

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# ***Schlussbericht***

des Partners

**Fraunhofer IFAM**

für das Verbundprojekt

***„SmartADU2020“***

Entwicklung einer mobilen Vermessungseinheit zur prozessbegleitenden Prüfung von Nietbohrungen für Smarte ADU-Bohrtechnologie für die Flugzeugmontage in 2020

**FKZ: 20Q1522E**

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2016 bis 31.12.2019

Ort: Ottenbecker Damm 12, 21684 Stade

Projektleitung und Berichtswesen: Christoph Brillinger

30. September 2020

## **Inhaltsverzeichnis**

1.	Aufgabenstellung.....	3
2.	Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde .....	4
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand an welchen angeknüpft wurde .....	7
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
6.	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis .....	8
6.1	HAP 0: Projektmanagement .....	8
6.1.1	AP 0.1: Organisation des Vorhabens .....	8
6.1.2	AP 0.2: Dokumentation der Ergebnisse .....	9
6.2	HAP 3: Mobile Messsysteme .....	9
6.2.1	AP 3.1: Mobile Vermessungseinheit .....	10
6.3	HAP 2: Prozessintegrierte Bohrungsidentifikation/Datenübertragung.....	25
6.3.1	AP 2.4: Datenaustausch (HW, SW) mit Vermessungseinheit für bohrungsindividuelle Qualitätsdaten.....	25
6.4	HAP 5: Idealisierte Bauteilumgebung M 1:1 .....	26
6.4.1	AP 5.1: Versuchsumgebung für Flugzeugmontage.....	26
6.4.2	AP 5.2 Technologieerprobung in Bauteilumgebung .....	27
7.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	29
8.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	29
9.	Voraussichtlicher Nutzen .....	30
10.	Bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	31
11.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	31
12.	Literaturverzeichnis .....	32

## **1. Aufgabenstellung**

Mit Blick auf die Ziele von "Flightpath 2050" gilt es Fertigungsverfahren für Flugzeugstrukturen deutlich zu verbessern, um das Leichtbaupotenzial optimal zu nutzen. Die Optimierung der Prozesskette zur kosteneffizienten FVK- bzw. Multimaterialmontage ermöglicht durch die Gewichtsreduktion sowohl Treibstoff/CO<sub>2</sub>-Einsparungen als auch neue Designpotenziale. Der Anteil wertschöpfender Tätigkeiten des Personals in der Montage wird damit deutlich gesteigert und trägt dazu bei, Wertschöpfungsanteile der deutschen Luftfahrtindustrie zu sichern und auszubauen. Das Verbundprojekt SmartADU2020 ist vom Projektkonsortium aus Lübbering GmbH, Klenk (Teil der Ceratizit-Gruppe), Sarissa GmbH, TUHH IPMT, dem Fraunhofer IFAM und den assoziierten Partnern Advanced Analysis & Integration Ltd., Airbus Operations GmbH, Extramet AG, CemCon AG und Premium Aerotec GmbH durchgeführt worden, um eine Effizienzsteigerung von semiautomatischen und manuellen Bohrprozessen bei der Flugzeugmontage durch den Einsatz und die Vernetzung innovativer Technologien zu erreichen. Dabei sind auch Technologien entwickelt worden, um die Ergonomie für das Personal zu verbessern und sowohl materielle als auch zeitliche Ressourcen zu schonen. Hierfür wurden innerhalb des Verbundprojektes in etablierter Zusammenarbeit mit mittelständischen Ausrüstern und Zulieferern neue Systeme entwickelt und bestehende Prozesse verbessert. Das IFAM fokussierte sich dabei auf die Entwicklung einer tragbaren Vermessungseinheit, die eine schnelle, prozessbegleitende Bohrungsüberprüfung ermöglicht, sowie die Schaffung einer idealisierten Bauteilumgebung im Maßstab 1:1, welche eine Erprobung der im Konsortium erarbeiteten optimierten Montagebohrprozesskette in produktionsnaher Umgebung zulässt.

Zuvor bestehende Lösungen zur Bohrungsvermessung ermöglichten lediglich eine nachgeschaltete Überprüfung im Rahmen der Qualitätssicherung auf Basis von Geräten, deren Handhabung z.T. sehr komplex ist. Auch existierte keine einfach handhabbare und damit prozessbegleitend verwendbare Lösung, die alle Qualitätsmerkmale wie z.B. Lochgeometrie (Durchmesser, Rundheit), Koaxialität Senkung/ Bohrung, Senkungsgeometrie (Winkel, Übergangsrat), Kontamination, Grat, etc. für unterschiedliche Durchmesser und Bohrungstypen in einem Schritt und durch lediglich ein Messgerät ermöglicht hätte. Bei der entwickelten Vermessungseinheit wurde großer Wert daraufgelegt, möglichst viele Qualitätsmerkmale einer Bohrung mit nur einer einzigen Messung erfassen zu können. Vor dem Hintergrund kurzer Taktzeiten und der Weiterentwicklung der nicht-taktilen Laser- und Kameramesstechnik, die derzeit primär in vollautomatisierten Produktionsumgebungen Anwendung findet, wurde der Fokus in diesem Projekt auf die nicht-taktile Sensorik gesetzt. Auf diesem Weg soll diese schnellere und flexiblere Form der Messdatenerfassung nun auch den Einzug in den semi-automatisierten Bereich der Montagebohrtechnologie erreichen bzw. diesen Produktionsbereich dadurch stärker automatisieren und flexibilisieren. Das digitale Ergebnis der Messauswertung wird zudem in einer Prozessdatenbank hinterlegt und eindeutig mit einer durchgeführten Bohrung verknüpft. Dabei ist zu erwähnen, dass bisherige Lösungen primär auf taktilen Verfahren basieren, die häufig analog erhoben und dokumentiert werden. Für den Einsatz der Vermessungseinheit ergeben sich somit drei Anwendungsfälle: erstens die Entwicklung neuer Bohrprozesse, zweitens das Einstellen von BVE-Einheiten im Tool-Center des Endanwenders und drittens die Überprüfung von Bohrungen am Bauplatz zur stichprobenhaften Überprüfung oder zur Beurteilung eines möglichen Schadenfalls.

Weiterhin war es die Aufgabe des Fraunhofer IFAM den Aufbau einer produktionsnahen Versuchsumgebung bzw. einer idealisierten Bauteilumgebung im Maßstab 1:1 für die Flugzeugmontage zu realisieren. Auf Basis der vorhandenen Versuchsanlagen am CFK NORD sollte dazu eine Plattform geschaffen werden, um die Erprobung der im Konsortium erarbeiteten optimierten Montagebohrprozesskette in produktionsnaher Umgebung zu ermöglichen. Darüber hinaus soll es diese Versuchsumgebung der deutschen Luftfahrtindustrie ermöglichen, die Bohrtechnologie unabhängig von den unterschiedlichen Produktionsstandorten weiterzuentwickeln.

## **2. Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Fraunhofer IFAM konnte seine Erfahrungen im Bereich der Automatisierung von Montage- und Bearbeitungsprozessen von Flugzeugstrukturen bereits zu Beginn des Projektes einbringen. Aufgrund der Vielseitigkeit bereits durchgeführter Projekte seitens der ausführenden Stelle des IFAM am CKF Nord in Stade, war stets ein interdisziplinärer Austausch mit fachlich spezialisierten Mitarbeitern möglich, um Design-Entscheidungen der Vermessungseinheit bereits frühzeitig aus verschiedenen Winkeln zu beleuchten.

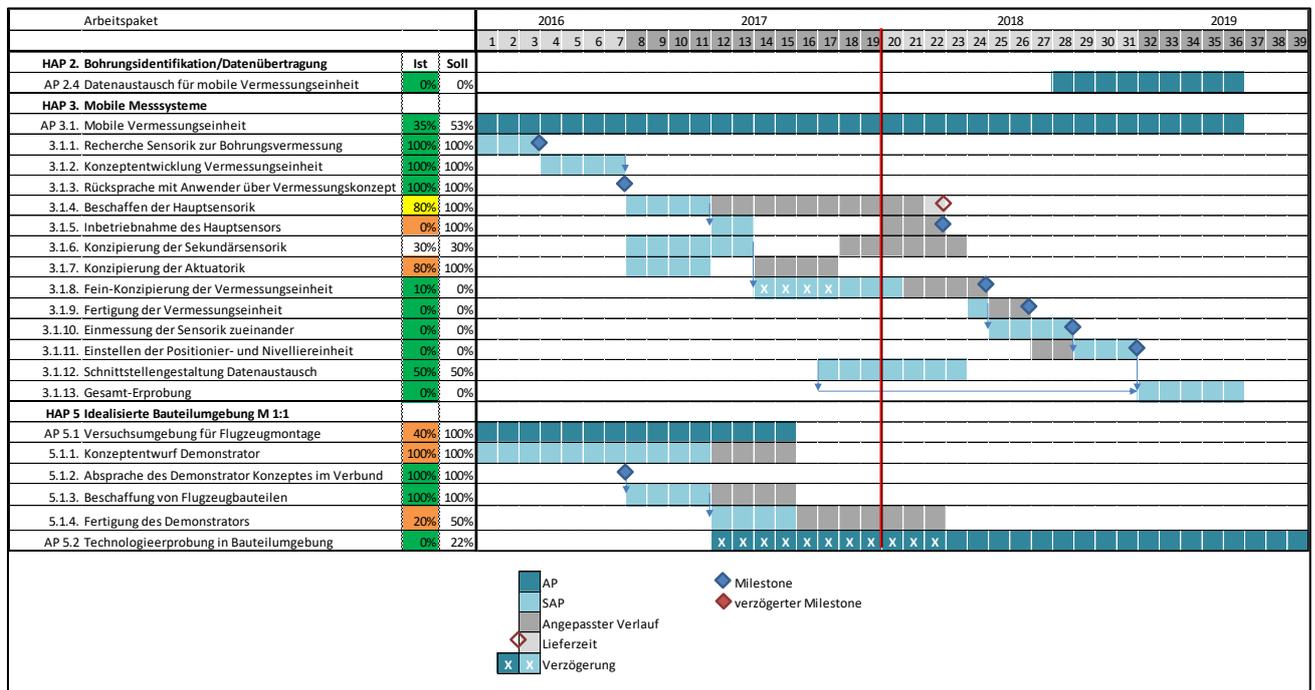
Darüber hinaus verfügte das Fraunhofer IFAM über Expertise bei der Durchführung von Mess- und Prüfaufgaben und konnte auf diverse Messmittel und Anlagen zur Durchführung von Versuchsreihen zurückgreifen. Der Standort Stade bot dabei eine ausreichend große Forschungshalle, um Versuchsreihen im Vollmaßstab abzubilden. Beispielhaft sei hierzu ein Rumpftonnen-Demonstrator mit Sigle-Aisle-Durchmesser genannt, welcher während der Projektlaufzeit fertig gestellt wurde und für das Projekt genutzt werden konnte. Die örtliche Nähe zu den Projektpartner IMPT der TUHH, den Airbus Standorten Stade und Finkenwerder und der PAG in Nordenham erleichterte den Austausch im Konsortium durch den geringen anfallenden Reiseaufwand.

Im Projekt SmartADU2020 konnte bis dato noch fehlendes Knowhow im Bereich der Qualitätsprüfung von Bohrungen am Standort aufgebaut werden. Durch die Einbindung studentischer Mitarbeiter und die Durchführung von Abschlussarbeiten konnten erfolgreich wissenschaftliche Nachwuchskräfte mit in das Projekt SmartADU2020 eingebunden werden.



**Schlussbericht des Partners Fraunhofer IFAM für das Verbundprojekt „SmartADU2020“**

befand sich zu Beginn des Projekts SmartADU2020 allerdings noch im Aufbau und stand folglich erst im späteren Projektverlauf zur Verfügung. Zweitens bestand nur ein sehr kleiner Markt an für die Vermessungsaufgabe geeigneten Sensoren, was die Beschaffung eines entsprechenden Systems deutlich erschwerte. Ausgehend von einer umfassenden Definition der Anforderungen an das System und einer umfangreichen Betrachtung von auf dem Markt erhältlichen Technologien, die zur Umsetzung verwendet werden könnten, wurde ein entsprechendes Ausschreibungsverfahren zur Beschaffung eines Sensors eingeleitet. Dabei wurde die Möglichkeit priorisiert, mit dem Messsystem auf möglichst viele relevante Bohrungsqualitätsmerkmale schließen zu können. Leider konnte für die anvisierte Messaufgabe zunächst kein Produkt eines etablierten Herstellers identifiziert werden, was zu entsprechenden Verzögerungen führte. Das Ausschreibungsverfahren konnte im zweiten Anlauf erfolgreich abgeschlossen werden, indem ein Produkt eines Herstellers beschafft wurde, der bis dato noch nicht lange auf dem Markt präsent gewesen ist. Weitere Verzögerungen ergeben sich während der Inbetriebnahme des Bohrungsvermessungssensors aufgrund von teils mangelnder Marktreife und Störfällen des Systems, die in Absprache mit dem Hersteller beseitigt werden mussten. Zusätzlich kam es in Folge eines Softwarefehlers zu einem mechanischen Defekt, der vom Hersteller repariert worden ist. Letztendlich hatte sich durch die beschriebenen Umstände ein zeitlicher Verzug eingestellt, der einerseits durch die Verlängerung der Projektlaufzeit aber auch durch stark zeit-paralleles Arbeiten in den letzten Projektmonaten kompensiert werden musste. Im Kapitel 6 wird eine detaillierte Beschreibung der technischen Vorgehensweise angeführt.



**Abbildung 2:** Arbeits- und Zeitplan, Teilprojekt IFAM, Stand: 31.12.2017, © Fraunhofer

## **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an welchen angeknüpft wurde**

Die Nietverbindung ist heute und in absehbarer Zukunft die dominante Technologie beim Fügen von Flugzeugstrukturen. Allein im deutschen Flugzeugbau wird jährlich eine achtstellige Anzahl an Nietverbindungen eingebracht, dementsprechend muss auch dieselbe Anzahl an Präzisionsbohrungen hergestellt werden. Aufgrund teils schwieriger Zugänglichkeiten bedarf es allerdings einer zeitparallelen und flexibel gestaltbaren Fertigung, weshalb der Anteil manuell und semiautomatisch erbrachter Bohrungen im Flugzeugbau sehr hoch ist.

Die Entwicklung von Bohrprozessen in der Luftfahrt ist derzeit von langwierigen Qualifizierungsprozessen begleitet, die hohe Kosten verursachen [1]. Hierbei werden mit den zu qualifizierenden Werkzeugen bzw. mit dem zu qualifizierenden Prozess mehrere Tausend Testbohrungen durchgeführt und z.T. zu 100% im Messlabor vermessen. Ein Grund hierfür ist die Tatsache, dass die Qualitätsanforderungen an die Bohrungen (i.d.R. Durchmesser, Lochgeometrie/Rundheit, Winkel, Konzentrität Bohrung/ Senkung, Senkungsgeometrie, Rauheit, Thermische Schädigung, Kontamination, Delamination, Faserüberstände, Übergang Bohrung/Senkung) in der Produktion nur in sehr begrenzter Form an der tatsächlichen Struktur überprüft werden können. Aus diesem Grund werden vor Produktionsstart sowie beim Wechsel von Werkzeugen z.T. (flache) Testplatten gebohrt, die dann in einem Messlabor mit speziellen Vorrichtungen (z.B. Trulok Messgeräte/Messlehren für Durchmesser und Senkung, taktile Rauheitsmessgeräte, z.B. Hommel 2000, für die Ermittlung der Oberflächenrauheit, Koordinatenmessmaschine oder anderen Handmessgeräten) überprüft werden [3] [4]. Die Verwendung dieser Vielzahl an unterschiedlichen Messgeräten führt zu langen Prüfzeiten. Die Identifikation der Bohrungen sowie die Zuordnung zu den Prüfergebnissen erfolgt durch das Personal und stellt damit eine potentielle Fehlerquelle dar.

Je nach Erfahrung und Anfälligkeit des zu überprüfenden Prozesses wird der Bohrungsdurchmesser derzeit im Wesentlichen die einzige Messgröße, die sich in verlässlicher Art und Weise direkt an der Struktur ermitteln lässt in unterschiedlicher Häufigkeit an Stichproben mit einem Handmessgerät, z.B. von Trulok, überprüft [4]. Darüber hinaus spielt das Erfahrungswissen des Werkers hinsichtlich Klang und Geruchsentwicklung während des Prozesses sowie die visuelle Kontrolle jeder Bohrung eine große Bedeutung. Hierbei können jedoch nur einschlägige Beschädigungen der Bohrungen, wie starke Delaminationen, Faserüberstände, erhebliche thermische Schädigungen oder deutliche Abweichungen von der Geometrie, erkannt werden.

Die Verwendung von Systemen zur prozessbegleitenden Vermessung der Bohrungsqualität in hoher Taktrate ist bis dato bei semiautomatischen Prozessen nicht vorhanden. Im Bereich des vollautomatisierten Bohrens von Flugzeugstrukturen mit Bohr- und Nietautomaten oder speziellen Bohrrobotern gibt es dagegen bereits erste Ansätze, die Bohrungsqualität taktil oder nicht-taktil und in hoher Taktrate zu vermessen [2] [3]. In semiautomatisierten und manuellen Prozessen durch Werker wurden derartige Lösungen bisher allerdings noch nicht genutzt, da die Vorrichtungen für die Vermessung für die Handhabung durch den Werker einerseits zu schwer sind und andererseits eine manuelle hochgenaue Positionierung und Führung der Vorrichtungen durch den Werker nicht möglich ist. Dieses Problem soll im Rahmen der Arbeiten von SmartADU2020 gelöst werden, indem neuerdings auf dem Markt erhältliche kleine, nicht-taktile Sensoren mit einer leichten aber dennoch präzisen Ausricht- und Bewegungskinetik kombiniert werden, welche mittels einer Vorrichtung durch den Werker über der Bohrung auf der Struktur „grobpositioniert“ wird.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Während des Projektverlaufs erfolgte eine intensive Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Auch aufgrund der regionalen Nähe konnte der Austausch mit dem IPMT der TUHH dabei besonders intensiv geführt werden. Ausgerichtet am jeweiligen Bedarf fanden Treffen zur Diskussion von Projektergebnissen statt und wenn notwendig, konnte auch kurzfristig technisches Equipment gegenseitig zur Verfügung gestellt werden. Weiterhin sind mehrere Besichtigungen bei den assoziierten Partnern Premium AEROTEC und Airbus durchgeführt worden, die zur Vertiefung des Verständnisses des Anwendungsfalles gedient haben.

Auch mit dem Hersteller des Bohrungsvermessungssensors United Sciences hat ein mehrfacher Austausch stattgefunden, um technische Fragestellungen während der Inbetriebnahme zu klären und Störungen aufzulösen.

Im Zuge der Entwicklung einer Methode zur Positionierung der Vermessungseinheit sind Versuchsreihen zur Erprobung eines Beleuchtungssystems durch die Firma M-Vis durchgeführt worden, die zur Auslegung des Kamerasystems nötig waren.

Weitere Zusammenarbeit mit Dritten oder die Vergabe anderweitiger Unteraufträgen hat nicht stattgefunden.

## **6. Verwendung der Zuwendung und erzieltes Ergebnis**

Das Fraunhofer IFAM beteiligte sich im Forschungsvorhaben SmartADU2020 an mehreren Hauptarbeitspaketen. Der Arbeitsschwerpunkt lag auf dem HAP 3: *Mobile Messsysteme*, in dem das Fraunhofer IFAM beauftragt gewesen ist, eine portable Vermessungseinheit zur Überprüfung von Bohrungen zu entwickeln. Im HAP 2: *Prozessintegrierte Bohrungsidentifikation / Datenübertragung* ist die entwickelte Vermessungseinheit in ein zentrales Datenerfassungssystem eingebunden worden. Weiterhin ist im HAP 5: *Idealisierte Bauteilumgebung M 1:1* eine maßstabsgerechte Versuchsumgebung zur Erprobung der im Konsortium entwickelten Technologien umgesetzt worden. Die Projektkoordination und -steuerung erfolgte im HAP 0: *Projektmanagement*. Eine detaillierte Aufführung der Arbeiten des IFAM mit Fokus auf Verwendung der Zuwendung sowie den Ergebnissen wird im nachfolgenden Abschnitt angeführt.

### **6.1 HAP 0: Projektmanagement**

Das Projektmanagement diente der übergeordneten Projektsteuerung zur Einhaltung der vereinbarten Projektziele. Der Projektfortschritt ist kontinuierlich bezüglich Inhalt und zeitlichen Verlauf überwacht worden. Für die Koordination des Verbundes war der Projektpartner Ceratizit hauptverantwortlich, hier ist das IFAM lediglich unterstützend tätig geworden.

Für die Durchführung des HAP 0 wurde ausschließlich Personalaufwand erbracht, der bei der Ausführung der beschriebenen Tätigkeiten angefallen ist.

#### **6.1.1 AP 0.1: Organisation des Vorhabens**

Ein wesentlicher Anteil des Projektmanagements war die Organisation des Vorhabens, die eine erfolgreiche Durchführung des Projektes erst ermöglicht hat. Neben regelmäßigen Abstimmungs-

meetings im Verbundkonsortium, sind bilaterale Absprachen getroffen worden, um die Zusammenarbeit mit anderen Partnern zu koordinieren. Weiterhin waren Projekttreffen am Fraunhofer IFAM in Stade zu vereinbaren. Aufgrund verschiedener Verzögerungen während der Ausführung der technischen Entwicklungsziele mussten Projektpläne mehrfach angepasst und im Konsortium abgestimmt werden.

### **6.1.2 AP 0.2: Dokumentation der Ergebnisse**

Es ist eine umfassende Dokumentation der Ergebnisse sowie das offizielle Berichtswesen gegenüber dem Projektträger durchgeführt worden, welche eine nachhaltige Verwendung der Ergebnisse gewährleistet. Das Fraunhofer IFAM ist nach ISO9001:2015 für ein aktuelles Qualitätsmanagement qualifiziert, weshalb die Projektergebnisse bereits während der Laufzeit digital erfasst und abgelegt wurden. Neben der Dokumentation von den erarbeiteten Ergebnissen, wie Anforderungslisten, Programmcode, Versuchsergebnissen und Abschlussarbeiten, wurde auch regelmäßig der Projektfortschritt in Form von Zwischenberichten dokumentiert und an den Projektträger übermittelt.

## **6.2 HAP 3: Mobile Messsysteme**

Die Umsetzung der Mobilten Vermessungseinheit ist in strenger Anlehnung an die *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte* nach der VDI 2221 durchgeführt worden.

In der ersten Phase des Planens hat zunächst die Definition des Anwendungsszenarios der Technologie stattgefunden. Darauf aufbauend ist eine Definition der relevanten Funktionen und Messgrößen des Messsystems getroffen worden. Es sind umfassende Recherchen über Sensoren zur Vermessung von Bohrungen durchgeführt worden. Daraufhin hat eine Spezifizierung des Anwendungskonzeptes stattgefunden. Aufbauend auf den getroffenen Definitionen und Spezifikationen ist ein Beschaffungsvorgang über einen optischen Sensor zur Bohrungsvermessung initiiert worden.

In der zweiten Phase des Konzipierens konnte zunächst der Schluss gezogen werden, dass es zur Vermessung von Bohrungen nötig ist einen Sensor durch die entsprechende Bohrung zu führen. Daher sind Konzepte zur Positionierung des Sensors über der Bohrung entwickelt worden. Diese mussten zwei wesentliche Funktionen gewährleisten: erstens muss die relative Ist-Lage der Bohrung ermittelt werden, zweitens ist der Sensor an der ermittelten Position zu positionieren. Nach der Skizzierung grundlegender Möglichkeiten zur Lösung dieser Aufgaben, wurde sich auf die Auswahl einer Methode zur Positionsermittlung fokussiert, da diese wesentliche Anforderungen an das Positioniersystem stellen kann. Hierzu sind Marktrecherchen und Versuchsreihen mit potentiellen Systemen durchgeführt worden. Schließlich konnte die Eignung eines Kamerasystems aufgezeigt werden. Aufbauend auf den grundlegenden Lösungsskizzen und der Wahl des Ansatzes zur Positionsermittlung sind Lösungen zur Umsetzung der Positionieraufgabe evaluiert worden. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung einer Hexapod-Kinematik vorteilhaft ist.

In der dritten Phase des Entwerfens sind zunächst die zur Umsetzung benötigten mechanischen Komponenten entworfen worden. Nach einer abschließenden Arbeitsraumanalyse konnte ein geeignetes Hexapod-System beschafft werden.

Es folgte letztlich die vierte Phase der Umsetzung. Es war eine Vielzahl an Softwaremodulen zur Einbindung der Teilsysteme zu einer Gesamteinheit zu erstellen. Die Vorbereitung der Softwaremodule war frühestmöglich vorbereitet worden, da sich zu diesem Zeitpunkt bereits ein Verzug im Projekt eingestellt hatte. So konnten die Teilsysteme nach Lieferung in möglichst kurzer Zeit eingebunden werden.

### **6.2.1 AP 3.1: Mobile Vermessungseinheit**

#### Definition des Anwendungsszenarios

Für den Entwurf der Vermessungseinheit war es zwingend nötig, das genaue Anwendungsszenario zu definieren. Aus diesem Grund wurden möglichst unmittelbar nach Projektbeginn Besichtigungen sowohl der A320-Rumpfsegment-Montage, als auch der Rumpfsegmentmontage des A350 „pulse line“ in Finkenwerder durchgeführt. Es konnten ein umfassender Einblick in die vorherrschenden Produktionsbedingungen gewonnen und die derzeitigen Herausforderungen besprochen werden. Im Zuge dieser Treffen und weiterer Folgegespräche wurde die Zielanwendung für die im Projekt SmartADU2020 abzubildenden Technologien präzise spezifiziert. So sollten Senkbohrungen mit Durchmessern zwischen 3/16“ (4,8 mm) und 1/4“ (6,4 mm) in Materialkombinationen aus Alu, CFK und Titan im Fokus der Betrachtung stehen, da diese den wesentlichen Hauptteil der eingebrachten Bohrungen ausmachen.

Die Verwendung der Vermessungseinheit zur 100%igen, prozessnahen Kontrolle war seitens der Endanwender aufgrund des resultierenden Mehraufwandes und der eventuell entstehenden Nebenzeiten nicht erwünscht. Der Vermessungseinheit kommen drei Anwendungsfälle zu:

- Entwicklung neuer Bohrprozesse
- Einstellen von BVE im Tool-Center
- Überprüfen von Bohrungen am Bauteil im Schadensfall

Bei der Entwicklung neuartiger Bohrsysteme oder Bohrwerkzeuge geht mit der Bestimmung, Optimierung und Validierung geeigneter Bohrprozesse und Bohrparameter stets auch die Auswertung der Bohrungsqualität einher. Durch die Verfügbarkeit einer anwenderfreundlichen und dennoch umfassenden Vermessungsmethode kann dieser Vorgang wesentlich auf einer deutlich umfangreicheren Datengrundlage ausgeführt werden. Weiterhin können anhand der verbesserten Auswertung der Bohrungsqualität Charakteristiken in Prozessdaten besser bestimmt werden, die auf die Qualität der Bohrung hinweisen.

Der Endanwender kann die Vermessungseinheit nutzen, um neuartige Werkzeuge zu überprüfen. Er wird in die Lage versetzt mit kleinem Aufwand vorgegebenen Bohrungsparameter zu validieren, indem er die unter diesen Vorgaben ausgeführten Bohrungen im Tool-Center detailliert untersuchen kann. Auch die abschließende Prüfung einer BVE nach Wartung oder Werkzeugwechsel kann durch die Vermessungseinheit vereinfacht werden.

Zusätzlich soll die Vermessungseinheit als Überprüfungsverfahren im Schadensfall am Bauplatz verwendet werden.

### Definition der Messgrößen

Zur Einbringung von Nieten sind verschiedene geometrische Merkmale an Senkbohrungen zu erfassen. In der nachfolgenden Liste werden die wichtigsten zu erfassenden Untersuchungsmerkmale aufgeführt:

- Bohrungsdurchmesser
- Delamination und Faserüberstand (bei Faserverbundwerkstoffen)
- Gratbildung am Bohrungsausgang
- Koaxialität bezüglich Senkung und Bohrung (wenn nicht in einem Vorgang ausgeführt)
- Konzentrität bezüglich Senkung und Bohrung (wenn nicht in einem Vorgang ausgeführt)
- Oberflächenrauheit
- Orthogonalität der Bohrung zur Außenseite
- Senktiefe
- Senkwinkel
- Thermische Schäden und Verschmutzungen
- Sowie weiterer Schadensfälle

Aus Gründen der Vertraulichkeit enthält die angeführte Liste keine Priorisierung oder spezifischen Toleranzgrößen.

### Marktrecherche über Sensoren zur Bohrungsvermessung

Zeitgleich mit der Vereinbarung des Anwendungsszenarios ist eine umfangreiche Rechercharbeit über den aktuellen technischen Stand von Sensoren durchgeführt worden, welche für die Vermessung von Senklochbohrungen geeignet sind. Zusammen mit einer klaren Definition der Anwendung bilden diese die Grundlage für den Entwurf der mobilen Vermessungseinheit. Es ist branchen- und länderübergreifend nach bestehenden Messmethoden gesucht worden. Dabei sei erwähnt, dass in Tabelle 1 auch Systeme aufgeführt sind, die aufgrund ihres Messprinzips nur eine Teilmenge der Messaufgabe erfüllen können. Trotz einer Vielzahl an aufgelisteten Systemen, sind nur wenige grundlegend für die definierte Messaufgabe geeignet, da diese recht komplex ist. Besondere Herausforderungen ergeben sich aus

- dem geringen Durchmesser in Relation zur Tiefe der Bohrungen,
- den sehr verschiedenen optischen Eigenschaften der betrachteten Materialien CFK, Aluminium und Titan, sowie
- dem Anspruch sowohl Bohrung als auch Senkung vermessen zu können.

Die nachfolgend aufgeführte Bewertung der Systeme erfolgte anhand von Produktvorführungen, Gesprächen und Versuchsreihen an Probebohrungen. Aus den Untersuchungen konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es zur Vermessung einer Senklochbohrung mit geringem Durchmesser zwingend nötig ist, die Bohrung von innen zu vermessen.

Nach dieser ausführlichen Betrachtung der Lösungsmöglichkeiten ist ein AeroScan-System der Firma United Sciences beschafft worden. Auf die hierbei entstandenen Verzögerungen ist bereits an anderer Stelle eingegangen worden. Das AeroScan-System ist das einzige identifizierte System, dass in einem Vorgang sowohl den Bereich der Bohrung als auch den Senkkegel vermessen kann und so ein möglichst vollständiges Abbild liefert.

**Tabelle 1:** Rechercheergebnisse zur Bohrungsvermessung

Messprinzip	Bewertung
<p><b>Laserlinien-Scanner</b> Vielzahl von Herstellern auf dem Markt anzutreffen</p>	<p>+ Für vers. Materialien geeignet - Datenerfassung auf Senkung beschränkt - Zusätzliche Vorschubeinheit nötig</p>
<p><b>Multi-Laserlinien Scanner</b> Einzig als Produkt HS770-Sensor von LaserGauge identifiziert</p>	<p>+ Für vers. Materialien geeignet = Keine zusätzliche Vorschubeinheit nötig - Datenerfassung auf Senkung beschränkt Zum Betrachtungspunkt nicht als Produkt erhältlich</p>
<p><b>Streifenlichtprojektoren</b> Verschiedene Vertreter, z.B Gom oder LMI Technologies</p>	<p>+ schnell und einfach durchführbare Messungen - nicht geeignet für reflektierende Oberflächen - Datenerfassung auf Senkung beschränkt</p>
<p><b>Konfokalsensor</b> Einzig das Produkt BoreControll Lab von MicroEpsilon identifiziert</p>	<p>+ Präzise Erfassung der Merkmale der Bohrung - Enger Messbereich, Lanzenwechsel und Kalibration nötig - Keine Messung von Senkungen möglich - Messung zeitintensiv</p>
<p><b>Laserring-Projektion</b> Als Produkt einzig AeroScan von United Sciences erhältlich</p>	<p>+ Präzise Erfassung der Merkmale der Bohrung + großer Messbereich + Einziges System, das Bohrung und Senkung vermessen kann - Messung zeitintensiv - Zerbrechlichkeit des Sensors</p>
<p><b>Endoskopie</b> Auf dem Markt im großem Umfang erhältlich</p>	<p>- keine echte Messung, einzig visuelles Kontrollsystem</p>
<p><b>Kapazitive Sensoren</b> Beispielhaft sind Produkte der Firma Capacitec zu nennen</p>	<p>- nur geringe Eignung für Senkbohrungen</p>
<p><b>Induktive Gratsonde</b> Messmittel der Firma Balluff identifiziert</p>	<p>+ verspricht Detektion und Vermessung des Austrittsgrates Entwicklung eingestellt, System nicht erhältlich</p>
<p><b>Pneumatische Messdorne</b> Beispielhaft sind Messsysteme der Firma Marposs zu nennen</p>	<p>- nicht zur Vermessung von Senkbohrungen geeignet</p>
<p><b>Bohrmessdorne</b> Beispielhaft sind Messsysteme der Firma Diatest zu nennen</p>	<p>+ sehr hohe Messgenauigkeit - Keine Messung von Senkungen möglich - Messung verschiedener Durchmesser nur mit Wechsel des Messdorns möglich - Ausschließlich punktuelle Betrachtung (0°, 90°)</p>
<p><b>Rechtwinkligkeitsmessgerät</b> Wenige Anbieter, beispielhaft sind Messsysteme der Firma Trulok zu nennen</p>	<p>- Auswahl des richtigen Passstiftes nötig - Abhängigkeit der Winkelmessung von der Maßhaltigkeit des Durchmessers</p>

<b>Senktiefenmessgeräte &amp; Senkdurchmessermessgeräte</b> Beispielhaft sind Messsysteme der Firma Trulok zu nennen	<ul style="list-style-type: none"><li>- Bestimmung des Durchmessers ist an Messung der Senktiefe geknüpft</li><li>- Annahme, dass Senkung geometrisch richtig ausgeführt worden ist (Senkwinkel, Ausbrüche, etc.)</li><li>- Viele Fehlereinflussgrößen</li></ul>
---	--

### Vorstellung des Bohrungsvermessungssystems „AeroScan“

Der Bohrungsvermessungssensor AeroScan kann Bohrungen bzw. Senkungen mit Durchmessern zwischen 4,8 mm und 21,59 mm vermessen. Die Messung erfolgt durch eine gläserne Messsonde, die durch die Bohrung geführt wird. Dabei emittiert eine Laser-Diode an Ende der Sonde einen blauen Laserring auf die Bohrungswand. Dessen Reflektion wird über eine Optik im inneren der gläsernen Sonde weitergeleitet und trifft schließlich auf einen Kamera-Chip. Dort bildet sich ein kreisförmiges Abbild der Bohrungswand ab. Aufgrund von verschiedenen Ausbreitungswegen des Lichtes werden neben der eigentlichen Messung noch weitere konzentrische Kreise ausgezeichnet. Aus diesem Grund wird von der Steuerungssoftware des Sensors eine Filterung vorgenommen, die auf der Helligkeit der Kreise, aber auch auf dem nominalen Durchmesser der Bohrung an der gemessenen Stelle beruht. Aus diesem Grund muss vor jeder Messung eine Definition der Sollgeometrie der Bohrung an den Sensor übermittelt werden, die z.B. mit einem Konfigurationsprogramm erstellt werden kann. Die Tiefeninformation der Messung wird aus der Vortriebsachse des Sensors bestimmt, welche den Sensor durch die Bohrung führt. Da die Messsonde sehr zerbrechlich ist und die Messwertfilterung darauf angewiesen ist, dass der Sensor mittig durch die Bohrung geführt wird, muss der Sensor zum Schutz der Sonde aber auch zur technischen Durchführung der Messung präzise zur Bohrung ausgerichtet werden. Das Führen der Sonde durch die Bohrung erfolgt wie oben beschrieben aus einer Linearachse des Systems, es wird daher keine zusätzliche Stellapparatur während der Messung benötigt.

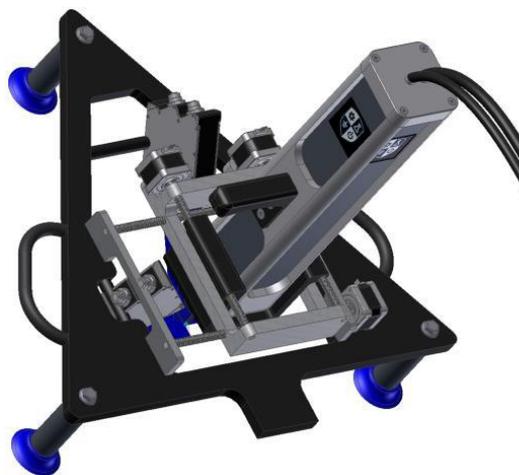
### Konzepte zur Handhabung und Positionierung

Für den Einsatz des AeroScan-Sensors ist es entscheidend das Messsystem mittig und koaxial über der Bohrung zu positionieren. Es ist seitens der Hersteller die Anforderung gestellt worden, dass die Messachse während der Messung weniger als 50µm von der mittleren Bohrungsachse abweichen darf. Entsprechend herausfordernd war die Konzipierung einer Methode zur Positionierung des Sensors. Im Wesentlichen waren folgende Anforderungen zu erfüllen:

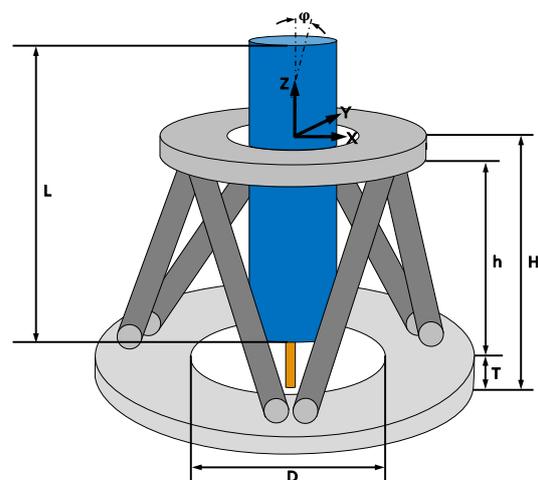
- Die Vermessungseinheit sollte möglich einfach und durch eine Person handhabbar sein, damit war ein geringes Gesamtgewicht des Systems anzustreben.
- Zur Überprüfung eines Schadensfalls oder zur stichprobenartigen Untersuchung von Bohrungen am Bauplatz des Endanwenders musste die Vermessungseinheit in sämtlichen Orientierungen arbeitsfähig sein. Daher musste die Einheit unter anderem eine entsprechende Steifigkeit aufweisen. Für Lageabweichungen unter dem Einfluss des Eigengewichtes galten enge Toleranzen. Weiterhin musste das System selbsthemmend sein, ein Kriechen über die Zeit war nicht tolerierbar.
- Das System musste aufgrund der Anwendungsfälle über Möglichkeiten verfügen sich am Bauplatz über einer Bohrung zu arretieren.
- Das gewählte Konzept musste zu der bereits genannten Positioniergenauigkeit von 50µm führen.

Es sind im Projektverlauf verschiedene Konzepte betrachtet worden, um die gestellte Anforderungen zu erzielen. Im Wesentlichen sind dabei die folgenden Ansätze hervorzuheben:

- Die im Fokus stehenden Bohrungen werden in weiten Teilen semi-automatisch ausgeführt, indem sich eine ADU in einer Schablone pneumatisch verriegelt, um die bei der Bohrung auftretenden Kräfte ableiten zu können. Ein mögliches Konzept sah daher vor, eine mechanische Schnittstelle zu schaffen, um die Vermessungseinheit in eben dieser Schablone auszurichten zu können. Bei nicht Vorhandensein einer Schablone wäre das Messsystem über diese Schnittstelle in eine Positioniereinheit eingesetzt worden. Diese Schnittstelle hätte die erreichbare Messtiefe des Gesamtsystems jedoch unverhältnismäßig eingeschränkt, daher wurde dieses Konzept frühzeitig verworfen. Weiterhin ist es als nachteilig bewertet worden, dass die Ausrichtung in diesem Ansatz einzig indirekt erfolgt, sodass manche denkbaren Fehlerfälle vor Durchführung einer Messung nicht zuverlässig geprüft worden wären und somit eine Beschädigung des Messsystems nicht auszuschließen war.
- Aus den vorausgegangen Überlegungen ist der Schluss gezogen worden, dass es vorteilhaft ist, die Positionierung direkt über die Bohrung durchzuführen. Da für die Bedienung des AeroScan-Systems aufgrund seiner Komplexität und der Gefahr einer Beschädigung ein geschulter und vorsichtiger Umgang nötig ist, wurde weiterhin festgehalten, dass die Durchführung einer Messung möglichst durch Automatisierung vereinfacht werden sollte. Daher entstand das Konzept einer Vermessungseinheit, welche eine Präzisionskinematik zur Positionierung des AeroScan-Sensors umfasste. Zur Ermittlung der anzufahrenden Position über der zu vermessenden Bohrung ist ein weiteres Messsystem angedacht worden. Die Auswahl dieses Messsystems wird in einem nachfolgenden Abschnitt beschrieben. In der Abbildung 3 werden die zwei Ansätze zur Gestaltung der Kinematik angeführt. Es ist eingeschätzt worden, dass die hier gezeigte serielle als auch die parallele Kinematik entgegen anderer Bauformen entweder auf dem Markt erhältlich wären oder mit vertretbarem Aufwand aus erhältlichen Komponenten konfigurierbar seien. Da die Gestaltung des Positioniersystems eng mit der Auswahl des Messsystems zur Positionsermittlung einherging, bedurfte es vor deren Gestaltung einer Festlegung auf ein Messprinzip zur Positionsfindung, welches im folgenden Abschnitt erläutert wird.



a) Serielle Kinematik



b) Parallele Kinematik

**Abbildung 3:** Kinematische Konzepte der Vermessungseinheit, © Fraunhofer

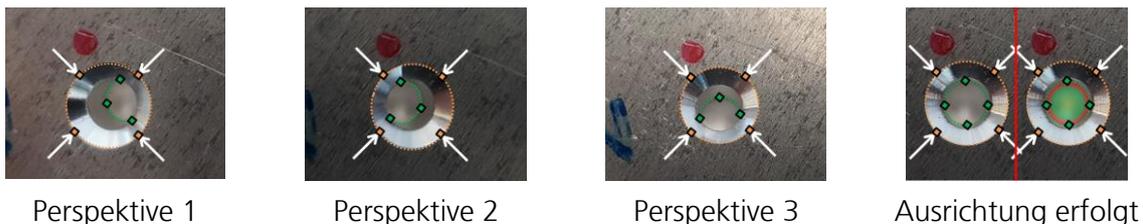
### Konzept und Entwurf der Positionsermittlung

Das für die Positionsermittlung eingesetzte Modul sollte in der Lage sein die Position und Ausrichtung einer betrachteten Bohrung direkt zu erfassen. Weiterhin sollten mit dem System möglichst viele Fehler- und Störgrößen vor der Durchführung einer Messung erkannt werden. So war es gewünscht eine Methode zu finden, die nicht nur die Positionierung über einer Bohrung im geforderten Toleranzbereich, sondern auch einen Plausibilitätscheck ermöglicht. So galt es zu prüfen, ob Hindernisse oder Verschmutzungen den Bohrungsdurchgang versperren und damit eine schadensbehaftete Kollision des Bohrungsvermessungssystems verursachen könnten.

Anhand der in Tabelle 1 angeführten Recherche konnten verschiedene, zunächst vielversprechende Lösungsansätze bereits ausgeschlossen werden:

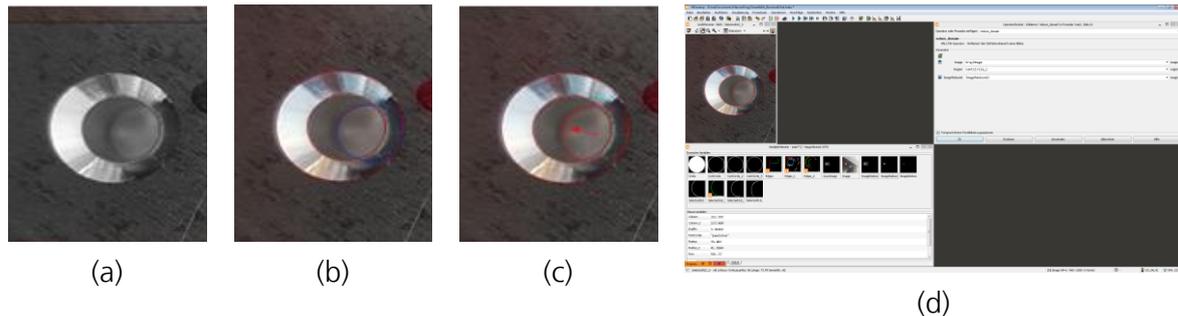
- Als erster Lösungsansatz ist die Einbindung eines einzelnen Laserlinien-Scanners zu nennen. Da dieser während der Messung jedoch definiert über das Messobjekt geführt werden muss, um ein unverzerrtes Abbild zu erzeugen und umfängliche Rotationsbewegungen zur Ausleuchtung der Bohrung nötig würden, ist der Implementierungsaufwand als eher hoch einzustufen. Als Ausschlusskriterium ist jedoch die geringe Messtiefe innerhalb der Bohrung identifiziert worden. Das System scheidet aus demselben Grund für die Positionierung aus: es kann einzig der Senkungsbereich, nicht aber der Bereich der Bohrung erfasst werden. Damit fände bei diesem Ansatz wiederum eine eher indirekte Ausrichtung über den Senkungsbereich statt. Weiterhin wäre eine Blockade in der Bohrung nicht detektierbar. Ein anfänglich betrachteter Aufbau mit zwei über Kreuz angebrachten Linienlaser-Scannern war daher ebenso auszuschließen, auch wenn diese den Vorteil mit sich gebracht hätten deutlich geringere Bewegungen zur Erfassung der Bohrung zu benötigen.
- Zusätzlich waren mit derselben Begründung Ansätze auszuschließen, die auf ein Stereo-Kamera-System zurückgreifen.

Damit waren die bekannten optischen Systeme ausgeschlossen, die eine 3D-Abbildung des Messobjektes erstellen. Weiterhin resultierte daraus die Erkenntnis, dass ein Mensch, würde man ihm diese Positionierungsaufgabe stellen, die Bohrung mit einem Auge betrachten und seine Ausrichtung so lange variieren könnte, bis die Kreismittelpunkte des Bohrungseintritts, des Übergangs der Senkung zur Bohrung und des Bohrungsaustritts ausreichend in einer Linie liegen. Mit diesem Blick in die Bohrung würde gleichzeitig der freie Durchgang und andere Kollisionsgefahren für den Bohrungsvermessungssensor direkt überprüft. Aus diesem Ansatz entstand das Konzept eines Algorithmus, der ausgehend von den Daten eines Mono-Kamerasystems die genannten Kreismittelpunkte ermittelt und eine Korrekturbewegung zur coaxialen Ausrichtung bestimmt. In Abbildung 4 wird das beschriebene Konzept beispielhaft anhand von Test-Bildern visualisiert, die mit einer Consumer-Kamera aufgezeichnet worden sind.



**Abbildung 4:** Konzept des Ablaufs zur Lagebestimmung, © Fraunhofer

Aus einer prototypischen Programmierung ist hervorgegangen, dass es für eine robuste, automatisierte Auswertung deutlich homogenere Abbildungen insbesondere des Senkungsbereichs bedarf. Während der Mensch trotz der Reflektionen auf der spiegelnden Oberfläche des Aluminiums klar die Außenkanten der genannten Kreise erkennt, stellt dies für ein Bildbearbeitungsprogramm eine gewisse Herausforderung dar. Die Filtereinstellungen welche zu dem in Abbildung 5 gezeigten Ergebnis geführt haben, wurden daher speziell auf das Beispiel zugeschnitten. Zur Auslegung eines Kamerasystems wurden anschließend weitere Versuchsreihen durchgeführt. Insbesondere durch eine gleichmäßigere Beleuchtung sollte dabei die Zuverlässigkeit des Verfahrens wesentlich erhöht werden.



**Abbildung 5:** Versuchsergebnis der kamerabasierten Lagebestimmung , a: Ausgangsbild, b: Übergänge detektiert und Kreise berechnet, c: Bestimmung der Bohrungsachse erfolgt, d: Programmierumgebung, © Fraunhofer

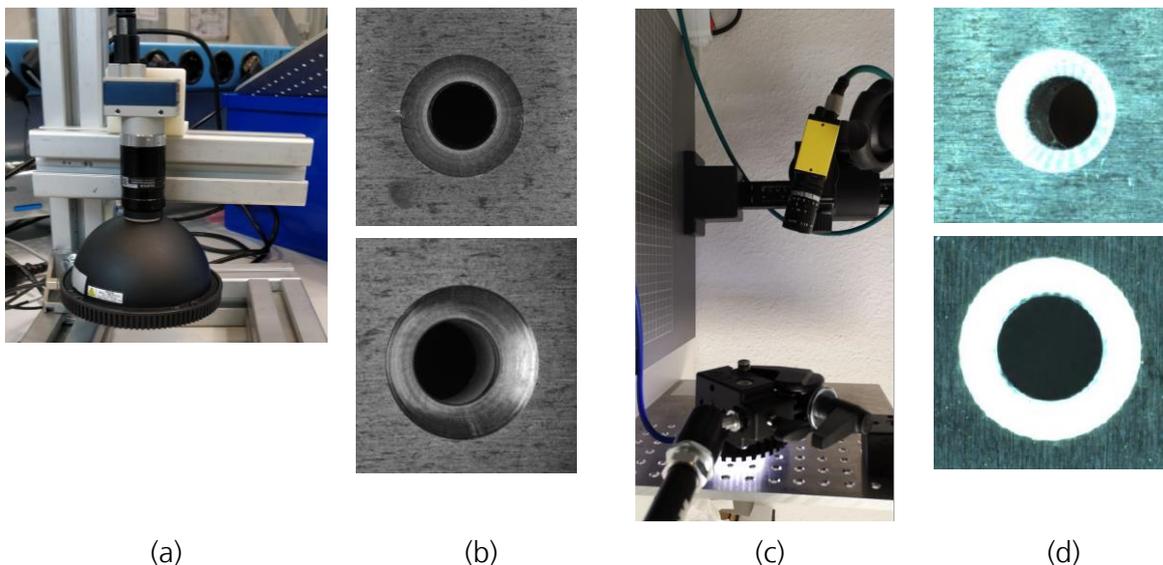
#### Machbarkeitsuntersuchungen zur kamera-basierten, initialen Positionsbestimmung

Das auszulegende Kamerasystem bestand aus einer Kamera, einem Objektiv und einem Beleuchtungssystem. Die Auswahl des Kamerasystems konnte im Wesentlichen über die, für einen automatisierten Prozess benötigten, Schnittstellen und deren Auflösung getroffen werden. Dabei konnte die benötigte Auflösung anhand der anvisierten Positioniergenauigkeit abgeschätzt werden, folglich sind Kamerasysteme mit einer Auflösung von 4 MP betrachtet worden. Für die Auswahl eines Objektivs waren insbesondere die Forderung nach einer hohen Abbildungsgüte, einem möglichst geringen Mindestmessabstand und einer geringen Unschärfe innerhalb des Messbereiches ausschlaggebend. Die Kamera und das Objektiv ließen sich damit sehr gut anhand des anvisierten Messaufbaus auswählen. Die Auswahl des Beleuchtungssystems musste jedoch hinsichtlich des spezifischen Anwendungsfalls getroffen werden. Die im Projekt untersuchten Materialien Aluminium, Titan und CFK weisen eine große Bandbreite an optischen Eigenschaften auf. Während Aluminium hell und reflektierend ist, gilt für CFK das genaue Gegenteil: es ist stark absorbierend und eher matt. Weiterhin stellte die Formgebung der untersuchten Senklochbohrungen einen zentralen Einflussfaktor dar. Aus der Vielzahl an Bauformen von Beleuchtungssystemen sind die zwei mit dem höchsten Erfolgspotential ausgewählt und untersucht worden. In Abbildung 6 sind die entsprechenden Versuchsaufbauten zur Feststellung der Eignung einer Dom-Beleuchtung und einer Dunkelfeldbeleuchtung dargestellt.

Eine Dom-Beleuchtung besteht üblicherweise aus einer matten Halbkugelschale, die von einem Beleuchtungsring erhellt wird. Das emittierte Licht trifft zunächst auf die matten Oberfläche und wird an dieser diffus reflektiert bevor es auf das auszuleuchtende Objekt trifft. Dom-Beleuchtungen erzeugen durch dieses Prinzip ein allseitig-gleichmäßig diffuses Licht, das Objekt wird folglich

sehr gleichmäßig und mit nur mit geringer Schattenbildung beleuchtet. Diese homogene Beleuchtung versprach daher besonders geeignet zu sein, eine Senklochbohrung dahingehend gleichmäßig auszuleuchten, dass die zuvor beschriebenen Spiegelungen und Reflektionen nicht in der beobachteten Form eine automatisierte Auswertung beeinflussen. Aus den Versuchen mit einer full-colour-Variante einer Dom-Beleuchtung ging hervor, dass die Farbe des eingesetzten Lichtes nahezu keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Dies gilt sowohl für Untersuchungen an CFK als auch an Aluminium. Der Aufbau wird in Abbildung 6 (a) gezeigt. Die Erwartungen an eine spiegelungsfreie Ausleuchtung konnten jedoch nicht erfüllt werden. Wie in der Abbildung 6 (b) zu erkennen ist, stellten sich bei nicht konzentrischen Betrachtungswinkel sehr variierende Helligkeitsverläufe innerhalb der Abbildung der Senkung ein. Diese sind als störend für eine automatisierte Auswertung eingeschätzt worden.

In einer zweiten Versuchsreihe ist der Einsatz einer Dunkelfeldbeleuchtung untersucht worden. Diese Beleuchtungsart besteht aus einem Ring von Beleuchtungselementen, die in einem sehr flachen Winkel nach innen ausgerichtet sind. Durch diese Anordnung wird es ermöglicht Störkonturen, wie Kanten, Kratzer oder andere Oberflächendefekte, in der Abbildung hervorzuheben. Während das emittierte Licht an den nicht gestörten Flächen flach reflektiert wird und damit nicht in Richtung der Kamera weitergeleitet wird, kommt es an Defekten zu multidirektionalen Reflektionen, die auch in die Kamera gelangen. Durch dieses Prinzip lassen sich Übergangsflächen und Defekte selektiv hervorheben. In der Abbildung 6 (c,d) werden der Versuchsaufbau und das an Aluminium erzielte Ergebnis gezeigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz einer Dunkelfeldbeleuchtung auch bei einer Schrägstellung der Kamera zu einem sich deutlich in der Abbildung abzeichnenden Senkungsbereich führt. Aufgrund dieses hohen Kontrastes ist die Machbarkeit der zuvor definierten Aufgabe unter Verwendung einer Dunkelfeldbeleuchtung als positiv bewertet worden und später ein entsprechendes System beschafft worden.



**Abbildung 6:** Versuchsaufbauten zur Kamera-basierten Positionsbestimmung einer Bohrung: a) Versuchsaufbau mit Dom-Beleuchtung b) Typische Ergebnisse (Dombeleuchtung) c) Versuchsaufbau (Dunkelfeldbeleuchtung) d) Typische Ergebnisse (Dunkelfeldbeleuchtung) © Fraunhofer

### Entwurf der Positionierungseinheit

Ausgehend von den Konzepten für die Positionierung des Bohrungsvermessungssensors konnte nun, nach Festlegung der Methode zur messtechnischen Ermittlung der Bohrungsposition, der Entwurf der Positionierungseinheit ausgearbeitet werden.

Basierend auf den Anforderungen an das Gesamtsystem ist zunächst die Verfügbarkeit geeigneter Kinematiken anhand einer vorausgegangenen Marktrecherche überprüft worden. Hauptausgangskriterien waren dabei:

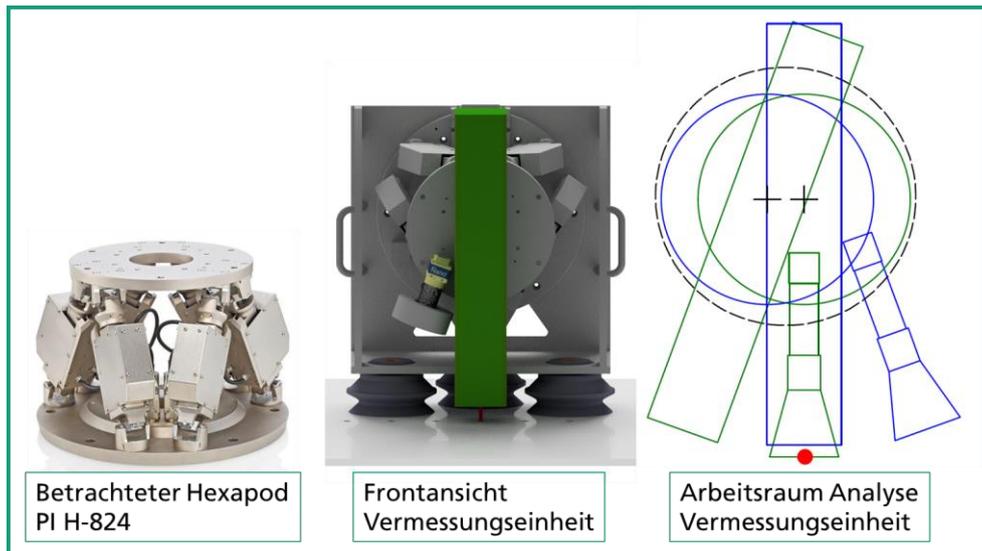
- eine ausreichend großer Stellraum zur Durchführung der Messaufgabe,
- ein ebenso ausreichend hohe Positioniergenauigkeit und Steifigkeit,
- sowie einem möglichst geringen Eigengewicht bei Gewährleistung der nötigen Tragkraft.

Es fand sich dabei kein System, das sämtliche Punkte zur vollsten Zufriedenheit erfüllen konnte. Daher ist auch eine Konfiguration des Positioniersystems aus verschiedenen Linear- und Rotationsmodulen näher untersucht worden. Diese Auslegung der Einheit baute auf dem ersten Entwurf einer kartesischen Einheit auf und schloss mit dem Ergebnis ab, dass eine Umsetzung in dieser Bauart bei Verwendung von zukaufbaren Positionier- und Schwenksystemen zu einer deutlich zu hohen Gesamtmasse des Systems geführt hätte. Dieses Ergebnis legte neue Rahmenbedingungen bei der Gestaltung der Vermessungseinheit fest, da bislang der Wunsch bestand ein deutlich niedrigeres Zielgewicht zu erreichen.

Da zuvor bereits identifiziert werden konnte, dass Parallel-Kinematiken sämtliche Anforderungen erfüllten, dabei jedoch einzig ein höheres als zuvor angestrebtes Eigengewicht aufweisen, rückte die Verwendung eines Hexapod-Systems in den Fokus. Die Verwendung eines Hexapoden verband dabei folgende Vorteile:

- Anstatt mehrerer Systeme (mindestens eine XY-Einheit und zwei Schwenkeinheiten), die zueinander vermessen werden müssen, kann auf ein einziges, kalibriertes System zurückgegriffen werden. Der Integrationsaufwand reduziert sich drastisch.
- Die Auslegung der Einheit vereinfacht sich.
- Die Gesamtmasse aller Systeme fällt nicht größer aus als bei einer kartesischen Einheit.
- Der Anschaffungspreis eines Hexapoden ist zu dem kartesischen Entwurf nach dem aktuellen Kenntnisstand geringer.
- Das Konzept lässt sich leichter auf größere Messräume übertragen.

In einer Machbarkeitsstudie konnte zudem aufgezeigt werden, dass das Kamerasystem und der Bohrungsvermessungssensor so auf einem Hexapoden angebracht werden können, dass die übergeordnete Messaufgabe erfüllbar ist. In Abbildung 7 werden der betrachtete Hexapod, eine Frontalansicht des derzeitigen Entwurfes des Vermessungseinheit (unter Verwendung eines PI-Hexapods) und eine Zeichnung zur Analyse des Arbeitsraumes gezeigt. In der Zeichnung werden die zwei zur Messung benötigten Grundstellungen des Hexapods überlagert in den Farben grün und blau dargestellt. Der rote Punkt in der Zeichnung stellt den Mittelpunkt der Bohrung am Eingang dar. In der ersten Stellung (grün) ist die Kamera (wie auch in der Frontansicht) lotrecht über der Bohrung ausgerichtet. Es konnte gezeigt werden, dass die zweite Ausrichtung des Hexapods (blau) in der, der Bohrungsvermessungssensor zur Bohrung ausgerichtet ist, innerhalb der Bewegungsfreiheit der Kinematik erreicht werden kann und genügend Bewegungsmöglichkeit zur Justierung verbleibt. Nach Abschluss dieser Machbarkeitsstudie ist ein entsprechendes System beschafft worden.

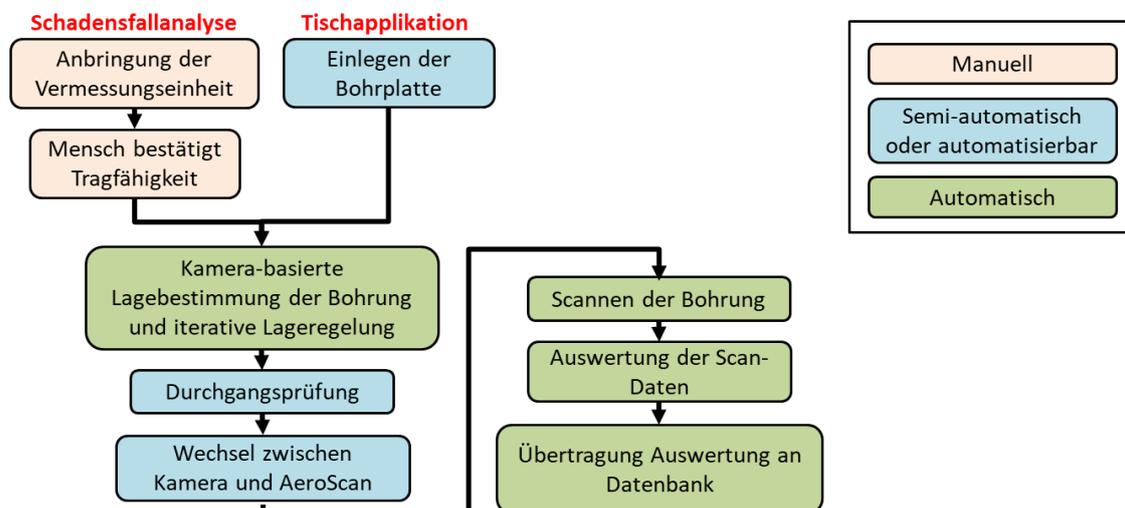


**Abbildung 7:** Arbeitsraumanalyse eines geeigneten Hexapoden, © Fraunhofer

Es waren die folgenden Arbeitsschritte im Messvorgang vorgesehen:

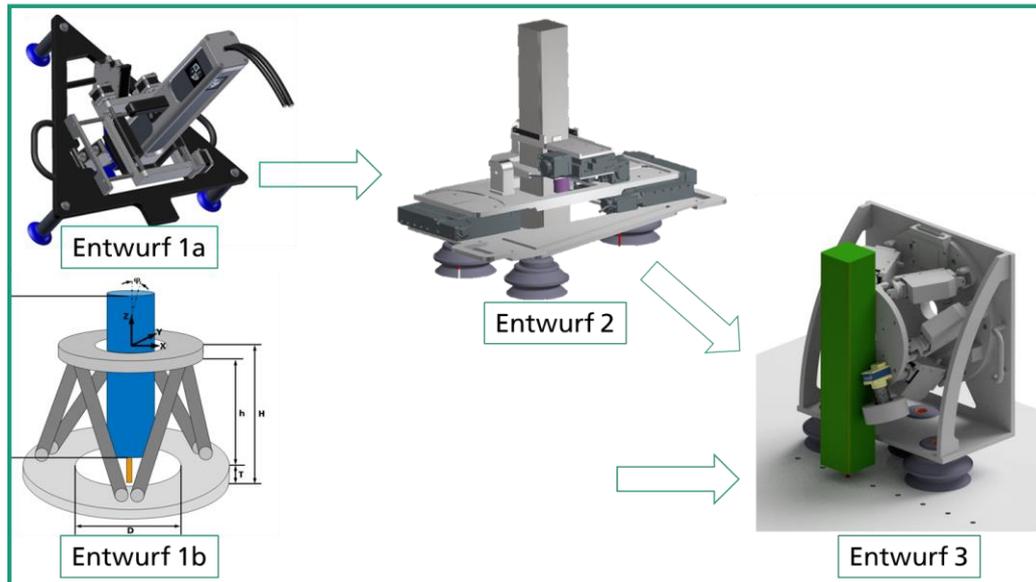
1. Die Vermessungseinheit wird händisch, grob positioniert über der Bohrung angebracht
2. Die Kamera wird durch die Kinematik auf die Bohrung ausgerichtet
3. Iterativ ermittelt das Kamera-basierte Positionsbestimmungssystem die relative Lage und Ausrichtung der Bohrung. Es werden Korrekturbewegungen errechnet und ausgeführt bis die Kamera konzentrisch über der Bohrung ausgerichtet ist.
4. Die Kinematik richtet nun den Bohrungsvermessungssensor fluchtend über der Bohrung aus.
5. Die Vermessung der Bohrung wird durch den Bohrungsvermessungssensor durchgeführt.
6. Es erfolgt eine Auswertung der Messergebnisse.
7. Die Messergebnisse werden an eine zentrale Datenbank weitergegeben.

In der nachfolgenden Abbildung 8 wird der final umgesetzte Prozess als Ablaufdiagramm visualisiert.



**Abbildung 8:** Ablaufdiagramm der Vermessungseinheit, © Fraunhofer

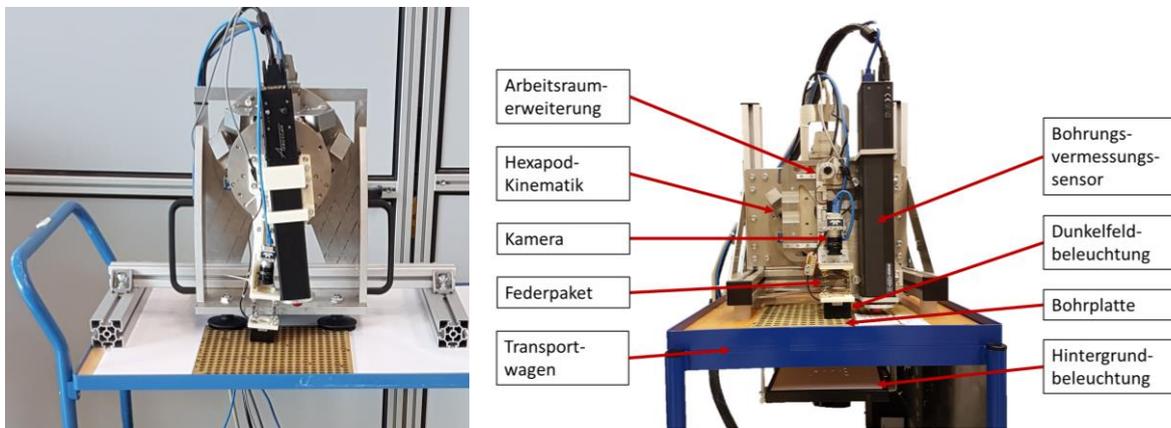
In Abbildung 9 wird eine Übersicht über die fortschreitende Konzeptentwicklung und die resultierenden Entwürfe der Vermessungseinheit gegeben. Da nun sämtliche Hardware-Komponenten zur Umsetzung der Teilfunktionalitäten ausgelegt waren, konnte mit der Ausgestaltung und Umsetzung des Gesamtsystems begonnen werden.



**Abbildung 9:** Evolution der Vermessungseinheit, © Fraunhofer

Gestaltung und Umsetzung der Vermessungseinheit

In Abbildung 10 (a) wird der erste Aufbau der Vermessungseinheit gezeigt, der das zuvor beschriebene Konzept direkt umgesetzt hat und alle Teilkomponenten in einem Gesamtsystem vereinigt. Im Zuge der Gesamtinbetriebnahme sind Verbesserungspotentiale und Probleme des Aufbaus identifiziert worden. Es erfolgte eine Anpassung des Systems, mit dem Ziel den Arbeitsraum des Messsystems zu erweitern, da für die Inbetriebnahme und die Validierung des Systems größere Arbeitsräume benötigt worden sind, als es der zur Auslegung herangezogene Endanwendungsfall hergibt. Dieser finale Aufbau wird in Abbildung 10 (b) dargestellt. Neben der Einführung einer linearen Arbeitsraumerweiterung ist das System um eine Hintergrundbeleuchtung erweitert worden, um die Robustheit der Kamera-basierten Positionsbestimmung zu steigern.

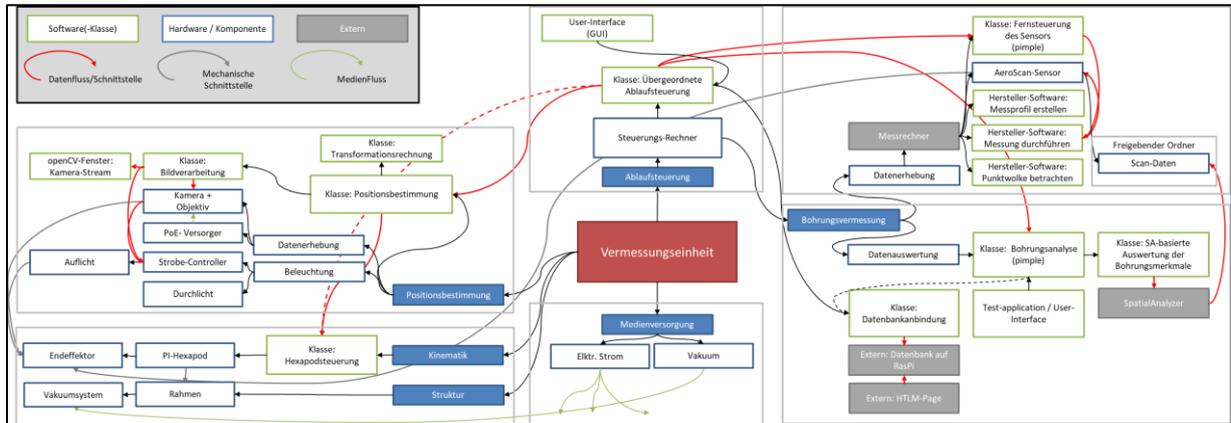


(a) Aufbau Vermessungseinheit am 30.4.2019

(b) Finale Umsetzung der Bohrungsvermessungseinheit am 26.11.2019

**Abbildung 10:** Umsetzung der Vermessungseinheit, © Fraunhofer

Im Anschluss der Montage der Vermessungseinheit konnte die Gesamtablaufsteuerung erprobt werden, diese ist aus der Zusammenführung der einzelnen Teilmodule hervorgegangen. In Abbildung 11 ist der Strukturplan der Vermessungseinheit für sämtliche Hard- und Softwarekomponenten aufgeführt. Diese waren vorab in C++ erstellt und simultan zur Erprobung des Gesamtsystems optimiert worden.



**Abbildung 11:** Strukturplan der Vermessungseinheit, © Fraunhofer

### Umsetzung der Ausrichtung der Messeinheit zur Bohrung

Der Kamera-basierten Positionsbestimmung ist die Umsetzung sämtlicher zur Datenaufnahme benötigter Teilmodule vorausgegangen. Es waren Schnittstellen zur Ansteuerung der Beleuchtung sowie zur Einbindung der Kamera und zur Ansteuerung der Hexapod-Kinematik in C++ umzusetzen.

Die Bestimmung der relativen Bohrungsposition aus den Kamerabildern erfolgte in einem iterativen Verfahren in dem zunächst der Sichtbereich der Kamera nach runden Konturen gefiltert wird. Der Messablauf sah es vor, die am weitesten mittig liegende Bohrung zu vermessen. Anschließend erfolgte anhand der relativen Mittelpunktlage des Bohrungseintritts und des Bohrungsaustritts, die Berechnung einer Korrekturbewegung des Hexapoden. Ein Versatz zwischen den Mittelpunkten deutet dabei auf eine rotatorische Abweichung hin, ein Versatz zwischen dem Bildmittelpunkt und den Kreismittelpunkten ist auf eine translatorische Abweichung zurückzuführen. Anhand der Auswertung der Bildschärfe kann auf den Abstand zwischen Kamera und Bohrung geschlossen werden. Die berechnete Korrekturbewegung wird entsprechend von der Gesamtablaufsteuerung ausgeführt. Im Zuge der Erprobung der beschriebenen Methode hat sich die bereits erwähnte Notwendigkeit einer austrittsseitig angebrachten, Hintergrundbeleuchtung herausgestellt, da diese den Kontrast des Bohrungsaustritts im Bild deutlich erhöht. In der folgenden Abbildung 12 werden das Ablaufdiagramm des beschriebenen Algorithmus, das Ergebnis der automatisierten Bilderkennung sowie ein Diagramm über den Zusammenhang zwischen der Tiefenschärfe und des Messabstandes aufgeführt. Nach der automatisch ausgeführten Positionierung des Systems über der Bohrung ist die Freigabe durch einen Menschen vorgesehen. Dieser Schritt kann perspektivisch bei einer Weiterentwicklung des Systems entfallen.



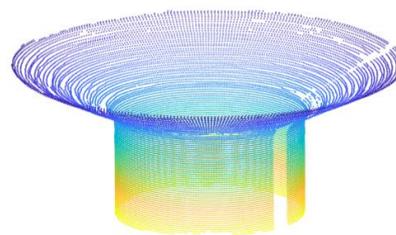
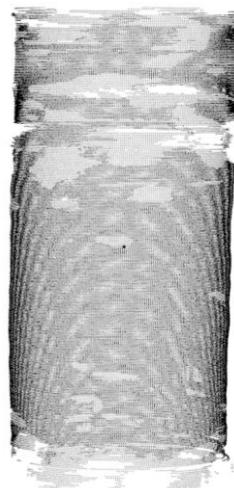
**Abbildung 12:** Ablaufdiagramm der Kamera-basierten Positionsbestimmung, © Fraunhofer

### Umsetzung der Vermessung von Bohrungen

Für die Umsetzung einer automatisierten Messanwendung war es zunächst erforderlich das Messsystem näher kennenzulernen und den manuellen Messablauf nachzuvollziehen. Daher sind Versuche mit dem AeroScan-Sensor durchgeführt worden, welche die optimale Einstellung der Messparameter des Sensors für Musteranwendungen zum Ziel hatten, um diese später in einem automatisierten Einsatz anzuwenden. Es hat sich gezeigt, dass die Qualität einer manuell ausgeführten Messung sehr stark von der Erfahrung des Anwenders abhängig war. Messreihen waren häufig lückenhaft und die Bedienung des Systems war nicht trivial. Die angestrebte Automatisierung des Messvorgangs war daher der richtige Weg, um den Schulungsaufwand zur Verwendung des Systems zu reduzieren und damit neue Anwendungen des Systems außerhalb eines Speziallabors zu erschließen. In Abbildung 13 werden ein Aufbau zur manuellen Erfassung von Messdaten und beispielhafte Messergebnisse gezeigt.



Versuchsaufbau zur manuellen Verwendung des Messgerätes

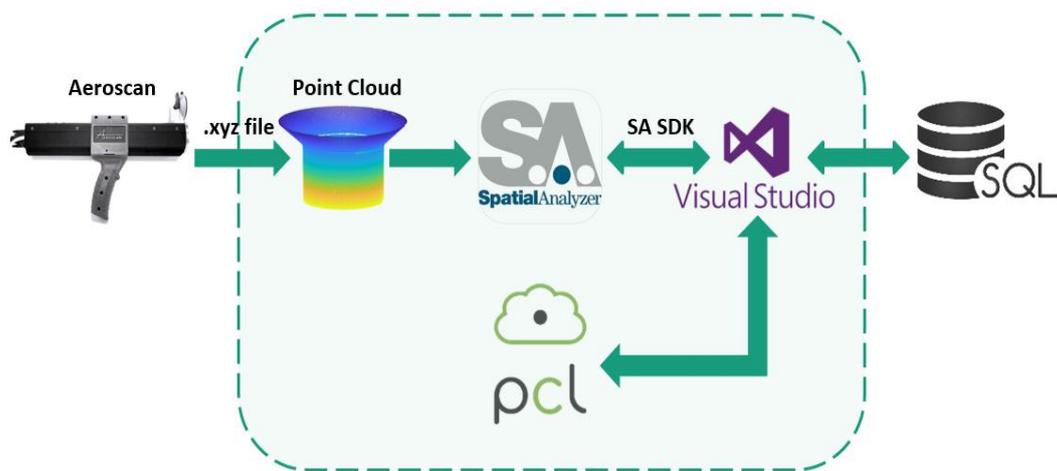


Beispielhafte Messergebnisse

**Abbildung 13:** Versuchsaufbau und Messergebnisse des Bohrungsvermessungssensors

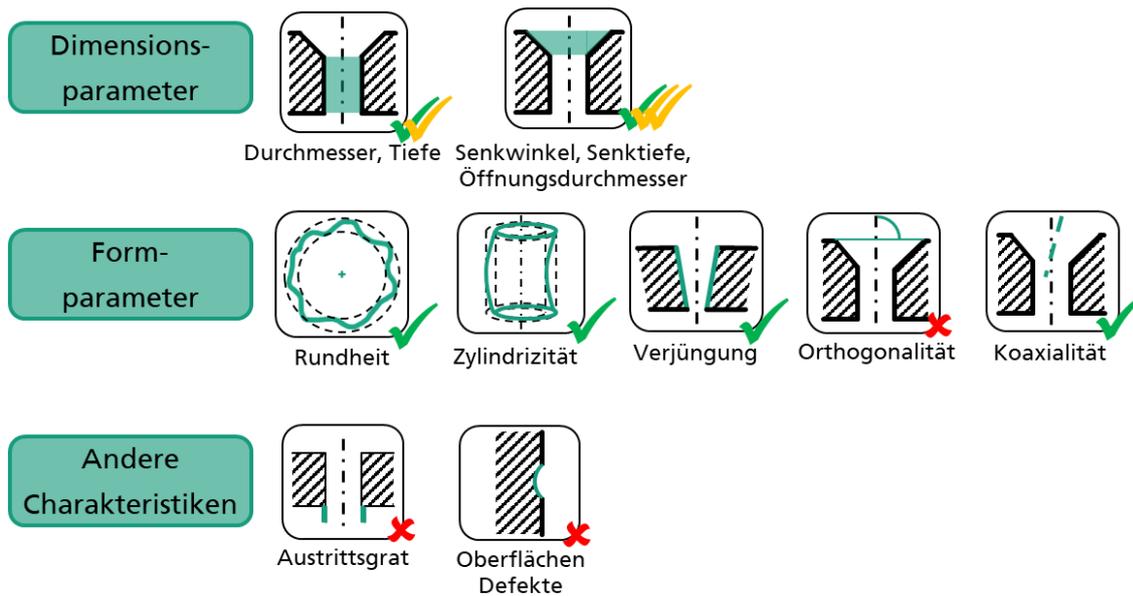
Als besondere Herausforderung bei der Umsetzung einer C++-basierte Schnittstelle zur automatisierten Verwendung des Sensors stellte sich das Fehlen eines nativ unterstützten Interfaces heraus. Die entwickelte Schnittstelle bildet daher im Wesentlichen die Eingaben einen Menschen an das GUI des Sensors ab. Über diese Schnittstelle kann die Gesamtablaufsteuerung Messungen ausführen.

Seitens des Herstellers wird direkt nach einer Messung bereits eine Vorauswertung der Messdaten vorgenommen. Es ist jedoch nicht möglich eine Punktwolke erneut auszuwerten oder weitergehende Einstellung der Auswertung zu ändern. Insbesondere bei einer fehlerhaften Auswertung ist es somit nicht möglich diese durch den Menschen begleitet zu wiederholen. Es sind daher intensive Arbeiten zur Umsetzung einer, auf den Anwendungsfall zugeschnittenen, Auswerteroutine durchgeführt worden. In Abbildung 14 wird die Software-Architektur der Anwendung dargestellt.



**Abbildung 14:** Architektur der Applikation zur Analyse der Bohrungsvermessungsdaten, © Fraunhofer

Der Bohrungsvermessungssensor erzeugt bei jeder Messung eine ASCII-formatierte 3D-Punktwolke über die Scandaten der Bohrung. Diese wird über die Verwendung des SDK in SpatialAnalyzer importiert. Hier sind verschiedene Ansätze zur Segmentierung der Messdaten umgesetzt worden. Dabei konnte ein CAD-Bestfit-basiertes Verfahren mit einer eigenentwickelten Methode zur geometrischen Aufteilung der Messdaten gegenübergestellt werden. Es wurde gezeigt, dass sich das geometrische Verfahren robuster gegenüber verschiedenen Einflussfaktoren und Formabweichungen der untersuchten Bohrung verhält und daher verlässlichere Aussagen trifft. Aufbauend auf der Segmentierung der Messdaten werden die in der Messaufgabe definierten Qualitätsmerkmale der Bohrung nach ISO 14405 ausgewertet. Dabei ist für jedes Merkmal eine Analyse-Routine erstellt worden. In **Abbildung 15** wird eine, aus Validierungsversuchen abgeleitete, Einschätzung der Messfähigkeit des Systems bezüglich verschiedener Qualitätsmerkmale einer Bohrung dargestellt.



**Abbildung 15:** Bewertung der Überprüfbarkeit verschiedener Merkmale mit der Vermessungseinheit, © Fraunhofer

Wie aus der vorausgehenden Abbildung hervorgeht, könnten viele Charakteristiken von der eingesetzten Vermessungseinheit sehr gut, manche eingeschränkt und andere Merkmale nicht beurteilt werden. Ausschlaggebend war das dem Bohrungsvermessungssensor zugrundeliegende Messverfahren sowie die Zuverlässigkeit der Datenerfassung. Merkmale, die auf Messbereiche aus den Inneren der Bohrung zurückführbar sind, konnten sehr gut ermittelt werden. Hierunter fallen der Bohrungsdurchmesser, der Senkwinkel, die Rundheit, die Zylindrizität, der Verjüngungswinkel und die Koaxialität zwischen Senkung und Bohrung.

Dagegen waren Merkmale, die anhand von Übergängen wie dem Bohrungseintritt oder Bohrungsaustritt definiert sind, nur bedingt bzw. mit unzureichender Messgenauigkeit bestimmbar. Der Bohrungsvermessungssensor führt bei jeder Messung zunächst einen Pre-Scan der Bohrung aus; dabei werden Belichtungsparameter eingestellt und der Bohrungseintritt, sowie Bohrungsaustritt ermittelt. Eine im Messsystem integrierte Filterung bestimmt, ab welcher Messtiefe erstmalig in mehr als der Hälfte des Messbereiches Messpunkte aufgenommen werden und ab welcher Messtiefe schließlich nur noch die Hälfte des Messbereiches ausgefüllt ist. Diese Messtiefen werden daraufhin als Bohrungseingang und –ausgang definiert. Es werden einzig die Messwerte dazwischen aufgezeichnet; sämtliche vorherigen oder nachfolgende Messwerte stehen für eine Auswertung nicht zur Verfügung. Da es an den Übergangskanten häufig zu störenden Reflektionen kommt, unterliegt diese Bestimmung einer gewissen Schwankung. Merkmale, die sich an der Eintritts- oder Austrittsöffnung der Bohrung bemaßen, sind daher als eher ungenau einzustufen. Darunter fallen die Tiefe einer Bohrung, die Tiefe einer Senkung und der Durchmesser der Senkung am Eintritt. Weiterhin ist es aufgrund der beschriebenen Filterung nicht hinreichend möglich gewesen die Orthogonalität der Bohrung zur Oberfläche zu bestimmen, da die Oberfläche mit dem Sensor nicht erfasst worden ist und eine indirekte Schlussfolgerung aufgrund der genannten Reflektionen im Übergangsbereich verhindert wurde.

Weiterhin war die Detektierung eines Austrittsgrates mit dem System nicht möglich. Ein Ringgrat kann aufgrund der innerhalb der Bohrung ausgeführten Vermessung nicht detektiert werden, da

dieser wie ein Teil des Bohrungskanals erscheint. Ein Kronengrat wird hingegen aufgrund der zuvor genannten Einschränkungen bei der Vermessung nicht zuverlässig erfasst.

Die Detektion von Oberflächen-Defekten konnte nur unzureichend durchgeführt werden. Wie Versuchsreihen an schadhafte Bohrungen gezeigt haben, traten zwar an Defekten vermehrt Messlücken aufgrund von Reflektionen auf, da aber auch an anderen Stellen Messlücken auftraten, konnte aus einer Messlücke nicht zweifelsfrei auf einen Defekt geschlossen werden. Ähnliche Effekte waren im Übergangsbereich zwischen Bohrung und Senkung zu beobachten. Hier besteht ein herstellerseitiges Verbesserungspotential zur Optimierung der Erfassung von Messdaten an Defekten und Übergängen.

Trotz der genannten Einschränkungen ist das eingesetzte System, die beste bekannte Lösungsvariante für die vorliegende, sehr komplexe Messaufgabe.

#### Umsetzung der Anbindung an das übergeordnete Datenbanksystem

Die aus den Messdaten abgeleiteten Charakteristiken der Bohrungsgüte wurden nach der Auswertung an eine zentrale Datenbank übermittelt. Die nähere Beschreibung dieser Datenbank wird im nachfolgenden Kapitel über das HAP 2 gegeben.

### **6.3 HAP 2: Prozessintegrierte Bohrungsidentifikation/Datenübertragung**

#### **6.3.1 AP 2.4: Datenaustausch (HW, SW) mit Vermessungseinheit für bohrungsindividuelle Qualitätsdaten**

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es gewesen, die mit der Vermessungseinheit gewonnenen Messdaten und Auswertungen in einer derartigen Form zu speichern, dass diese jederzeit einer spezifischen Bohrung zugeordnet werden können. Der dahinterstehende Gedanke der Digitalisierung und Vernetzung führt zu einer durchgängigen und konsequenten Dokumentation von Messdaten und dient der allgemeinen Qualitätssicherung. Durch die Verknüpfung und digitale Speicherung von Daten wird es ermöglicht Störfälle deutlich besser zu identifizieren und zu rekonstruieren. Seitens des Projektpartners IPMT der TUHH ist zu diesem Zweck eine Datenbank umgesetzt worden, die als zentraler Datenknoten im Projekt SmartADU2020 diene.

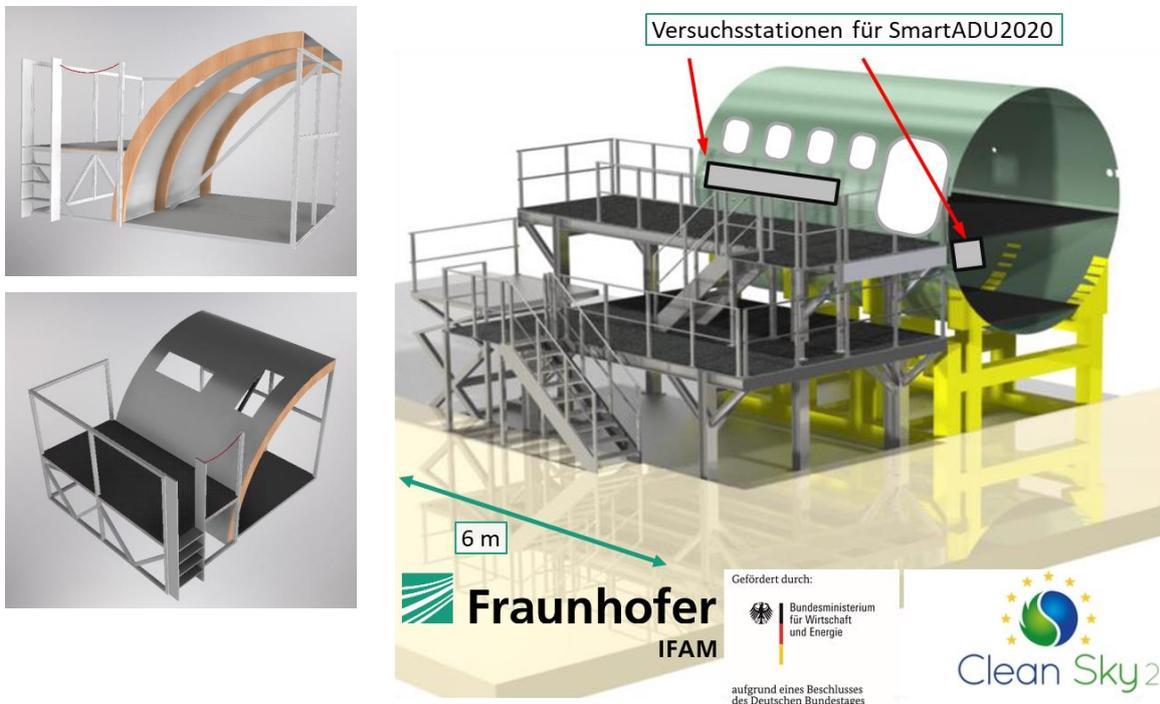
Das Fraunhofer IFAM hat eine Anbindung der Vermessungseinheit an die zentrale Datenbank in Form eines C++-Moduls umgesetzt. In enger Absprache mit dem Projektpartner ist das Datenmodell der Vermessungseinheit abgestimmt worden. Im besonderen Fokus standen hier die zuvor beschriebenen Bewertungskriterien, die aus der Analyse der 3D-Punktewolke des Bohrungsvermessungssensors abgeleitet werden. Weiterhin erfolgte eine Dokumentation der Ablage der Rohdaten. Die Zuordnung der individuell und von verschiedenen Systemen aufgezeichneten Mess- und Prozessdaten in der Datenbank zu den jeweiligen Bohrungen erfolgt durch die Verknüpfung der Vermessungseinheit mit einem Ultraschall-basierten Positionsüberwachungssystem des Projektpartners Sarissa. Diese Verknüpfung von Messdaten aus verschiedenen Systemen verspricht auch zukünftig große Synergie-Effekte.

## 6.4 HAP 5: Idealisierte Bauteilumgebung M 1:1

### 6.4.1 AP 5.1: Versuchsumgebung für Flugzeugmontage

Das Fraunhofer IFAM stand am Beginn des Projektes vor der Herausforderung mit nur sehr geringen, dem Projekt zur Verfügung gestellten, finanziellen Mitteln eine Demonstrationsumgebung im Maßstab 1:1 für den Anwendungsfall des Bohrens im Bereich der Flugzeugstrukturmontage umsetzen zu müssen. Der, in Abbildung 16 (a) gezeigte, erste Entwurf der Demonstrationsumgebung sah es daher vor ein Schalenelement mittlerer Größe aufzustellen und von verschiedenen Seiten zugänglich zu machen, um Bohrprozesse im Inneren und Äußeren abbilden zu können.

Während einer frühen Phase des Projektes kam auch in einem anderen, von der EU geförderten, Projekt der dringende Bedarf nach einem Rumpftonnen-Demonstrator in Single-Aisle-Maßstab am Fraunhofer IFAM Standort in Stade auf. Hier konnten Interessen gebündelt werden und es ist in Übereinstimmung mit den Projektpartnern die Vereinbarung getroffen worden, dass an dem entstehenden Rumpftonnen-Demonstrator auch Versuchsstationen für die Nutzung im Projekt SmartADU2020 vorgesehen werden. In Abbildung 16 (b) wird ein früher Entwurf des entsprechenden Rumpftonnen-Demonstrators gezeigt. Durch diese doppelte Nutzung konnte eine Versuchsumgebung in deutlich größerem Maßstab realisiert werden, als mit den eigentlich für das Projekt zur Verfügung stehenden Mitteln möglich gewesen wäre. Durch die Entscheidung den Rumpftonnen-Demonstrator für die Technologieerprobung in Bauteilumgebung (gemäß AP 5.2) zu nutzen, hat sich allerdings der Termin der Zurverfügungstellung der Versuchsumgebung verzögert.



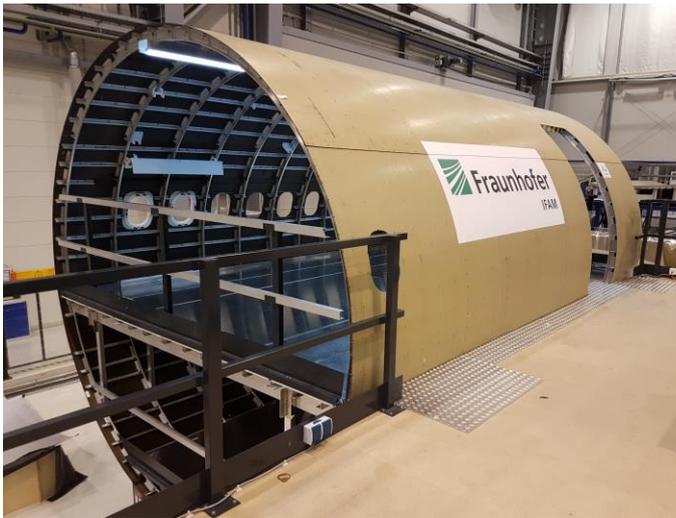
(a) Erstes Konzept der Demonstrationsumgebung

(b) Entwurf des im Zuge von Clean Sky 2 umgesetzten Rumpftonnen-Demonstrators

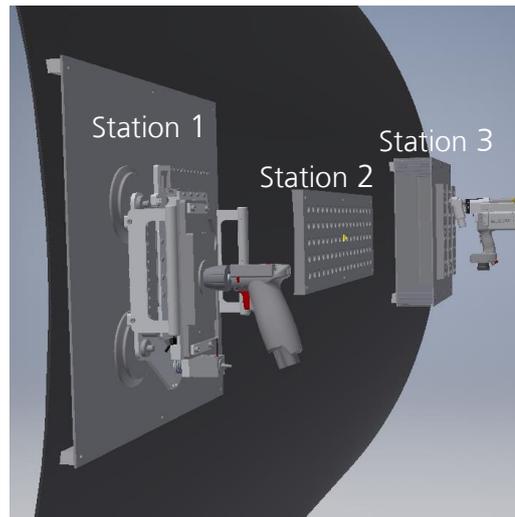
**Abbildung 16:** Konzeptionierung der Demonstrationsumgebung, © Fraunhofer

### 6.4.2 AP 5.2 Technologieerprobung in Bauteilumgebung

In Absprache mit den Projektpartnern sind drei Arbeitsstationen am Rumpftonnen-Demonstrator umgesetzt worden, an denen die technologischen Entwicklungen sämtlicher Partner mit einander erprobt werden konnten. In Abbildung 17 werden der Rumpftonnen-Demonstrator nach Fertigstellung und der finale Entwurf der Arbeitsstationen gezeigt. An den In Abbildung 17 (b) dargestellten Stationen konnte die im Projekt SmartADU2020 betrachtete Prozesskette in einem Durchgang von links nach rechts durchlaufen werden.



(a) Rumpftonnen-Demonstrator



(b) Entwurf der Arbeitsstationen

**Abbildung 17:** Konzeptentwurf der Arbeitsstationen, © Fraunhofer

In Abbildung 18 werden die Arbeitsstationen nach Fertigstellung am Rumpftonnendemonstrator präsentiert, die zur Technologieerprobung sämtlicher Partner am IFAM genutzt worden sind. An der Station 1 wurden optimierte Prozesse zum Übertragen von Pilotbohrungen dargestellt. Die Station bildet dazu den überlappenden Bereich einer Quernaht ab, wobei die hinten liegende Schale mit Vorbohrungen versehen ist, welche positionsgetreu zu übertragen sind. Durch die Verknüpfung mit der Positionsüberwachung des Projektpartners Sarissa, ist es dem Projektpartner IPMT gelungen die Pilotbohrungen von außen zu übertragen. Seitens der Partner ist eine Applikation zur Unterstützung des ausführenden Werkers erstellt worden, mit der die Positionierung des so genannten *Drill-Alignment-System* durch die visuelle Ausgabe von Positionierungshinweisen deutlich effizienter gestaltet werden konnte. Anschließend führte das *Drill-Alignment-System* die Detektion der verdeckten, zu übertragenden Pilotbohrung aus. Die Übertragung der Bohrung ist schließlich mit der, vom Projektpartner Lübbering entwickelten, manuellen Bohreinheit *SlimADU* und mit, vom Projektpartner Ceratizit entwickelten, Bohrwerkzeugen ausgeführt worden.

An der Arbeitsstation 2 stand die Verknüpfung der, vom Projektpartner Lübbering entwickelten, elektrischen, semi-automatischen Bohrvorschubeinheit *SmartADU* im Fokus. Zu diesem Zweck ist eine, vom assoziierten Partner Airbus zur Verfügung gestellte, Bohrschablone an den Rumpftonnendemonstrator angebracht worden. Nachdem die Pilotbohrungen übertragen sind, werden im betrachteten Anwendungsfall Bohrschablonen an der Außenseite der Rumpftonne angebracht, um das einzubringende Bohrmuster vollständig und auf Endmaß einzubringen. Die Bohrvorschubeinheit wurde dabei in die Bohrschablone manuell eingesteckt, verriegelt sich pneumatisch

**Schlussbericht des Partners Fraunhofer IFAM für das Verbundprojekt „SmartADU2020“**

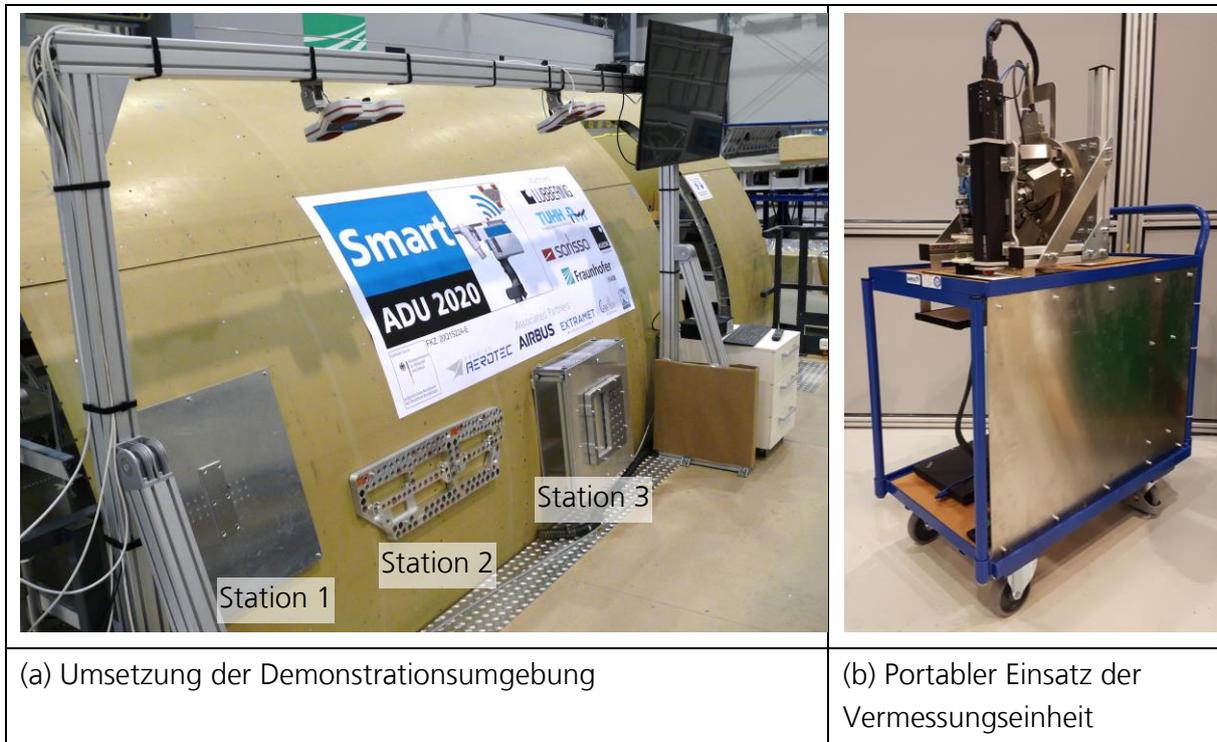
in dieser und führte anschließend die Bohrung automatisch aus. Durch die Verknüpfung der Bohrvorschubeinheit mit der Positionsüberwachung und der Datenbank ist es den Partnern gelungen, der Bohrvorschubeinheit positionsabhängig Bohrparameter festzulegen und Freigaben zu erteilen. Mit diesem Ansatz können viele Fehlerfälle, wie das mehrfache Ausführen einer Bohrung an derselben Position, verhindert werden. Weiterhin konnten Methoden zur online Prozessüberwachung durch die Partner erprobt werden.

Die Arbeitsstation 3 diente der wiederholten Durchführung von Bohrversuchen. Da die mittlere Station direkt an der Rumpftonne befestigt war, hätte hier nur eine sehr begrenzte Anzahl an Bohrungen tatsächlich durchgeführt werden können. Daher ist ein weiterer Versuchsstand umgesetzt worden, der sich dem manuellen und semi-automatischen Bohren widmete. Die Arbeitsstation bestand aus einem Kasten aus Plexiglas auf dem eine auswechselbare Probeplatte unter einer Bohrschablone eingefügt werden konnte.

Die vom Fraunhofer IFAM entwickelte Vermessungseinheit, welche bereits im vorausgehenden Kapitel ausführlich beschrieben wurde, konnte stations-unabhängig als portable Einheit verwendet werden.

Übergreifend zu den Arbeitsstationen wurden sämtliche Prozesse von Assistenzsystem *Quality-Assist* der Firma Sarissa begleitet.

Neben den hier nur auszugsweise vorgestellten, Entwicklungsergebnissen der Partner, sei für ergänzende Ausführungen an dieser Stelle ausdrücklich auf die korrespondierenden Veröffentlichungen der Partner verwiesen.



**Abbildung 18:** Finale Umsetzung der Demonstrationsumgebung an Fraunhofer IFAM in Stade, © Fraunhofer

## 7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Es folgt eine Auflistung, der wichtigsten Beschaffungsgegenstände die zur Durchführung des Projektes benötigt worden sind. Es wird darauf verzichtet kleinere Beschaffungen, wie Material-Posten, zu benennen. Der gesamte zahlenmäßige Verwendungsnachweis ist unter Profi-Online zu finden und wird durch das Controlling der FhG-Zentralverwaltung in München bearbeitet.

**Tabelle 2:** Lister über wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

<b>Position</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>1 Bohrungsvermessungssensor</b>	United Sciences, LLC: - Aeroscan measurement module with SMO model probe - Messrechner
<b>2 Präzisionskinematik</b>	Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG: - Hexapod-Mikroroboter: H-824.G2 - 6D-Controller: C-887.52
<b>3 Kamerasystem</b>	- Monochrom-Flächenkamera "DALSA GENIE NANO-M2020" - Objektiv "TAMRON M112FM25" - Dunkelfeld-Beleuchtung "CCS FPQ2-48-RD" + Steuergerät - Diffusbeleuchtung 15-15-Sled-1-VD-10w

Die, im Zuge des Projektes, angeschafften Gerätschaften verbleiben am Fraunhofer IFAM in Stade und werden einzig für die Durchführung weiterer Forschungs- und Entwicklungsprojekte eingesetzt. Eine anderweitige Verwendung ist ausgeschlossen.

## 8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Prozesse zur Vermessung von Bohrungen haben sich gegenüber dem, im Stand der Technik aufgeführtem Vorgehen, nicht verändert. Es gelten nach wie vor die beschriebenen Anreize zur Entwicklung einer einfach zu handhabenden, portablen Messeinheit. Die Überprüfung der Qualität ausgeführter Bohrungen, bzw. die Untersuchung und Bewertung von Bohrwerkzeugen, Parametersätzen, oder Bohreinheiten ist in den vergangenen Jahren gleichermaßen arbeitsintensiv geblieben.

Technisch ist das Feld der Vermessung von Senklochbohrungen derzeit nur bedingt abgedeckt, wie sich auch in der Marktrecherche über potentiell einsetzbare Sensoren bestätigt hat. Dafür spricht auch die Tatsache, dass auf dem Markt nur ein einziger Sensor erhältlich ist, der in der Lage ist ein möglichst vollständiges 3D-Abbild einer Senkbohrung zu erstellen und zudem noch von einem sehr kleinen Hersteller vertrieben wird. Dementsprechend hoch ist das technische Risiko bei der Entwicklung der portablen Vermessungseinheit einzuschätzen, da keine Vorbilder zur Verfügung standen, auf welchen hätte aufgebaut werden können. Damit wird die Beauftragung des Fraunhofer IFAM, welches sich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung sowie der Brückenbildung zwischen Industrie und Forschung verschrieben hat, zur Entwicklung einer solchen Einheit als angemessen und notwendig eingeschätzt. Ohne die Förderung im Zuge des

Projekt SmartADU2020 hätte eine derartige Entwicklung nicht ausgeführt werden können und wäre auch nicht an anderer Stelle ausgeführt worden. Dem Fraunhofer IFAM ist es somit gelungen einen wichtigen Impuls auf dem Gebiet der Bohrungsvermessung zu geben.

Sämtliche der eingesetzten Mittel sind sparsam und wirtschaftlich zum Erlangen der Projektziele eingesetzt worden. Als Beispiel dieser kosteneffizienten Herangehensweise sei die Kooperation mit anderen Projekten zur gemeinschaftlichen Nutzung des genannten Rumpftonnen-Demonstrators genannt. Weiterhin unterliegen die Beschaffungsvorgänge des Fraunhofer strengen Regeln zur Durchführung, um stets die Prüfung einer Beschaffung durch mehrere Personen und die Verhandlung eines angemessenen Preises zu garantieren. Durch den Einsatz fachlich versierter Mitarbeiter auf den Feldern der Projektkoordination, Messtechnik, Programmierung, Konstruktion und Fertigung konnten Aufgaben stets mit höchstem Wirkungsgrad umgesetzt werden. Da die Entwicklungstätigkeiten einzig bis zu einem, in Forschung und Entwicklung üblichen, Reifegrad ausgeführt worden sind, sind einzig die zur Evaluierung der Machbarkeit benötigten Aufwände entstanden.

## **9. Voraussichtlicher Nutzen**

Die Fraunhofer Gesellschaft ist ein gemeinnütziger, teils staatlich finanzierter Verein, dem es untersagt ist, eigene Produkte direkt zu vertreiben oder unmittelbar wirtschaftlich zu verwerten. Darüber hinaus hat sich die Fraunhofer Gesellschaft dazu verpflichtet eine Brücke zwischen Universität und Industrie zu bilden und die deutsche und europäischen Wirtschaft nachhaltig durch die Durchführung anwendungsorientierter Forschung zu stärken.

Das Fraunhofer IFAM konnte durch die Durchführung des Forschungsprojektes SmartADU2020 seine Kompetenzen im Bereich des Bohrens im Flugzeugbau ausbauen und wichtige Partnerschaften für weitere Projekte schließen. Die ausführende Abteilung Automatisierung und Produktionstechnik in Stade hat dabei wertvolle Einsichten in den Themenbereich gewinnen können, die sich, über dem in Projekt betrachteten Anwendungsfall des manuellen und semi-automatischen Bohrens hinaus, auch auf Anwendungsfälle des automatisierten Bohrens übertragen lassen. Ein Schwerpunkt der Abteilung lag in den vergangenen Jahren auf der Roboter-basierten Umrisssbearbeitung von CFK-Großbauteilen. Das gewonnene Know-How im Themenfeld des Bohrens ergänzt sich gut mit dem bestehenden Wissen und wird künftig dazu beitragen Projekte mit dem Fokus auf automatisierte Bohrprozesse noch besser abbilden zu können. Es ergibt sich ein großes Potential Beratungsleistungen in diesem Fachgebiet anzubieten, da sowohl das manuelle als auch das semi-automatische Bohren vielfältig bei den Endanwendern in der Luftfahrtindustrie anzutreffen sind und ein unveränderter Bedarf nach Lösungen zur Vermessung und Qualitätsbetrachtung von Bohrungen gesehen wird. Daher werden künftig Beauftragungen zur Weiterentwicklung des Systems aus der Industrie und die Nutzung des Systems zur Durchführen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten angestrebt.

Weiterhin ist die gezielte wissenschaftliche Verwertung der generierten Projektergebnisse zur Steigerung der wissenschaftlichen Reputation und Sichtbarkeit ein zentrales Anliegen der Fraunhofer Gesellschaft, um so weiterhin starke Partner aus Industrie und Forschung zur Gestaltung von neuen Innovationen gewinnen zu können. Die Durchführung des Projektes SmartADU2020 hat es dem Fraunhofer IFAM außerdem ermöglicht, technisches und wissenschaftliches Nachwuchspersonal auszubilden und zu fördern. Es sind insgesamt vier wissenschaftliche Abschlussarbeiten

im Zuge des Projektes betreut worden und mehrere Hilfskräfte konnten ihre Fähigkeiten durch die Ausführung oft fordernder Aufgaben, insbesondere in den Bereichen der Programmierung, der angewandten Messtechnik und der Konstruktion in wesentlichem Maße ausbauen.

Nicht zuletzt, hat das Projekt auch zur Sicherung und Wertsteigerung von bereits getätigten Investitionen beigetragen und folglich einen wichtigen Beitrag zum Erhalt und dem zukunftsfähigen Ausbau des Standorts Stade bzw. des CFK NORD für den Luftfahrtbau geleistet. Weitere Punkte sind dem Erfolgskontrollbericht und dem Verwertungsplan zu entnehmen.

## 10. Bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Nach Abschluss des Projektes ist die Existenz einer weiteren Entwicklung zur Vermessung von Bohrungen bekannt geworden. In einer Bekanntmachung der, in Kanada ansässigen, Firma Novacam vom 13. März 2020 wird der Einsatz des Sensors *BoreInspect* zur Vermessung von Bohrungen beschrieben. Das System verwendet eine rotierende Sonde, die mit einem interferometrisch messenden Punktlaser ausgestattet ist [5]. Das System ist nach aktueller Kenntnis nicht selbst positionierend ausgeführt. Damit setzt sich die Entwicklung des Fraunhofer IFAM in einem entscheidenden Merkmal gegenüber der bekannt gewordenen Entwicklung ab.

## 11. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Als Forschungseinrichtung ist die Fraunhofer Gesellschaft in besonderem Maße auf eine öffentlichkeitswirksame Reichweite angewiesen, um die Sichtbarkeit in Unternehmen zu erhöhen und damit neue Projekte, Aufträge und Partner akquirieren zu können. Weiterhin wird großen Wert auf die Ausbildung und Förderung von Nachwuchs im wissenschaftlich-technischen Bereich gelegt und durch die Vergabe und Betreuung von studentischen Abschlussarbeiten gewährleistet.

Die erfolgten Veröffentlichungen, Auftritte und Abschlussarbeiten im Rahmen des Verbundprojektes SmartADU2020 sind nachfolgend tabellarisch aufgelistet. Weiterhin wird beabsichtigt eine wissenschaftliche Veröffentlichung der Validierungsergebnisse der Vermessungseinheit auf einer peer-reviewten Plattform herauszugeben.

**Tabelle 3:** Veröffentlichungen, Öffentlichkeitsarbeit und Abschlussarbeiten

Art	Autor	Titel	Abgabedatum
Kleine Studienarbeit	Bastian Müller	Konzipierung und Auslegung einer Aufstellvorrichtung für ein Leichtbaurobotergeführtes Messsystem	15.06.2016
Diplomarbeit	Bastian Müller	Konzipierung einer Vermessungseinheit zur Qualitätssicherung von Bohrungen	15.10.2016
Bachelorarbeit	Bahram Nasariyan	Konzipierung und Gestaltung einer Kinematik zur Positionierung eines Sensors zur Vermessung von Bohrungen im Bereich der Luftfahrt	27.06.2018

Projektarbeit	Satheesh Kumar Kallipalayam Murugesan	Analysis of Drill Hole Quality from 3D Point Cloud Data	12.11.2019
Fachartikel	Hintze, W.; Löding, H.; Friedewald, A.; Mehnen, J.; Romanenko, D.; Möller, C.; Brillinger, C.; Sikorra, J.:	<b>Digital Assistance Systems for Smart Drilling Units in Aircraft Structural Assembly</b> in: von Estorff, O.; Thielecke, F. (Hrsg.): Proceedings of the 7 <sup>th</sup> International Workshop on Aircraft System Technologies (AST 2019), February 19 - 20, 2019, Hamburg, Germany Reihe: Luft- und Raumfahrttechnik, Shaker Verlag, Aachen, 2019, S. 255-266, ISBN 978-3-8440-6470-4	19-20.02.2019
Messeauftritt	Sarissa	ILA 2018, Berlin Messestand des Partner Sarissa zu SmartADU	25-29.04.2018
Messeauftritt	Projektkonsortium	ILA Goes Digital 2020 <a href="http://www.ila-berlin.de/en/node/5048">www.ila-berlin.de/en/node/5048</a>	20.5.2020

## 12. Literaturverzeichnis

- [1] AIRBUS: Besser Bohren, Airbus ONE, Ausgabe Januar2015, Deutschland.
- [2] MESSERSCHMIDT, B: Vorrichtung und Verfahren zum Prüfen von Oberflächen im Inneren von Löchern. WO 2005121700 A1
- [3] SMITH, J. AND KOCHHAR-LINDGREN, D.: Integrated Hole and Countersink Inspection of Aircraft Components, SAE Technical Paper 2013-01-2147, 2013
- [4] MEAD, W.; BOWLES, D.: Device for inspecting countersunk holes. US 7542135 B2, 2009
- [5] NovaCam, How to measure aerospace rivet holes – 3D, non-contact and with micron-precision, 13.5.2020, <https://www.novacam.com/2020/03/13/how-to-measure-rivet-holes-in-3d-non-contact-with-micron-precision/>

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht des Partners Fraunhofer IFAM für das Verbundprojekt „SmartADU2020“ Entwicklung einer mobilen Vermessungseinheit zur prozessbegleitenden Prüfung von Nietbohrungen für Smarte ADU-Bohrtechnologie für die Flugzeugmontage in 2020	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Christoph Brillinger	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2019
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) - Projektgruppe Fügen und Montieren (FFM) Ottenbecker Damm 12 21684 Stade	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 20Q1522E
	11. Seitenzahl 32
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 5
	14. Tabellen 3
	15. Abbildungen 18
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung  Die Nietverbindung ist heute und in absehbarer Zukunft die dominante Technologie beim Fügen von Flugzeugstrukturen. Allein im deutschen Flugzeugbau wird jährlich eine achtstellige Anzahl an Nietverbindungen eingebracht, dementsprechend muss auch dieselbe Anzahl an Präzisionsbohrungen hergestellt werden. Aufgrund teils schwieriger Zugänglichkeiten bedarf es allerdings einer zeitparallelen und flexibel gestaltbaren Fertigung, weshalb der Anteil manuell und semiautomatisch erbrachter Bohrungen im Flugzeugbau sehr hoch ist.  Die Verwendung von Systemen zur prozessbegleitenden Vermessung der Bohrungsqualität in hoher Taktrate ist bis dato bei semiautomatischen Prozessen nicht vorhanden. Aus diesem Grund ist vom Fraunhofer IFAM im Rahmen des Projektes SmartADU2020 eine portable, intuitiv bedienbare Vermessungseinheit zur Beurteilung der Qualität von Senklochbohrungen entwickelt worden, um Begutachtungsprozesse zu vereinfachen.	
19. Schlagwörter Qualitätsbeurteilung, Senklochbohrungen, Automatisierte Messtechnik, Luftfahrt	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Final Report by the associated Fraunhofer IFAM for the joint project "SmartADU2020" on the development of a portable measurement unit for the near-process validation of countersink boreholes	
4. author(s) (family name, first name(s)) Christoph Brillinger Maximilian Muth	5. end of project 31.12.2019
	6. publication date
	7. form of publication Final Report
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer-Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials (IFAM) Projektgruppe Fügen und Montieren (FFM) Ottenbecker Damm 12 21684 Stade	9. originator's report no.
	10. reference no. 20Q1522E
	11. no. of pages 32
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 5
	14. no. of tables 3
	15. no. of figures 18
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The riveting is the dominant technology for joining aircraft structures today and in the near future. In German aviation industry, an eight-digit number of rivet is used annually, so the same number of high precision bores must be made accordingly. However, due to the sometimes-difficult accessibility, manufacturing needs to be parallel and flexible, which is why the proportion of manually and semi-automatically drilled holes in aircraft construction is very high.  Today, the use of systems for near-process measurement of the drilling quality at a high cycle rate has not existed in semi-automatic processes. For this reason, Fraunhofer IFAM has developed a portable, intuitively operated measuring unit for assessing the quality of countersunk holes as part of the SmartADU2020 project in order to simplify quality evaluation processes.	
19. keywords quality evaluation, countersink boreholes, automated measurements, aviation industry	
20. publisher	21. price