auch das verbliebene Materialbudget nicht mehr vollständig ausgeschöpft.

Deutlich gesunken sind im Vergleich zur ursprünglichen Planung auch die Reisekosten (0838). Bei der Mittelumwidmung war bereits absehbar, dass die Reisekosten aufgrund der Corona-bedingten Durchführung einiger Projekttreffen in rein digitaler Form zu hoch angesetzt waren. Allerdings wurde auch der Aufwand für die Reisen zur Integration der Messtechnik und den Projektabschluss als zu hoch kalkuliert. Daher wurden hier nur 53% des reduzierten Reisekostenbudgets ausgeschöpft.

Bei den Abschreibungen auf vorhabensspezifische Anlagen (0847) liegt die Ausschöpfung bei knapp 80%. Als Grund hierfür ist die im Vergleich zur ursprünglichen Planung spätere Beschaffung der Sensorik zu nennen. Hier hat sich erst im Projektverlauf herausgestellt, dass zur Auswahl einer geeigneten Sensorik aufwändigere Versuche notwendig waren.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aus Sicht der 3D.aero waren die geleisteten Arbeiten zu jeder Zeit notwendig und auch angemessen. Die geleisteten Arbeiten wurden stets so ausgeführt, dass eine Demonstration der entwickelten Technologie im Rahmen des Gesamtsystems möglich ist. Dadurch konnte der Entwicklungsaufwand auf ein angemessenes Maß reduziert werden. Ein sofortiger Einsatz der entwickelten Softwaremodule in einem industriellen Umfeld ist dadurch allerdings nicht ohne weitere Entwicklungsschritte möglich.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen des Vorhabens

Der Nutzen des Vorhabens lässt sich durch folgende zentrale Aspekte konkretisieren:

Dank der im Projekt entwickelten Technologien ist 3D.aero mittelfristig in der Lage, marktfähige Systemlösungen für den roboterbasierten Auftrag von Dichtmitteln auf Flugzeugbauteile anzubieten. Diese Lösungen zeichnen sich durch eine hohe Genauigkeit und Effizienz aus, was die Wettbewerbsfähigkeit der 3D.aero auf dem Markt stärkt.

Die Expertise in der echtzeitfähigen Auswertung von 3D-Daten und der Integration von optischen Messsystemen ermöglicht es der 3D.aero, innovative Produkte zum Beispiel im Bereich der SMART LiDAR Sensorik zu entwickeln und so das Produktportfolio zu erweitern. Diese Technologie kann auch in anderen Bereichen der industriellen Bildverarbeitung angewendet werden, wodurch sich neue Geschäftsfelder eröffnen.

Die Automatisierung von Produktionsprozessen, insbesondere im Bereich der Sealing-Technologie, bietet erhebliche Wettbewerbsvorteile für den Endanwender. Durch die Reduzierung von Prozesszeiten und den geringeren Planungsaufwand können Produktionskosten gesenkt und die Produktqualität verbessert werden, was zu einer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit führt.

Die gewonnenen Fähigkeiten und Technologien ermöglichen es der 3D.aero, als innovatives Unternehmen neue Kunden im Bereich der Flugzeugproduktion zu gewinnen, die an automatisierten Sealing-Lösungen interessiert sind. Dies stärkt nicht nur die Marktpräsenz als Systemintegrator im Bereich der Flugzeugproduktion, sondern erweitert auch das Kundenportfolio und die Umsatzbasis.

Die im Rahmen des Projekts etablierten strategischen Partnerschaften und Kooperationen mit führenden Industrieunternehmen fördern den Wissensaustausch und die gemeinsame Entwicklung weiterer innovativer Lösungen. Dies stärkt die Marktposition und eröffnet neue Geschäftsmöglichkeiten.

Das Vorhaben ADMAS hat für die 3D.aero nicht nur technologische Fortschritte gebracht, sondern durch die Erweiterung der Geschäftsfelder auch konkrete wirtschaftliche Vorteile geschaffen.

2.5 Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens

Der 3D.aero sind keine relevanten Ergebnisse oder Fortschritte von dritter Seite bekannt, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Es sind keine wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus dem Einzelvorhaben der 3D.aero entstanden. Die beteiligten Forschungsinstitute wurden im Rahmen des Projekts hinsichtlich der Verwertung der Ergebnisse unterstützt. Diese Unterstützung wird auch nach dem Ende des Förderprojekts fortgeführt. So wurden die Ergebnisse des Förderprojekts im Rahmen der

Internationalen Luft- und Raumfahrtausstellung Berlin im Juni 2024 durch das IFAM präsentiert. Hier wurde in einem Showcase auch die Sensorik zur Kantenerkennung gezeigt.

3 ZUSAMMENSTELLUNG DER VERWENDETEN FACHLITERATUR

Arakawa, K., Kakizaki, T., & Omyo, S. (2000). A Machine Vision Approach to Seam Sensing for High-Speed Robotic Sealing. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 1353-1357.

Fraunhofer IFAM. (2020). *Definition der Referenzkanten.* Stade.

Fraunhofer IFAM. (2023). *CAD-Modell des Endeffekors.* Stade.

Fraunhofer IFAM. (2024). *Auswertung des Zeit- und Amplitudenversatzes.* Stade.

Höfener, M. (2017). *Adaption eines Knickarmroboters zur flexiblen CFK-Reparatur.* Hamburg: Technische Universität Hamburg.

Huang, Y., Gao, X., You, D., & Li, Z. (2012). Investigation of Laser Welding Seam Tracking Based on Visual Sensing. *roceedings of the 2nd International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology.* Paris.

Kermorgant, O. (2018). A magnetic climbing robot to perform autonomous welding in the shipbuilding industry. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 178-186.

Kos, M., Arko, E., Kosler, H., & Jezersek, M. (2019). Remote laser welding with in-line adaptive 3D seam tracking. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 4577-4586.

Liu, J., Fan, Z., Olsen, S. I., Christensen, K. H., & Kristensen, J. K. (2015). A real-time passive vision system for robotic arc welding. *International Conference on Automation Science and Engineering.* Piscataway: IEEE.

Schindlbeck, C., Janz, A., Pape, C., & Reithmeier, E. (2017). Increasing milling precision for macro-micro-manipulators with disturbance rejection control via visual feedback. *IROS* (S. 4686-4693). Vancouver: IEEE.

wenglor GmbH. (2023). *Höchstleistung in 2D und 3D.* Tettnang.

Zhang, W., Chen, Q., Zhang, G., Sun, Z., & Du, D. (2007). Seam Tracking of Articulated Robot for Laser Welding Based on Visual Feedback Control. In T.-J. Tarn, S.-B. Chen, & C. Zhou, *Robotic Welding, Intelligence and Automation* (S. 281--287). Berlin, Heidelberg: Springer.

4 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Darstellung der Beiträge der einzelnen Konsortialpartner zum Gesamtziel des Vorhabens 4
Abbildung 2: Projektstrukturplan des Projekts ADMAS 5
Abbildung 3: Projektplan (Stand: 31.03.2024) 6
Abbildung 4: Einzelschritte der Bildverarbeitung zur Bestimmung der Naht (Kos, Arko, Kosler & Jezersek, 2019) 7
Abbildung 5: Aufbau des Demonstrators (Schindlbeck, Janz, Pape, & Reithmeier, 2017) a) Schematischer Aufbau des Makro-Mikro-Manipulators b) Makro-Positioniereinheit c) Stereovision-System d) Mikro-Positioniereinheit e) Endeffektor: Fräseinheit 8
Abbildung 6: Funktionsprinzip eines Laserlichtschnittsensors (wenglor GmbH, 2023) 10
Abbildung 7: Schematische Darstellung verschiedener Posen auf die Messdaten eines Laserlichtschnittsensors 11
Abbildung 8: Orthogonale Ausrichtung der Sichtachse des Sensors 11
Abbildung 9: Orthogonale Ausrichtung der Messlinie zur Referenzkante 12
Abbildung 10: Schematische Darstellung des Probebauteils (Fraunhofer IFAM, 2020) 13
Abbildung 11: Definition verschiedener Formen von Nuten und Kanten auf dem Probebauteil (Fraunhofer IFAM, 2020) 14
Abbildung 12: Trapezförmige Referenzkante 15
Abbildung 13: Probebauteil (links) und visueller Eindruck einer Referenzkante aus Harz kurz nach der Herstellung (rechts) 15
Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Vermessung von Referenzgeometrien 16
Abbildung 15: Einzelaufnahme einer Referenzkante 17
Abbildung 16: Aus Einzelaufnahmen zusammengesetzte Aufnahme eines Probebauteils 17
Abbildung 17: Rotierende Sensorik in V-Stellung (Konzept 1) 18
Abbildung 18: Feste Sensorik in V-Stellung (Konzept 2) 19
Abbildung 19: Fester Sensor (Konzept 3) 19
Abbildung 20: CAD-Modell mit Wenglor MLSL132 und Sensorvorlauf a = 50mm 20
Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung der Messabdeckungsanalyse und der kritischen Stellen (Messabdeckung ca. 99%) 21
Abbildung 22: Ergebnisse der Messabdeckungsanalyse 21
Abbildung 23: Vergleich der notwendigen Einbauhöhe zwischen Wenglor MLWL131 (links) und microEpsilon 3000-50/BL (rechts) 22
Abbildung 24: Spezifikation der ausgewählten Wenglor-Sensoren 23
Abbildung 25: Übersicht zu den Schnittstellen zwischen den einzelnen Systembausteinen 23
Abbildung 26: Prozessablauf für den Start einer Messung 24
Abbildung 27: Definition der Koordinatensysteme und beispielhafte EtherCAT-Variablen zur Bestimmung der Referenzgeometrie für zwei verschiedene relative Posen der trapezförmigen Harzkante zum Sensor 25
Abbildung 28: Ergebnis der Auswertung der Messdaten einer trapezförmigen Referenzprofils und Abweichung zu den vorgegebenen Soll-Werten 25
Abbildung 29: Versuchsaufbau mit robotergeführtem Laserlichtschnittsensor und Probebauteil 27
Abbildung 30: Screenshot der GUI der Echtzeit-Anwendung während der Detektion einer rechtwinkligen Referenzkante 28

Abbildung 31: Screenshot der GUI der Echtzeit-Anwendung während der Detektion einer trapezförmigen Referenzkante 28
Abbildung 32: Inbetriebnahme und erste Tests der Messtechnik in der Testumgebung 29
Abbildung 33: Versuchsaufbau zur Bauteildickenmessung 30
Abbildung 34: Auswertung der Bauteildicke bei einer Messfahrt 30
Abbildung 35: Integration der Sensorik in den Endeffektor für den Fräsprozess (links) und Sealing-Endeffektor (rechts) (Fraunhofer IFAM, 2023) 31
Abbildung 36: Mechanische Integration der Sensorik Wenglor MLWL131 am Endeffektor für den Fräsprozess 31
Abbildung 37: Schematischer Ablauf der Testmessungen zur Bestimmung der Referenzkante 32
Abbildung 38: Testmessungen mit schwingendem Hexapod: Messdaten (links) und Auswertung der entsprechenden x-Position des Trapezes (rechts) 33
Abbildung 39: Testmessung mit Änderung des z-Abstands mit Darstellung der Messdaten (links) und der Auswertung von Trapezbreite und -höhe (rechts oben) sowie der x- und z-Position des Trapezes 34
Abbildung 40: z-Abstand der Harzkante des TP4 zum Sensorkoordinatensystem 35
Abbildung 41: x-Position der Harzkante des TP4 im Sensorkoordinatensystem 35
Abbildung 42: Beispielhafte Amplitudenverläufe Soll Hexapod und Ist Sensor für unterschiedliche Bewegungsfrequenzen des Hexapoden (Fraunhofer IFAM, 2024) 36
Abbildung 43: Zeit- und Amplitudenversatz nach Optimierung (Fraunhofer IFAM, 2024) 38