Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 21051 BR

Thema

Projektionssysteme in der schiffbaulichen Fertigung – Entwicklung von Methoden zum flexiblen Einsatz von mobilen Projektionssystemen zur Fertigungsunterstützung

Zeitraum

01.08.2020 bis 31.01.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM)

Forschungseinrichtung

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FSM-Bericht 5/2023

Projektionssysteme in der schiffbaulichen Fertigung – Entwicklung von Methoden zum flexiblen Einsatz von mobilen Projektionssystemen zur Fertigungsunterstützung (ProSF)

von

M. Eng. Dominik Hack, Dr.-Ing. Michael Geist, Prof. Dr.-Ing. habil. Jan Sender

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP, Rostock

Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM*)*
Steinhöft 11
20459 Hamburg
Deutschland

Tel.: +49 40 69 20 876-12
Fax.: +49 40 69 20 876-66
E-Mail: info@fsm-net.org
Internet: www.fsm-net.org

© 2023
Alle Inhalte dieses Berichtes,
wie Text, Abbildungen und Tabellen,
sind urheberrechtlich geschützt

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben Nr. 21051 BR der Forschungsvereinigung Schiffbau und Meerestechnik e.V. (FSM) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Danksagung

Dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) wird an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit und die konstruktive Diskussion während der gesamten Projektlaufzeit gedankt. Weiterhin gebührt dem PA Dank für die Bereitstellung von Sachleistungen und Dienstleistungen.

Projektbegleitender Ausschuss

Peene Werft GmbH & Co. KG
André Schönrock
Schiffbauerdamm, 17439 Wolgast

Dr. Hesse und Partner Ingenieure
Christian Hesse
Veritaskai, 21079 Hamburg

Dölker + Voges GmbH
Jan Polenz
Gaußstraße, 22765 Hamburg

Tischlerei Eigenstetter GmbH
Martin Eigenstetter
Gletzower Landstr. 3, 19217 Rehna

Meyer Werft GmbH & Co. KG
Marvin Drößer
Industriegebiet Süd, 26871 Papenburg

SKM Informatik GmbH
Torsten Geritz
Eckdrift 95, 19061 Schwerin

IMAWIS GmbH
Matthias Neumann
Industriestraße, 18069 Rostock

Mühlhan Holding AG
Andreas Momber
Schlinckstraße 3, 21107 Hamburg

Theodor Freese GmbH
Behrend Freese
Carl-Benz-Straße, 28237 Bremen

Thyssenkrupp Marine Systems GmbH
Ingo Staak
Werftstraße, 24143 Kiel

Abeking & Rasmussen
Ralph Zimmermann
An der Fähre 2, 27809 Lemwerder

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3
1.1 Motivation 3
1.2 Zielstellung 4

2 Stand der Technik und Projektziele 5
2.1 Absteckung im Schiffbau 5
2.2 Projektionssysteme 5
2.3 Arbeitshypothese und Forschungsdesign 7

3 Arbeiten und Forschungsergebnisse 9
3.1 AP 1 Anwendungsszenarien 9
3.2 AP 2 Referenzierungsverfahren 11
3.3 AP 3 Technologieauswahl 15
3.4 AP 4: Entwicklung der Hardwarekonfiguration 19
3.5 AP5: Softwareentwicklung 21
3.5.1 Referenzierung 22
3.5.2 Datenfluss 26
3.5.3 Ansteuerung 27
3.6 AP6: Genauigkeitsbetrachtungen 28
3.7 AP 7: Transfer und Dokumentation 38

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten .. 39

5 Zusammenfassung und Ausblick 40

6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft und durchgeführte Maßnahmen 41

7 Literaturverzeichnis 42

1 Einleitung

Durch die steigende Konkurrenz der Werften aus dem Ausland müssen in Deutschland die im Schiffbau KMU und Werften innovative und effiziente Fertigungsprozesse entwickeln. Nur durch Steigerung der Qualität bei kürzeren Liegezeiten bleiben diese Unternehmen konkurrenzfähig. Ein Weg, dies zu erreichen, ist die Unterstützung der Fertigung mittels Messtechnik. Aufgabenbereiche, in denen Fertigungsprozesse durch Vermessungsaufgaben unterstützt werden können, sind unter anderem die Erfassung und die Absteckung von Objekten.
Die Erfassung schiffbaulicher Strukturen erfolgt meist im Rahmen der Qualitäts- oder Vollständigkeitskontrolle. Diese war Thema vieler Forschungsvorhaben [1, 2]. Inzwischen kommt bei der Digitalisierung der Strukturen moderne Messtechnik zum Einsatz und die aufgenommen Daten werden unter Verwendung der 3D-Konstruktionsdaten
Der Bereich der Absteckung hingegen ist bisher weitestgehend unbeachtet geblieben. Die Tätigkeiten dieses Aufgabenbereiches zielen auf die Markierung von Positionen ab, die in einem späteren Arbeitsschritt benötigt werden, ab. Als Beispiel ist hier die Endausrüstung durch KMU zu nennen. Bei Absteckungsaufgaben werden einfache Messmittel (Messband, Rotationlaser, Linienlaser, etc.) verwendet. Die Datengrundlage bilden 2D-Zeichnungen, die durch die Arbeitsvorbereitung aus 3D-Datensätzen generiert wurden. Auf Grund des derzeitigen Prozesses sind die Absteckungsaufgaben zeitaufwendig, stark manuell geprägt und fehleranfällig.
Durch den Einsatz unterstützender Technologien soll die Qualität und die Effizienz der manuellen Tätigkeiten verbessert werden, damit in Zukunft eine effizientere und objektivere Umsetzung der manuell geprägten Absteckungsaufgaben möglich ist. Zu diesem Zweck sollen Methoden zum flexiblen Einsatz von Projektionssystemen zur Fertigungsunterstützung entwickelt werden.

1.1 Motivation

Eine Absteckaufgabe im schiffbaulichen Umfeld ist Teil der Vorbereitung auf die Konservierung von Decks. Dabei müssen die Positionen der Fundament- und Unitfüße abgeklebt werden, um im späteren Fertigungsprozess die Fundamente und Unit verschweißen zu können. Der Prozess des Abklebens wird auf Basis von Zeichnungen und mittels einfachen Messmitteln (z.B. Messband) durchgeführt und gliedert sich in zwei Teilprozesse (Abbildung 1).

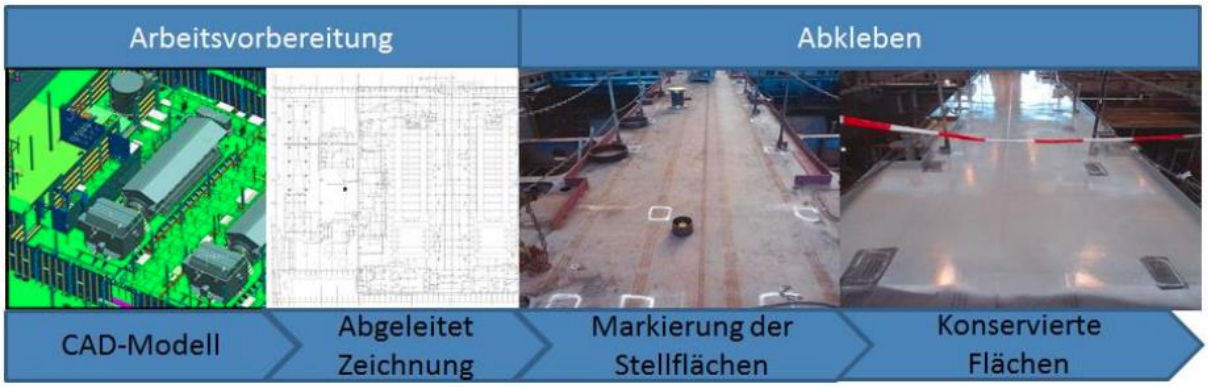

Abbildung 1: Prozess Abkleben der Position von Fundament- und Unitfüße für die Konservierung

Pro Schiff müssen ca. 2500 Flächen markiert werden. Insgesamt zeichnet sich der Prozess durch

- Aufwendige Datenvorbereitung
- Geringe Mitarbeiterproduktivität
- Hohe Fehlerquote

aus. Ein Lösungsansatz die Defizite zu minimieren und Absteckungsaufgaben zu beschleunigen ist die Verwendung von Projektionssystemen, mit denen die benötigten Informationen verzerrungsfrei und positionsgerecht visualisiert werden.

1.2 Zielstellung

Das Ziel des Projektes ist die Untersuchung und Entwicklung von Einsatzmöglichkeiten von Projektionssystemen zur Fertigungsunterstützung im schiffbaulichen Bereich. Dabei liegt der Fokus auf der Unterstützung der Absteckaufgaben bei der Markierung. Statt durch manuelle Vermessungstätigkeiten sollen die benötigten Positionen mittels Projektion visualisiert werden. Hierzu ist die mobile Nutzung von Projektionssystemen notwendig. Dies verlangt nach einer Bestimmung der Position des Projektionssystems und des Projektionsfeldes im Arbeitsbereich. Hierfür gilt es, das Projektionssystem mit einem geeigneten Referenziersystem zu fusionieren. Dem Referenziersystem fällt dann die Aufgabe der Positionsbestimmung zu. Somit wird aus einem stationären Projektionssystem ein mobiles Projektionssystem.

Mit einem solchen System wird für das beschriebene Praxisbeispiel (Abkleben der Position von Fundament- und Unitfüße für die Konservierung) eine Kostenersparnis von ca. 75% erwartet. Diese ergibt sich aus dem Wegfall der Zeichnung und des Anzeichnens.
Insgesamt sind Anwendungen des mobilen Projektionssystems vor allem in der Ausrüstungsphase finden, wo eine Vielzahl von Absteckungsaufgaben durch KMU durchgeführt wird. Exemplarisch sind folgende Aufgabenstellungen denkbar:

- Visualisierung der Höhen für den Bodenausgleich
- Positionierung und Ausrichtung von Anbauteilen
- Einbau von Ausrüstungselementen
- Vollständigkeitskontrolle

Durch den Einsatz eines mobilen Projektionssystems wird für Markierungs- und Positionierungsaufgaben mit einer Kostenreduzierung von ca. 75% und einer Steigerung der Produktivität von ca. 50% gerechnet.

Nachfolgende Anwendungsfelder ergeben sich für ein mobiles Projektionssystem in der stahlbaulichen Fertigung:

- Positionieren (Visualisierung der Zielposition am realen Objekt)
- Qualitätskontrolle (Vollständigkeits- und Positionskontrolle von Anbauteilen)
- Dokumentation (Aufnahme von Ist-Zuständen durch die zusätzliche Sensorik)
- Informationsbereitstellung (Visualisierung ortsabhängiger Informationen zu Bauteilen)

2 Stand der Technik und Projektziele

2.1 Absteckung im Schiffbau

Für 1D- oder 2D-Positionier- und Markierungsaufgaben mit lokalen Bezügen werden weitestgehend einfache Hilfsmittel wie Schablonen, Linienlaser und Rotationslaser verwendet. Dabei ist immer ein manuelles Abtragen von Bezügen notwendig. Die Zusammenstellung der notwendigen Informationen in Zeichnungen aus CAD-Modellen ist sehr aufwendig. Kurzfristige Änderungen können meist nicht eingepflegt werden und führen zu Nacharbeiten. Insgesamt ist die Fehleranfälligkeit bei solchen Aufgaben sehr hoch.
Derzeit wird eine 3D-Absteckung mit Tachymetern durchgeführt. Dies ist mit einem hohen Zeitaufwand verbunden, da jeder Messpunkt manuell angetastet werden muss. Demnach kann während einer Schicht nur eine beschränkte Anzahl von Punkten abgesteckt werden. Dieser Aufwand bei der Absteckung wird nur bei 3D-Aufgabenstellungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen betrieben.
Auf Grund der geringen Produktivität des Tachymeters und der Bedienung durch speziell geschultes Personal wurden in nationalen und internationalen Forschungsvorhaben (ARVIKA, ARVIDA, AVILUS, PROSPER) weitere Möglichkeiten zur Übertragung von Informationen in die Fertigung betrachtet. Dabei haben sich die Arbeiten auf Visualisierungssysteme, wie Virtual-Reality- (VR) und Augmented-Reality-Technologie (AR) fokussiert. In den Forschungsprojekten wurde an Lösungen für den Einsatz von vorrangig AR- und VR-Technologien in der Serienfertigung sowie vereinzelt in der Unikatfertigung gearbeitet. Ziel war es die manuell geprägten Arbeitsabläufe durch Assistenzsysteme, die Informationen zum Bauteile bereitstellen, zu unterstützen. VR und AR konnten durch die Entwicklungen als Assistenzsysteme zur Visualisierung eingesetzt werden. Wenig im Fokus der Forschungsvorhaben standen Laserprojektoren, die in der Lage sind Informationen positionsgerecht (Anforderung ±1 mm) und verzerrungsfrei am Bauteil zu visualisieren, aber zusätzlich Vermessungssysteme sind.

2.2 Projektionssysteme

Projektionssysteme bestehen zum einen aus ein oder mehreren Projektoren und zum anderen aus einer Steuereinheit in Form eines Rechners. Neuere Projektionssysteme gibt es auch mit integriertem Beamer, so dass sich weitere Anwendungsmöglichkeiten ergeben. Das Funktionsprinzip ist jedoch bei beiden Varianten gleich, weshalb nachfolgend nur auf die Ausführung mit einem Punktlaser eingegangen wird. Die Projektionseinheit besteht aus mindestens einer punktförmigen Laserquelle, Prismen und Umlenkspiegeln für die Ablenkung des Laserstrahls in X- und Y-Richtung (Abbildung 2). Für die Projektion werden aus dem CAD-Modell die benötigten Informationen abgeleitet und in geeigneter Form übergeben. Bei der Laserprojektion wird ein Laserstrahl durch zwei drehbare Spiegel abgelenkt, so dass dieser mit einer sehr hohen Geschwindigkeit über die Arbeitsfläche bewegt wird. Für das menschliche Auge entsteht so der Eindruck einer geschlossenen Linie, obwohl nur einzelne Koordinatenpunkte abgefahren werden.

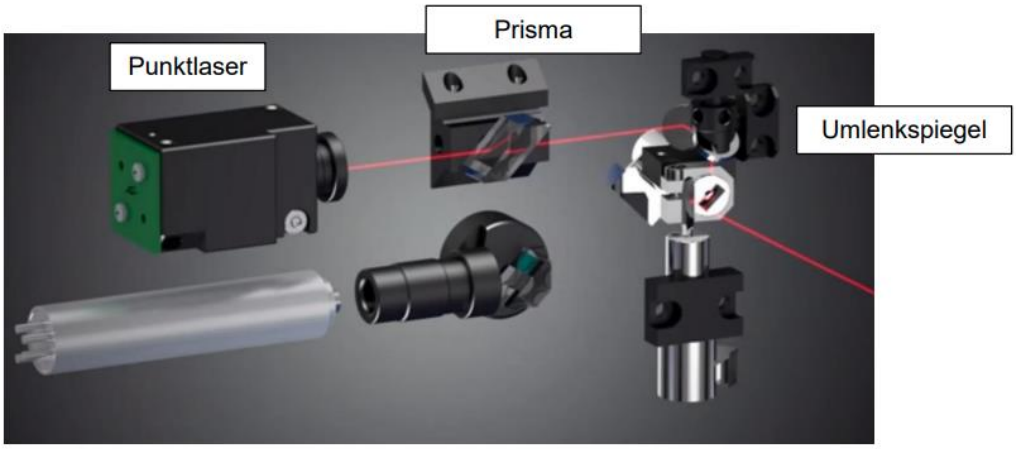

Abbildung 2: Funktionsweise eines Projektionssystems [14]

Zur Darstellung der Informationen an der richtigen Position muss ein Bezug zwischen Projektorposition und Projektionsfläche hergestellt werden. Dies geschieht über Referenzmarken, die im CAD Modell angelegt und im Arbeitsbereich vorab eingemessen wurden. Anschließen ist eine verzerrungsfreie Projektion von Punkten, Linien, Kreuzen oder beliebig geformter Umrisse mit sehr hohen Genauigkeiten (Submillimeterbereich) möglich [12]. Flächenhafte Informationsdarstellungen, wie z.B. Falschfarbenvergleiche zur Visualisierung von Unebenheiten, sind mit Beamer ausgestatteten Projektionssystemen möglich. Bei der Projektion müssen je nach verwendetem Laser (standardmäßig Laserklasse 2 oder 3) entsprechende Vorkehrungen zum Arbeitsschutz getätigt werden.
In der Luftfahrt- und Fahrzeugindustrie sowie in der Rotorblattfertigung werden Projektionssysteme auf Grund folgender Vorteile eingesetzt:

- Informationen können schnell und fehlerfrei direkt auf das Bauteil projiziert werden.
- Es kann nicht nur ein einzelner Punkt visualisiert werden, sondern eine Vielzahl an Informationen.
- Neben Punkten und Linien können auch komplexe Geometrien projiziert werden, so dass Zusatzinformationen bereitgestellt werden können.
- Hohe Genauigkeit der Projektion im Vergleich zu derzeitigen Messmitteln (Schablonen und Rotationslaser)
- Projektion kann gleichzeitig auch als Qualitätskontrolle verwendet werden.

Projektionssysteme kommen beispielsweise im Flugzeug und Wagonbau zur Positionierung von Bauteilen zum Einsatz und haben zu einer Optimierung der Effizienz der Fertigung geführt [11, 12].
Eine Übertragung der Prozesskette vom Flugzeug- /Wagonbau in den Schiffbau ist nicht ohne weiteres möglich. Während derzeitige Lösungen vor allem für den stationären Gebrauch von wiederkehrenden Aufgaben ausgelegt sind, ist im Schiffbau wegen der Unikatfertigung und den wechselnden Aufgabenstellungen mit unterschiedlichen Anforderungen (Örtlichkeit, Umgebungsbedingungen, Datengrundlage) eine mobile Lösung gefragt.
Ein Projektionssystem mit mobilerem Einsatz ist das Werklicht Pro Extend 3D (siehe Abbildung 3). Dieses verbindet eine Projektionseinheit von LAP-Laser mit einem Stereokamerasystem. Die Kameras suchen durchgehend Photogrammetriemessmarken, stellen über die geometrische Beziehung die Referenzierung her und können diese bei Bewegung des Instrumentes oder des Bauteils in Echtzeit verbessern. Diese Referenzmarken müssen, ähnlich den statischen Systemen, vor der Projektion mit externer Messtechnik eingemessen werden.

Projektionssystem	
Werklicht Pro Extend 3D	
Fokus	Bis 5 m
Laserschutzklasse	2M
Projektionsgenauigkeit	± 0,5 mm (bei 4 m)
Projektionsbereich	60°x 60° (bis 80°x 80° mit niedrigerer Genauigkeit)
Laserlinie	< 1 mm (bei 4 m)

Abbildung 3: Systemparameter Werklicht Pro [16]

Besondere Herausforderungen bei der Anwendung von Projektionssystemen in der schiffbaulichen Fertigung ergeben sich bei der Ausrichtung des Projektors in das örtliche Bezugssystem (Referenzierung) auf Grund der relativ großen Fertigungsabweichungen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der bisherige Einsatz von Projektionssystemen auf der Einmessung von Referenzpunkten basiert. Dies ist sehr aufwendig und in der schiffbaulichen Fertigung ungleich komplexer. Die Verwendung einer zusätzlichen Sensorik am Projektionssystem zur Referenzierung könnte den mobilen Einsatz, wie er in der schiffbaulichen Fertigung benötigt wird, ermöglichen.

2.3 Arbeitshypothese und Forschungsdesign

In dem Projekt soll die Anwendbarkeit von Projektionssystemen in der schiffbaulichen Fertigung untersucht und Einsatzmöglichkeiten entwickelt werden. Die Bedingungen in der schiffbaulichen Fertigung, insbesondere bei Markierungs- und Positionierungsaufgaben, verlangen ein dynamisches Projektionssystem, das ohne die Einmessung von Referenzpunkten auskommt. Somit gilt es ein mobiles Projektionssystem mit geeigneter Referenziersensorik zu entwickeln. Bei der Entwicklung eines Projektionssystem müssen die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

1. **Datenvorbereitung:** Die Voraussetzung für die Anwendung des zu entwickelnden Multisensorsystems ist die Datenvorbereitung. Diese beinhaltet die Erstellung der darzustellenden Informationen, also die Ableitung dieser aus dem CAD-Modell.

2. **Referenzierung:** Für eine positionsgerechte Projektion muss ein örtlicher Bezug zwischen dem Projektionssystem und dem Bauteil hergestellt werden (Referenzierung). Bei einem mobilen Projektionssystem gilt es, die Position nach jeder Bewegung zu bestimmen. Der Lösungsansatz für die Referenzierung zielt auf ein mobiles Multisensorsystems ab, bei dem ein mobiles Projektionssystem durch Zusatzsensorik zur Referenzierung erweitert wird. Die Methoden zur Referenzierung sind von der verwendeten Referenziersensorik abhängig. Je nach Sensorkombination wird eine Referenzierung durch Tracking oder eine kanten-/merkmals- oder flächenbasierte Ausrichtung durchgeführt Weiterhin gilt es die Position, die auf Basis der Daten der Zusatzsensorik bestimmt wird, an das Projektionssystem zu übertragen. Eine Schnittstelle, die eine solche Interaktion ermöglicht, gilt es zu entwickeln.

3. **Kalibrierung:** In dem Multis-Sensor-Projektionssystem wird durch die Referenzierung die Position des Referenzierungssensors bestimmt. Für die positionsgerechte Projektion wird

die Position des Projektionszentrums benötigt. Somit sind Sensor und Projektor zueinander in einen örtlichen Bezug zu setzen. Dazu gilt es eine geeignete Kalibrierroutine zu entwickeln.

4. **Projektion:** Die Projektion schließt sich der erfolgreichen Referenzierung an. Dabei wird der Arbeitsablauf, der in der Datenvorbereitung angelegt wurde, Schritt für Schritt abgearbeitet.

Insgesamt gilt es, die derzeit für den mobilen Einsatz von Projektionssystemen ungeeigneten Datenaufbereitung und Referenzierung zu überwinden. Daraus resultierend steht im Fokus des Forschungsvorhabens die Entwicklung und Umsetzung von Verfahren zur schnellen Datenbereitstellung sowie von Methoden zur schnellen Einmessung mobiler Projektionssystems vor Ort. Im Ergebnis wird den KMU im Schiffbau ein technisches Hilfswerkzeug bereitgestellt, mit dem Positionierungs- und Markierungsaufgaben schneller, objektiver und fehlerfrei durchgeführt werden können. Das Konzept für die Umsetzung eines solchen Projektionssystems ist in Abbildung 4 dargestellt.

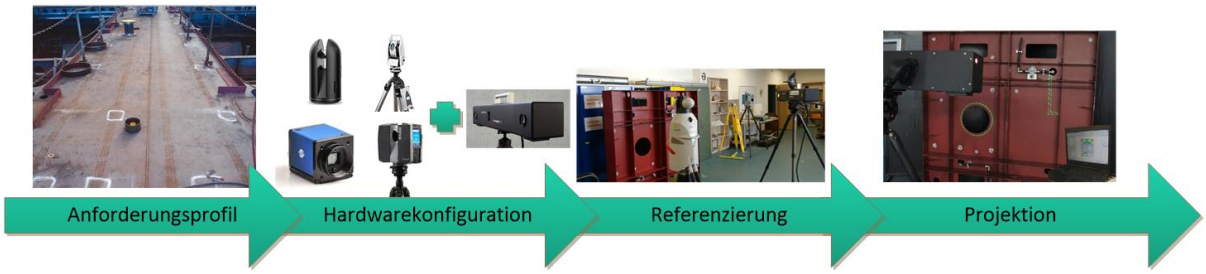

Abbildung 4: Konzept zur Umsetzung eines Projektionssystems für Markierungs- und Positionierungsaufgaben an Großstrukturen

Im 1. Schritt wird in Zusammenarbeit mit dem PA ein Anforderungsprofil erarbeitet. Dies definiert die potenziellen Anwendungsaufgaben, so dass die Anforderungen an das Projektionssystem abgeleitet werden können. Parallel werden Referenzierungsalgorithmen analysiert und unter Berücksichtigung der denkbaren Anwendungsszenarien bewertet. Im 2. Schritt wird basierend auf den Anforderungen und den Ergebnissen der Bewertung der Referenzierungsalgorithmen eine Hardwarekonfiguration ausgearbeitet. Dies beinhaltet die Auswahl von Zusatzsensorik (z. B. Laserscanner, Kamera, Lasertracker, Tachymeter), die mit dem mobilen Projektionssystem zu einem Multisensorsystem verknüpft wird, um eine effizientere Referenzierung zu realisieren. Im Zuge der Hardwarekonfiguration wird auch die Kalibrierung der Sensorik zueinander erarbeitet. Im 3. Schritt wird angepasst auf die Schritte 1 und 2 ein Algorithmus entwickelt, der die schnelle und effiziente Referenzierung über die Zusatzsensorik ermöglicht. Wesentliche Herausforderungen sind die Entwicklung der Datenaufbereitung (inkl. Schnittstellenentwicklung) sowie die Hardwaresteuerung, um die Referenzierung mit dem Projektionssystem umsetzen zu können. Im 4. Schritt werden die Ergebnisse der Hardwarekonfiguration und der Referenzierung in einer prototypischen Anwendung erprobt und verifiziert. Die Ergebnisse der praktischen Anwendung werden in einem Integrationskonzept zusammengetragen und den PA-Mitgliedern zur Verfügung gestellt.

3 Arbeiten und Forschungsergebnisse

Aus dem oben beschriebenen Konzept wurden sieben Arbeitspakete abgeleitet, die in diesem Kapitel den durchgeführten Arbeiten und erreichten Ergebnissen gegenübergestellt werden.

3.1 AP 1 Anwendungsszenarien

AP 1	Systematische Untersuchung und Definition von Anwendungsszenarien
Laufzeit: PM1 – PM6	**Personaleinsatz**: 2 MM, 3 MM Hiwi
Ziel: Anforderungsprofil für das Multisensorsystem	
Lösungsweg: Im ersten Schritt wird in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss eine Liste potenzieller Anwendungsaufgaben (z.B. Bodenausgleich, Absteckung Unitfüße, Positionierung von Rohren) erstellt. Für jede Aufgabenstellung werden neben einer allgemeinen Beschreibung zur derzeitigen Vorgehensweise, Information hinsichtlich folgender Parameter erhoben: • Umgebungsbedingungen (Platzverhältnisse, Vibrationen, Zeitfenster für die Durchführung, …) • Genauigkeitsanforderungen • Vorhandene Datenbasis (CAD-Modell, Zeichnungen, Aktualität, …) • Abgeleiteter Projektionsumfang (Größe der Fläche, Anzahl der Projektionselemente, Komplexität der Projektion) • Geschätztes Einsparpotential • Arbeitssicherheit Aus den Angaben wird eine Schnittmenge der zu bearbeitenden Aufgaben gebildet, die für die PA-Mitglieder von größtem Interesse sind. Darauf aufbauend wird ein Anforderungsprofil für das Multisensorsystem abgeleitet.	
Ergebnis: Eine Auswahl prototypisch umzusetzender Anwendungsaufgaben und umfassende Beschreibungen liegen vor. Ein Lastenheft für das Multisensorsystem zur Anwendung auf die definierten Szenarien ist erstellt. Das Lastenheft fließt in die Konzeptionierung des Multisensorsystems (AP 3) ein.	

Im ersten Schritt wurde ein Fragebogen zur Analyse von Potenziellen Anwendungsaufgaben mobiler Projektionssysteme im Schiffbau erarbeitet, dieser Beinhaltet:

- Umgebungsbedingungen
    - Platzverhältnisse
    - Vibrationen
    - Zeitfenster für die Durchführung
- Genauigkeitsanforderungen
- Vorhandene Datenbasis
    - CAD-Modell
    - Zeichnungen
    - Aktualität
- Projektionsumfang
    - Größe der Fläche
    - Komplexität der Projektionen
- Geschätztes Einsparpotential

Mit dem Fragebogen wurden Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses (PA) zu den Bedingungen und Anforderungen in ihren Betrieben befragt. Anhand von Vorbetrachtungen und nach Auswertung der Befragungen von PA-Mitgliedern wurden Anforderungen an das Sensorsystem abgeleitet:

Projektionsdistanz bis zu 10 m
Laserschutzklasse 2 (maximal)
Kompakte und leichte Bauweise
Mehrfarbige Lasereinheit
Darstellung beliebiger Konturen auf beliebigen Flächen
Genauigkeit < 1 mm auf 10 m
Schnittstellen (direkte Ansteuerung über SDK oder API, Verarbeitung gängiger CAD-Formate)

Anhand von Vorerfahrungen, Recherche des aktuellen Marktes und der Ergebnisauswertung der durchgeführten Befragungen konnte ein Leistungsprofil für an geplante Multisensorsystem erstellt werden. Des Weiteren konnten zwei Anwendungsszenarien identifiziert werden, welche den Großteil der denkbaren Anwendungsgebiete mobiler Projektionstechnik abdecken:

Größere, freiflächige Räume
Langgezogene Strukturen wie Flure, oftmals mit kleineren, anhängenden Räumen

Um die geplanten Anwendungen in einer kontrollierten Umgebung testen zu können wurden hierzu ähnliche, vorhandene Strukturen am Fraunhofer IGP identifiziert. Das vorhandene Messlabor und ein Flur im Neubau des Gebäudes wurden anschließend digital rekonstruiert und für erste Tests wurden Messmarken platziert und eingemessen.
Die KMU-Firma Dolker & Vöges hat als Zuarbeit der Testanwendungen Beispielkonturen konstruiert, welche als Projektionen Schablonen aus dem schiffbaulichen Innenausbau widerspiegeln.

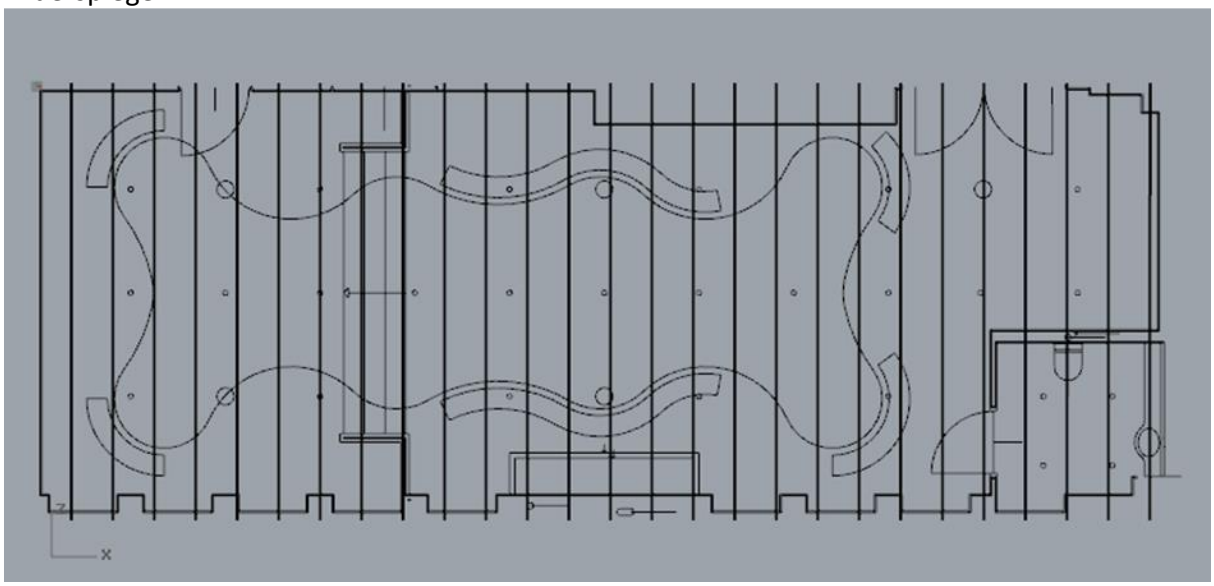

Abbildung 5: Bodenkonturen für geplante Versuche

3.2 AP 2 Referenzierungsverfahren

AP 2	Methodische Analyse von Referenzierungsverfahren und -algorithmen
Laufzeit: PM1 – PM6	**Personaleinsatz**: 2 MM, 3 MM Hiwi
Ziel: Identifizierung geeigneter Referenzierungsverfahren und -algorithmen	
Lösungsweg: Für die Anwendung des Multisensorsystems in der stahlbaulichen Fertigung muss ein angepasstes Referenzierungsverfahren entwickelt werden, um einen effizienten Einsatz zu erreichen. Für die Umsetzung kommen unterschiedliche Verfahren in Frage, wie z.B. Tracking des Projektionssystems, merkmalsbasierte Ausrichtung (Ebenen, Linien, Punkte) und flächenhafte Ausrichtung (Fitting). Die Verfahren sollen im AP 2 untersucht und bewertet werden. Im Fokus steht die Beurteilung hinsichtlich Zeitaufwand, Umsetzbarkeit und erreichbare Genauigkeit unter den vorherrschenden stahl- und schiffbaulichen Gegebenheiten (Fertigungsabweichungen). Erhoben werden die Aufwände durch Laborversuche an einem schiffbaulichen Exponat.	
Ergebnis: Priorisierung von möglichen Referenzierungsverfahren und –algorithmen als Grundlage für die Konzeptionierung des Multisensorsystems (AP 3).	

Bei dem geplanten Multisensorsystem werden zusätzlich zu dem Laserprojektionssystem ein, oder mehrere, weitere Sensoren benötigt, um die Transformation in ein Übergeordnetes Koordinatensystem umzusetzen. Laserprojektionssysteme sind in ihrem Projektionsbereich eingeschränkt. Die Verbindung der Instrumente verspricht die Überwindung dieser räumlichen Einschränkung und soll den möglichen Projektionsraum erweitern.
Notwendig für den mobilen Einsatz des Projektors ist die Bestimmung seiner 3D-Koordinaten und -Orientierung im Bauteilkoordinatensystem. Grundsätzlich eignet sich jedes Messsystem, welches in der Lage ist, sich selbst zu referenzieren und Messpunkte in fester, geometrischer Beziehung zum Projektionssystem polar einzumessen. Zur Ermittlung der sechs Freiheitsgrade müssten folglich drei Polarpunkte in bekannter, fester Geometrie am Projektor gemessen werden. Um jedoch einen effizienten und anwendungsbezogenen Workflow umsetzen zu können müssen einige Faktoren berücksichtigt werden.
In der Vorbetrachtung möglicher Referenzierinstrumente wurde zunächst eine nähere Auswahl möglicher Geräte aus geodätischer und industrieller Messtechnik auf Grundlage von Messvolumen, Genauigkeit und Handhabung getroffen. Resultierend daraus werden Lasertracker, Tachymeter, Laserscanner, photogrammetrische Positionsbestimmungen und iGPS (infrared GPS) auf folgende Faktoren weiter beleuchtet:

Sensorsystem	Lasertracker	Tachymeter	Laserscanner	Kamera	iGPS
Genauigkeit					
Referenzierzeit					
Aufwand der Datenverarbeitung					
Mobilität					
Automatisierung					
Integration für die Anwendungsfälle					
Technische Umsetzbarkeit					
Gerätekosten					
Bewertung	sehr gut geeignet	bedingt geeignet	gut geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet

Positiv Neutral Negativ

Abbildung 6: Bewertungsmatrix für Referenzinstrumente

Bei allen betrachteten Lösungsansätzen ist eine feste, mechanische Verbindung mit einem Tastinstrument mit Neigungsmessung oder dem eigentlichen Messinstrument geplant. Zudem sollte die Referenzierung, sofern möglich, ohne vorherige Einmessung von Passpunkten erfolgen.

Lasertracker:
Der hier betrachtete Lösungsansatz basiert auf der Einbindung von mobilen 6DoF-Instrumenten, welche meist eine Genauigkeit im Zehntelmillimeterbereich aufweisen.
Die hohe Referenzierzeit resultiert aus der Einmessung ins Schiffskoordinatensystem durch Regelgeometrien. Für den Standpunktwechsel des Trackers wäre jedoch eine Einmessung von Kugeladaptern als Passpunkte zu bevorzugen. Der Lasertracker könnte bei einer Reichweite von ~± 15 m zahlreiche Projektoraufstellungen von einem Standpunkt tracken. Durch gezielte Datenerhebung und die technischen Eigenschaften moderner Lasertracker sind Automatisierungsansätze und die technische Umsetzung definierter Aufgabenstellungen denkbar.

Tachymeter:
Eine direkte, mechanische Verbindung zwischen Tachymeter und Projektionssystem würde in einer sehr ungünstigen Handhabung und hoher Einschränkung der Mobilität des resultierenden Multisensorsystems münden.
Ein weiterer Lösungsweg wäre eine Messung von Polarpunkten am Projektor zur Referenzierung. Diese Punkte würden jedoch eine sehr kurze Basis für die Referenzierung aufspannen und zu einer geringen Transformationsgenauigkeit führen.
Generell leidet die Winkelgenauigkeit aus Tachymetermessungen im Nahbereich sehr durch imperfekte Anzielungen. Dies und eine geringe Möglichkeit zur Automatisierung bilden die größten Herausforderungen bei der Umsetzung eines tachymeterbasierten Lösungsansatzes [31, 32, 43].

Laserscanner:
Da keine manuelle Bedienung erforderlich ist wäre eine mechanische Verbindung zwischen Laserscanner und Laserprojektor zielführend. Somit ergäbe sich die Genauigkeit des

Projektorstandpunktes direkt aus der Referenzierung des Scanners zuzüglich der Abweichung, welche sich aus einer Einmessung der mechanischen Verbindung ergäbe.
Zur markerlosen Einmessung können entweder regelgeometriebasierte Ansätze genutzt werden, oder man nutzt bereits vorhandene Punktwolken der Umgebung in welche aktuelle Scans registriert werden. Bei beiden Ansätzen könnte die Notwendigkeit einer Horizontierung des Scanners für die optimale Ausrichtung des Projektors vernachlässigt werden.
Die Punktwolken, welche beim Referenzieren ohnehin gemessen werden, bilden eine digitale Kopie des Ist-Zustandes. Daraus ergeben sich für und über dieses Vorhaben hinaus einige Möglichkeiten. Ein Vergleich der Punktwolken zum CAD würde beispielsweise Fertigungsabweichungen aufzeigen [30, 31, 32]. Der Aufwand der Datenverarbeitung setzt sich hier zusammen aus der hohen Datenmenge und dem erhöhten Arbeitsaufwand, um die zuvor beschriebenen Referenziermethoden umzusetzen [31, 32].

Kamerabasiert:

Ein umfassender Bildverband ist besonders bei SFM essenziell, durch eine hohe Quantität an Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln ergibt sich erst die nötige Tiefeninformation zur 3D-Modellierung. Eine hohe Redundanz erzielt zugleich bessere Genauigkeit. Eine Befestigung der Sensoren minimiert die Aufnahmezentren im Verbund und führt, zusammen mit den gleichförmigen Strukturen in Schiffsrohbauten, zu schlechten Referenzierungen. In der Umsetzung stellt sich somit die Frage ob einer festen Anbringung der Kamers am Projektor zielführend sei.
Vorstellbar ist ein Hybridlösungsansatz, bei dem eine Kamera frei im Raum bewegt würde, um Bilder aufzunehmen und anschließend am Projektor angebracht wird. Die mechanische Verbindung würde über einen Adapter zu einer festen geometrischen Beziehung zwischen Kamera- und Laserprojektionszentrum führen, welche zuvor bestimmt würde. Problematisch wären jedoch die Datenübertragung, -auswertung und die lange Rechenzeit bei hohen Datenmengen. Zur markerlosen Referenzierung sind kamerabasierte Ansätze oberflächengeometrieabhängig. Die nötigen Oberflächen könnten mit Industriekameras über SFM (structure from motion) oder TOF (time of flight) Kameras gemessen werden, jedoch sind beide Methoden nicht sehr genau. Aktuelle TOF Kameras besitzen mit 200x200 bis 1024x768 Pixeln eine geringe Auflösung, der Messbereich beträgt maximal etwa 5 m und erreichbar sind Genauigkeiten von bis zu 5 mm. Die Genauigkeit bei SFM hängt stark von der verwendeten Kamer ab, Genauigkeiten im Millimeterbereich sind jedoch unwahrscheinlich [37, 38, 42].

iGPS:

Die Namensgebung des iGPS basiert auf den technischen Ähnlichkeiten zum bekannten Satellitennavigationssystem zuzüglich der Abkürzung „i“ für „infrared“ (früher „indoor“). Fest installierte Sender übermitteln durchgehend Signale an freie Empfänger deren Position ermittelt werden kann. Ungleich der Satellitennavigation werden hier keine Strecken, sondern Winkel gemessen und Positionen durch Triangulation berechnet. Rechnerisch handelt es sich um einen 3D-Vorwärtsschnitt, bei dem mindestens zwei Emitter zur Positionsbestimmung notwendig sind. Durch synchrone Messung mehrerer Empfänger kann auch die Orientierung von Objekten im Raum bestimmt werden. Haupteinsatzgebiet dieser Technologie ist die Industrievermessung. Durch Reichweiten der Sender von ~50 m (~80 m mittels „Long Range Strobe“-Erweiterung) lassen sich große Strukturen im Submillimeterbereich aufnehmen [40].

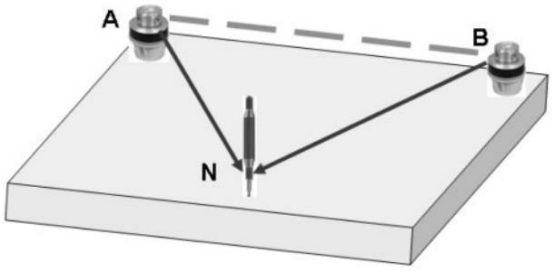

Abbildung 7: 3D-Vorwärtsschnitt über 2 Emitter

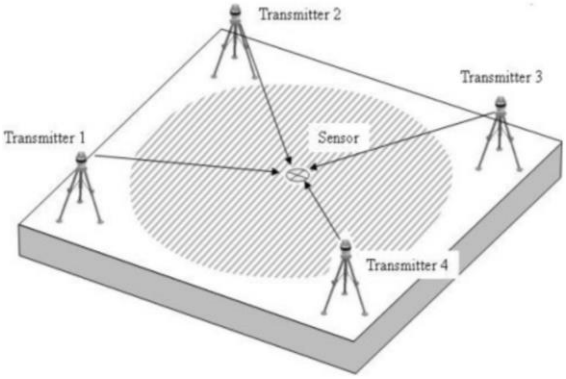

Abbildung 8: Standardkonfiguration eines iGPS-Systems mit vier Transmittern [40]

iGPS wird im Optimalfall in großen, offenen Werkshallen angewandt, hier lassen sich die Emitter einmalig, günstig im Raum anordnen und es ergeben sich selten Störfaktoren wie Abschattung und Mehrwegeausbreitung [31, 40].

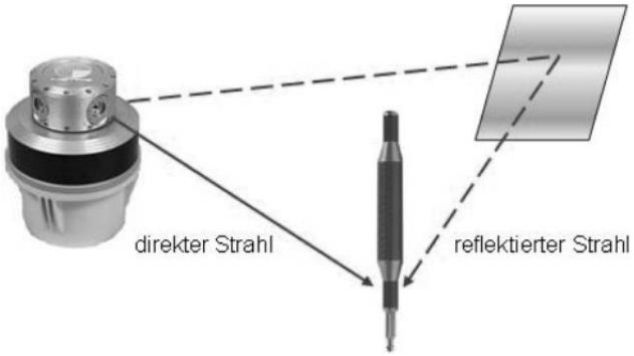

Abbildung 9: Mehrwegeausbreitung beim iGPS [40]

Die geplanten Anwendungsszenarien in Schiffsrohbauten werden jedoch suboptimale Messumgebungen für diese Technologie aufweisen, wodurch sowohl Genauigkeitsminderung als auch potenziell Fehlmessungen verursachen kann. Um Bezug zum Referenzkoordinatensystem herzustellen, müssten die verwendeten Sender für jede Projektionsumgebung eingemessen werden. Dies würde wiederum nur mit weiterer, externer Messtechnik umsetzbar sein [40].

Die Betrachtung der Geräteeigenschaften beziehen sich auf die Anwendung des Messsystems in der schiffbaulichen Fertigung. Daher sind besonders die Genauigkeit, Mobilität und Integration in vordefinierte Anwendungsfälle hoch gewichtet.

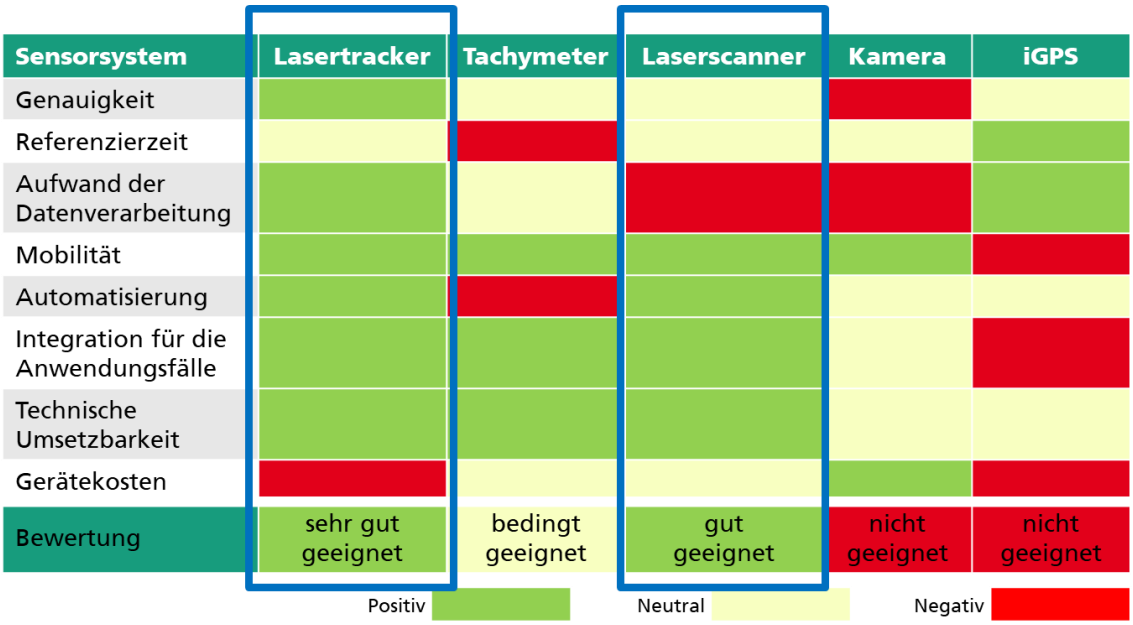

Abbildung 10: Vergleichsmatrix mit präferierten Lösungsansätzen

Resultierend aus der Vorbetrachtung werden Lösungsansätze in Kombination mit Lasertracker und -scanner weiter untersucht.

3.3 AP 3 Technologieauswahl

AP 3	Konzeptionierung des Multisensorsystems
Laufzeit: PM5 – PM10	**Personaleinsatz**: 4 MM, 2 MM Tech., 4 MM Hiwi
Ziel: Definition der Systemkomponenten für das Multisensorsystem und Konzept zur Kalibrierung des Systems	
Lösungsweg: Für die Umsetzung einer automatisierten Referenzierung wird zusätzlich zum Projektionssystem eine Zusatzsensorik verwendet. Basierens auf den Ergebnissen des AP 1 (Lastenheft Anforderungen & Anwendungsszenarien) und AP 2 (Analyse Referenzierungsalgorithmen) werden unterschiedliche Zusatzsysteme (z.B. Kamera, Laserscanner, Trackingsysteme) untersucht und bewertet. Dabei stehen Eigenschaften wie z.B. Kosten, Genauigkeit, Effizienz und Stabilität im Fokus. Nach Auswahl einer Vorzugsvariante wird das Multisensorsystem mit den benötigten Einzelkomponenten (Hard- und Software) zusammengestellt und notwendige Schnittstellen definiert. Darauf abgestimmt wird ein Kalibrierverfahren konzeptioniert. Dies beinhaltet die Messtechnik und -systematik, um die Zusatzsensorik zum Projektionssystem einzumessen. Ohne eine Kalibrierung der Einzelkomponenten zueinander ist eine genaue Referenzierung nicht möglich.	
Ergebnis: Konzept des Multisensorsystems auf Basis einer Einzelkomponentenbewertung sowie Konzept zur Kalibrierung des Multisensorsystems	

Da die Einbindung von Laserprojektoren in der seriellen Fertigung zunehmend eingesetzt wird, stehen zum Zeitpunkt dieser Arbeit einige Hardwareoptionen verschiedener Hersteller zur Verfügung. Die technische Umsetzung der Projektoren ist vergleichbar, allerdings unterscheiden sich verschiedene Modelle in Genauigkeit, Arbeitsbereich, Laserart und Gewicht [25, 33, 35, 44].

Projektionssystem	
LAP-Laser CAD-PRO Color LD	
Fokus	2 m
Laserschutzklasse	2M
Projektionsgenauigkeit	± 0,2 mm/m
Wiederholgenauigkeit	± 0,025 mm/m
Projektionsbereich	80°x 80°
Strahlbreite	0,5 mm FWHM
Lasertypen	Rot, Grün, Gelb
Gewicht	3 Kg

Abbildung 11: Systemparameter LAP-Laser CAD-PRO [35]

Projektionssystem	
Z-Laser ZLP2	
Fokus	Bis 7 m (Grün) Bis 14 m (Rot)
Laserschutzklasse	3R (Grün), 2M (Rot)
Projektionsgenauigkeit	± 0,25 mm/m
Projektionsbereich	60°x 60° 80°x 80°
Lasertypen	Grün oder Rot
Gewicht	6,6 Kg (+ 1,4 Kg Netzteil)

Abbildung 12: Systemparameter Z-Laser [44]

Projektionssystem	
Faro Tracer^{si} ,Tracer^{m}	
Fokus	1,8 bis 15,2 m
Laserschutzklasse	2M
Projektionsgenauigkeit	± 0,25 mm auf 5 m (Tracer^{si}) ± 0,25 mm auf 4,6 m (Tracer^{m})
Projektionsbereich	60°x 60°
Strahlbreite	0,5 mm FWHM
Lasertypen	Grün
Gewicht	17,24 Kg

Abbildung 13: Systemparameter Faro Tracer [25]

Die Systeme von LAP-Laser, Z-Laser und Faro (siehe Abbildung 11, Abbildung 12 und Abbildung 13) sind sich in der Handhabung und im Einsatzgebiet sehr ähnlich. Alle dieser Laserprojektionssysteme sind für den statischen Einsatz gedacht und können optional mit zusätzlichen Projektoren (meist bis zu 9) zusammengefasst werden. Durch die Erweiterung können auch größere Bauteile wie Windkraftflügel abgedeckt werden.

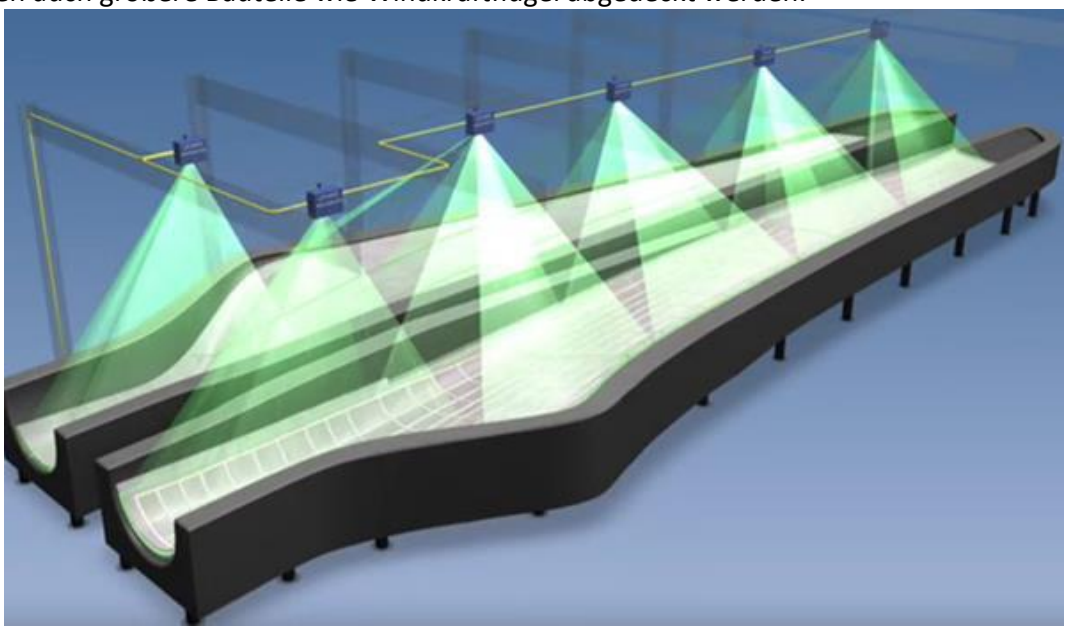

Abbildung 14: Multi-Projektor-Aufbau im Windkraftanlagenbau [25]

Die Projektoren mit 60°-Öffnungswinkel verfügen über eine bessere Fokussieroptik, welche vor allem bei größeren Distanzen für eine definierte, schmale Laserlinie sorgt. Für den seriellen Betrieb sind auch softwareseitige Unterschiede relevant. So ist bspw. Der LAP-Laser in der Lage lediglich vorgefertigte 3D-Konturen zu projizieren. Beim Z-Laser und beim Faro können in der Software 2D-Projektionsdaten direkt am CAD des Bauteils erstellt und projiziert werden.

Projektionssystem	
Werklicht Pro Extend 3D	
Fokus	Bis 5 m
Laserschutzklasse	2M
Projektionsgenauigkeit	± 0,5 mm (bei 4 m)
Projektionsbereich	60°x 60° (bis 80°x 80° mit niedrigerer Genauigkeit)
Laserlinie	< 1 mm (bei 4 m)

Abbildung 15: Systemparameter Werklicht Pro [33]

Einen anderen Ansatz ist beim Projektionssystem von Werklicht zu finden. Der Hersteller bedient sich bei der eigentlichen Projektionseinheit bei LAP-Laser, verbindet den Projektor im eigenen Gehäuse jedoch mit einem Stereokamerasystem. Das kombinierte Sensorsystem ist für einen mobileren Einsatz mit Stativaufstellungen gedacht. Die Kameras suchen durchgehend Photogrammetriemessmarken, stellen über die geometrische Beziehung die Referenzierung her und können diese bei Bewegung des Instrumentes oder des Bauteils in Echtzeit verbessern. Ähnlich den statischen Systemen müssen die Referenzmarken vor der Projektion mit externer Messtechnik eingemessen werden. Die verwendeten photogrammetrischen Marken mit 14-Bit

Codierung können zuvor mit einer Industriekamera mit anschließender Bündelblockausgleichung aufgenommen werden. Optional nutzt man die Halbkugelmarken (siehe Abbildung 12), welche mit dem Standarddurchmesser 1,5“ (3,81cm) mit Reflektorkugelnestern für Lasertracker-, oder Tachymetermessungen kompatibel sind.

Abbildung 16: Codierte Photogrammetriemarke für Extend3d System [33]

Die Anforderungen an das verwendete Projektionssystem richten sich nach der Einbindung in mögliche Anwendungsszenarien in der schiffbaulichen Fertigung und der Umsetzbarkeit eines Multisensor-Projektionssystems. Beispielsweise wäre eine Komplettabsperrung des Projektionsbereichs im laufenden Werftbetrieb kaum umsetzbar. Sodass die Verwendung eines Lasers in höherer Laserschutzklasse zu vermeiden ist.
Alle betrachteten Projektoren erreichen als eigenständiges System ausreichende Projektionsgenauigkeiten für die geplante Anwendung. Jedoch müssen als Konsequenz der Fehlerfortpflanzung die systematischen Abweichungen der Referenziermesstechnik, dessen Referenzierung im Bauteilkoordinatensystem, und weitere Glieder der Transformationsverkettung berücksichtigt werden. Daher sind die Genauigkeit, Laserlinienbreite und Fokussierungsqualität strenger zu betrachten. Des Weiteren muss das MSPS möglichst mobil verwendbar sein, worin sich u. A. das Gewicht bzw. die Projektorgröße wieder spiegeln. Die oftmals engen und schwer erreichbaren Bereiche lassen keine schwere, sperrige Messtechnik zu. Zur Auswahl stehen Geräte mit 60°x60° und 80°x80° Öffnungswinkeln. Die 20°x20° Unterschied resultieren in einer zusätzlichen Projektionsfläche von etwa 1m² auf 2m, welche zur Mobilität/Flexibilität des Systems einen bedeutsamen Mehrwert bei den erwarteten Nahbereichsprojektionen beitragen.
Die Ergebnisse der Vorbetrachtung sind hier in einer Bewertungsmatrix dargestellt:

Sensorsystem	LAP-Laser CAD-PRO	Z-Laser ZLP2	Faro Tracer^{si}	Extend 3D Werklicht Pro
Genauigkeit				
Gewicht				
Laserlinienbreite				
Projektionswinkel				
Laserschutzklasse				
Fokus				
Mehrfarbig				
Dynamischer Modus				
Gerätekosten				
Bewertung	sehr gut geeignet	Nicht geeignet	Bedingt geeignet	nicht geeignet

Positiv Neutral Negativ

Abbildung 17: Bewertungsmatrix Laserprojektoren

Aufgrund der Bewertung verfügbarer Systeme gegenüber den aufgestellten Anforderungen ergibt sich eine klare Präferenz für das LAP-Laser (Abbildung 18). Dem Nachteil einer festen Brennweite wird durch die Variabilität des angestrebten MSS entgegengewirkt. Ein dynamischer Modus ist aus derzeitiger Sicht für schiffbauliche Einsatzszenarien nicht zwingend erforderlich.

Abbildung 18: LAP-Laser Projektionssystem [35]

Der CAD-Pro Laserprojektor ist in zwei Ausführungen erhältlich, umfokussierbar mit nur einer grünen Laserquelle und mit festem Fokus auf 2m als mehrfarbige Variante. Zweite Ausführung besitzt im Inneren zwei Laserquellen, mit denen rot, grün oder durch zusammenführen der beiden Strahlengänge gelb projiziert werden kann (siehe Abbildung 19).

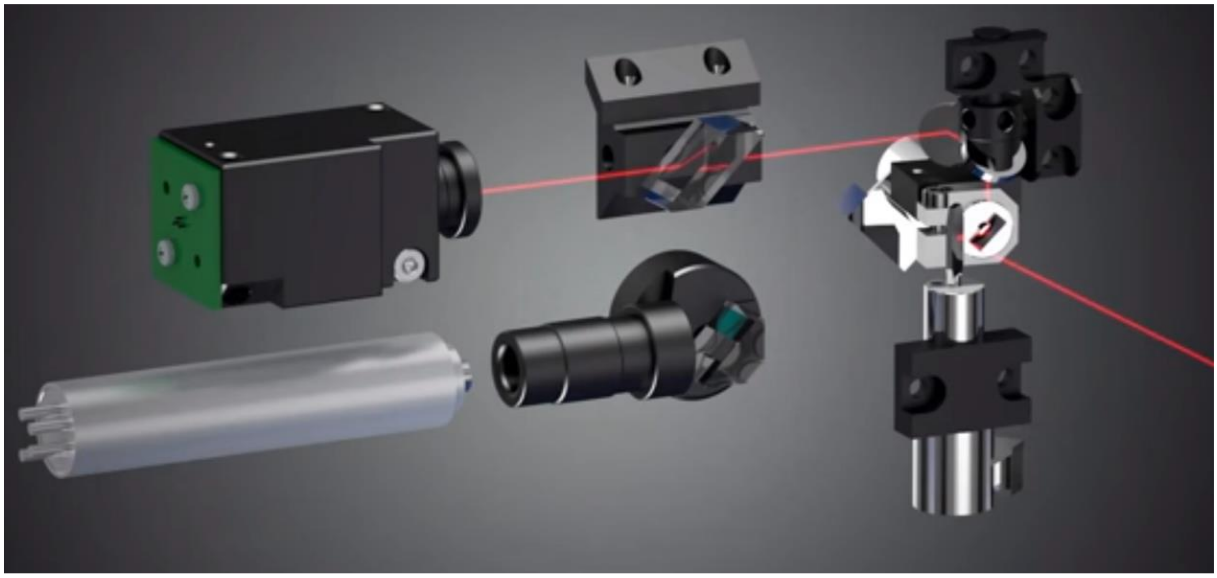

Abbildung 19: Funktionsweise eines Projektionssystems [35]

Da nur Anwendungen im Nahbereich geplant sind und durch mehrfarbige Projektionen die Möglichkeit gegeben wird komplexe Arbeitsabläufe möglichst erfassbar zu unterstützen wird diese Option betrachtet.
Neben der Hardwareauswahl wurden in AP 3 wie geplant auch die Kombination der Einzelkomponenten sowie deren Kalibrierung bzw. die Kalibrierung des Gesamtsystems konzipiert. Die Konzepte und deren Umsetzung sind im folgenden Abschnitt zu AP 4 im Zusammenhang mit dem Gesamtsystem erläutert.

3.4 AP 4: Entwicklung der Hardwarekonfiguration

AP 4	Entwicklung der Hardwarekonfiguration des Multisensorsystems
Laufzeit: PM9 – PM18	**Personaleinsatz**: 4 MM, 2 MM Tech., 4 MM Hiwi
Ziel: Zusammenführung der Einzelkomponenten zu einem Multisensorsystems	
Lösungsweg: Basierend auf den Ergebnissen des AP 3 wird das mobile Projektionssystem um die Zusatzsensorik	

erweitert und die Hardware zueinander konfiguriert. Das beinhaltet die Konstruktion und Montage von Halterungen. Dabei werden Aspekte wie Mobilität, einfache Handhabbarkeit und Stabilität berücksichtigt. Ein weiterer Schwerpunkt der Konfiguration ist die Umsetzung der Schnittstellen, so dass softwareseitig eine Kommunikation zwischen Projektionssystem und Zusatzsensorik erfolgen kann. Nach Abschluss der Montage wird eine Kalibrierung des Systems durchgeführt. Dafür wird das definierte Kalibriersetup (AP 3) umgesetzt. Das beinhaltet die Fertigung möglicher Kalibrier-körper, Montage von Kalibrierkörpern, Umsetzung einer Kalibrierroutine und die Erstellung einer Kalibrierdatei.
Ergebnis: Hardwareseitige Umsetzung des Multisensorsystems als Basis für die prototypische Anwendung im AP 6

Um das Laserprojektionssystem großvolumig einzusetzen, müssen die ausgewählten Sensoren kombiniert werden. Der realisierte Lösungsansatz sieht wie folgt aus:

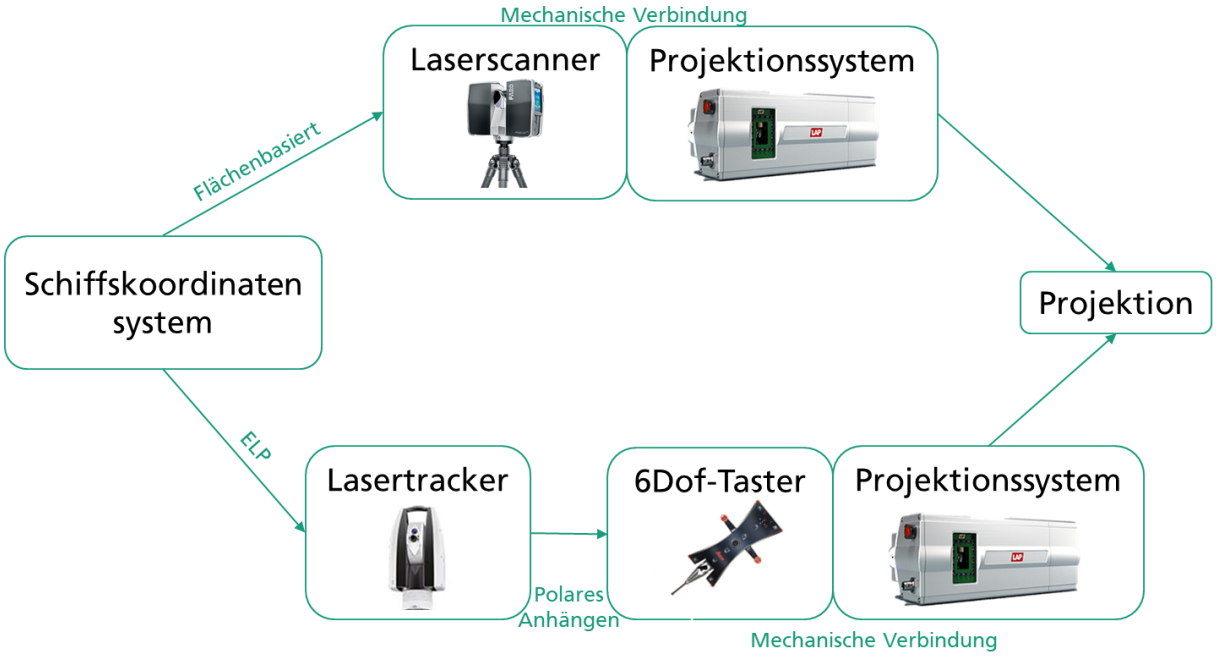

Abbildung 20: Transformationsverkettung

Der erste Schritt der jeweiligen Workflows sieht eine Referenzierung des externen Messsystems in das übergeordnete Koordinatensystem vor. Hierbei werden Ansätze wie flächen- oder punktwolkenbasierter Best-Fit, Ebene-Linie-Punkt (ELP) oder Passpunkte genutzt, um das Instrument ins Schiffs-CAD einzumessen.
Beim Lasertracker-Workflow werden ein einem zusätzlichen Zwischenschritt die Koordinaten und Orientierung der T-Probe bestimmt. Durch eine bekannte Geometrie zwischen T-Probe, bzw. Scanner und Projektor wird nun das Projektionssystem ins Referenzkoordinatensystem überführt. An diesem Punkt ist eine positionsgerechte Projektion möglich.

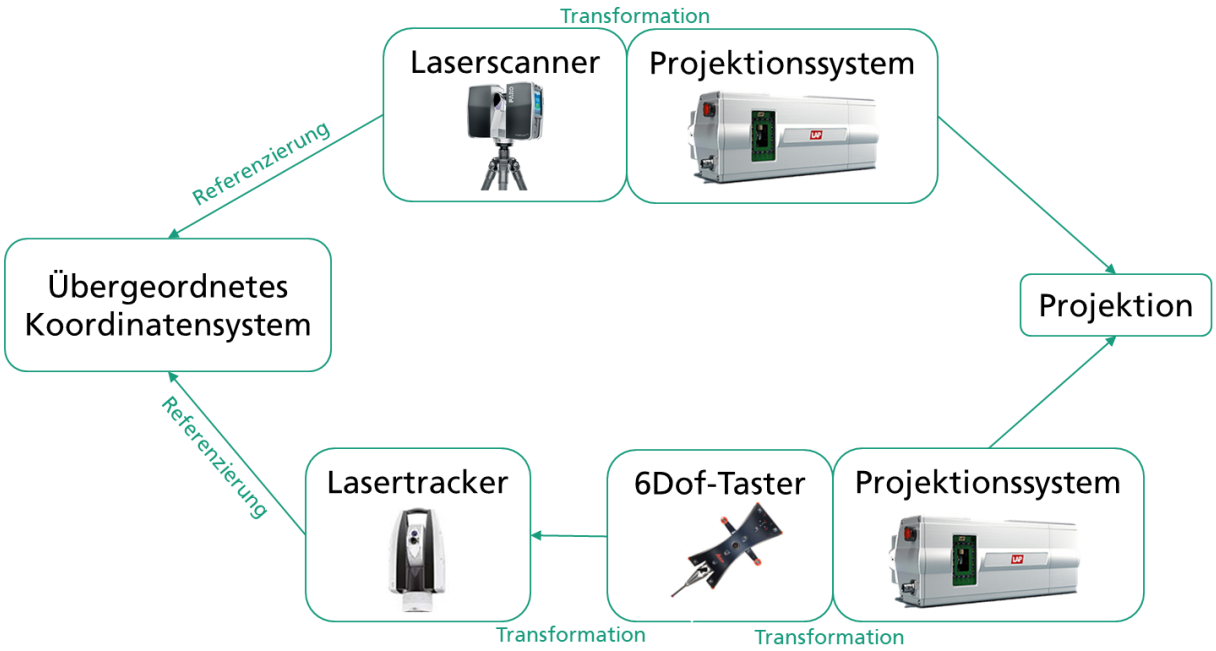

Abbildung 21: Referenzierungsweg Projektor

Die Lösungsansätze beinhalten somit eine Verkettung mehrerer Transformationen an deren Ende die Referenzierung eines Laserprojektionssystems stehen soll.

Kalibrierung

Nach Abschluss der Montage wird eine Kalibrierung des Systems durchgeführt. Dafür wird das definierte Kalibriersetup (AP 3) umgesetzt. Das beinhaltet die Fertigung möglicher Kalibrierkörper, Montage von Kalibrierkörpern, Umsetzung einer Kalibrierroutine und die Erstellung einer Kalibrierdatei.

3.5 AP5: Softwareentwicklung

AP 5	Entwicklung von Software zur Anwendung des Multisensorsystems
Laufzeit: PM9 – PM18	**Personaleinsatz**: 5 MM, 4 MM Hiwi
Ziel: Algorithmus zur Referenzierung des Multisensorsystems	
Lösungsweg: Zur Beschleunigung der aufwendigen Referenzierung wird ein Ansatz verfolgt, bei dem durch Zusatzsensorik am Projektionssystem eine Referenzierung in das Bauteilkoordinatensystem möglich wird. Daraus ergeben sich drei wesentliche softwaretechnische Aufgabenstellungen, die im AP 5 gelöst werden: Für eine Kommunikation zwischen dem Projektionssystem und der Zusatzsensorik muss eine **Hardwaresteuerung** implementiert werden. Diese definiert und steuert den Datenfluss zwischen den Komponenten. Definiert wird in welchem Format und zu welchem Zeitpunkt die Daten erfasst und ausgetauscht werden. Bei der **Datenaufbereitung** wird, der durch die Zusatzsensorik bereitgestellte Datensatz so prozessiert, dass die ausrichtungsrelevanten Daten abgeleitet werden. Je nach Zusatzsensorik und gewähltem Referenzierungsverfahren werden Algorithmen zum Fitten und Verschneiden von Merkmalen implementiert. Der **Referenzierungsalgorithmus** wird entsprechend den Ergebnissen des AP 2 und des AP 3	

entwickelt. Das beinhaltet die Ableitung der ausrichtungsrelevanten Elemente aus den Daten der Zusatzsensorik, die Transformation in das Bauteilkoordinatensystem und die Bewertung der Referenzierungsergebnisse.
Ergebnis: Softwareseitige Umsetzung des Multisensorsystems als Basis für die prototypische Anwendung im AP 6

3.5.1 Referenzierung

Zunächst wurde die mechanische Verbindung mit Hilfe eines improvisierten Adapterteils hergestellt. Diese besteht aus einem Aluminiumteil und diversen Schraubverbindungen zur Fixierung der Sensoren auf einem Stativ (siehe Abbildung 21).

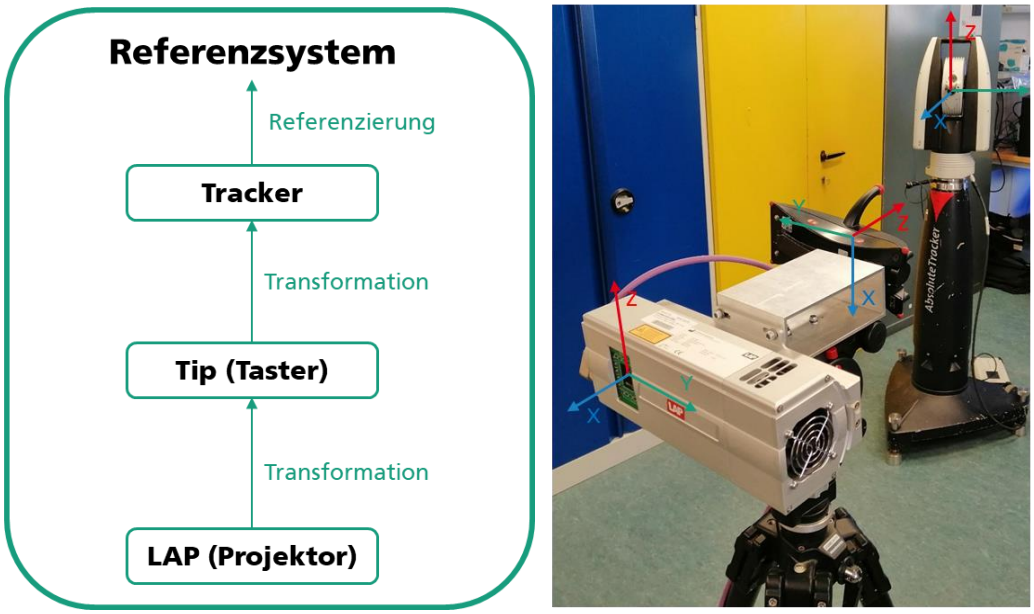

Abbildung 22: Systemverkettung Tracker-Lösungsansatz

Messinstrumente bzw. Sensoren besitzen stets ein eigenes Koordinatensystem und deren Messwerte sind in der Regel zunächst subjektiv zu diesem (siehe Abbildung 22). Beispielsweise bezieht sich das Gerätesystem von Lasertrackern und -Scannern auf deren Kippachse, sowie auf die Stehachse und einer vordefinierten Nulldrehstellung um diese.
Zum Bestimmen der geometrischen Beziehung zwischen den Systemen müssen die Transformationsparameter zwischen den Systemen ermittelt werden. Hierzu werden die Sensoren in ein Übergeordnetes Koordinatensystem eingemessen (siehe Abbildung 23).

Abbildung 23: Einmessung Tracker und Projektionssystem

Zur Referenzierung des Trackers und der Probe werden Die Software Polyworks und die Herstellersoftware Trackerpilot verwendet. Der Trackerpilot liefert die Orientierung des Handtasters in Relation zum Trackersystem parametrisiert als Quaternionen. Zudem kann hier der verwendete T-Probe Adapter als „Tip“ hinterlegt werden. Die Tip-Einmessung stellt sicher, dass bei jeder Verwendung des Adapters dasselbe Offset verwendet wird. Polyworks liefert die Transformation des Trackers und die Position der Tip im Referenzsystem. Da eine Einmessung des Projektors über externe Messtechnik hier nicht möglich ist muss die herkömmliche Referenziermethodik verwendet werden. Dazu misst sich das Projektionssystem mit Hilfe von verbauten Photodioden und dem Projektionslaser über bekannte Reflexionsmarken im Referenzsystem ein. Die Herstellersoftware liefert so die Position des Projektionszentrums und die Orientierung des Geräts (siehe Abbildung 24).

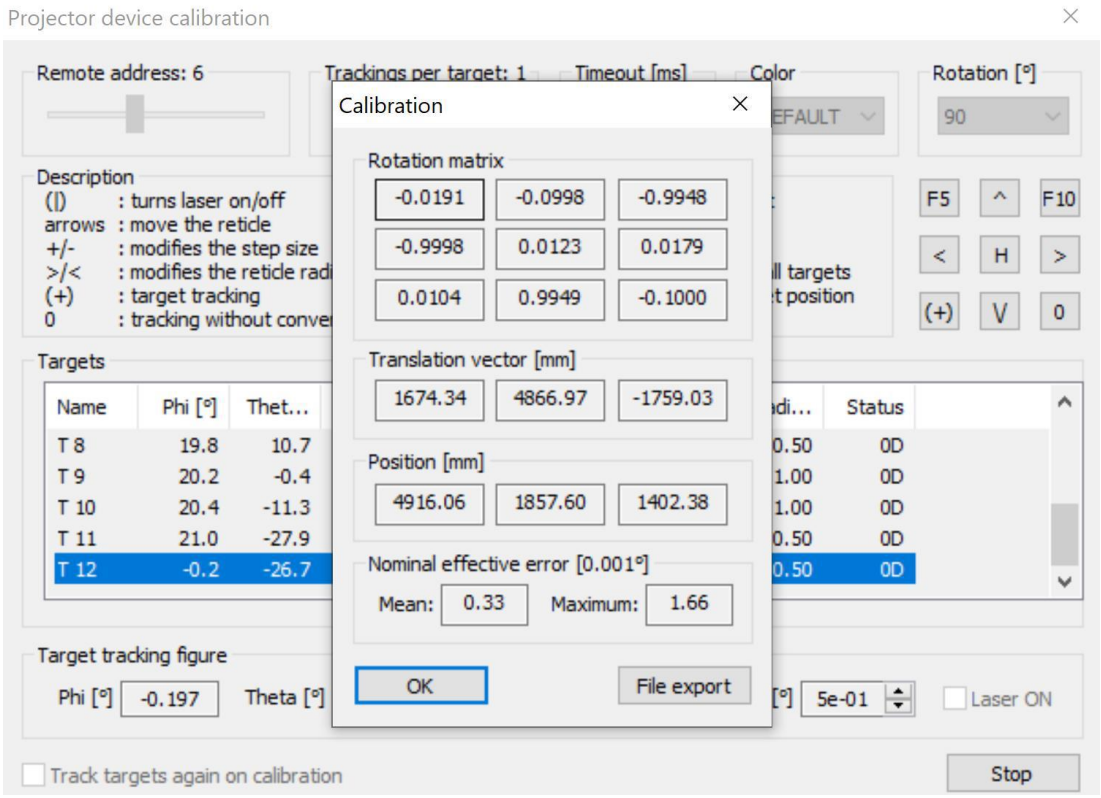

Abbildung 24: Ergebnistabelle aus herkömmlicher LAP-Laser Einmessung

Durch die Kenntnis der sechs Freiheitsgrade aller Sensoren in einem Koordinatensystem sind die gesuchten Transformationsparameter berechenbar. Ist dies Erfolg können anhand der bekannten Geometrie (Tip zu LAP) fortführend Projektorstandpunkte berechnet werden. Nachfolgend wird die mathematische Grundlage zur Positions- und Orientierungsbestimmung des LAP-Laser im prototypischen Aufbau erläutert:

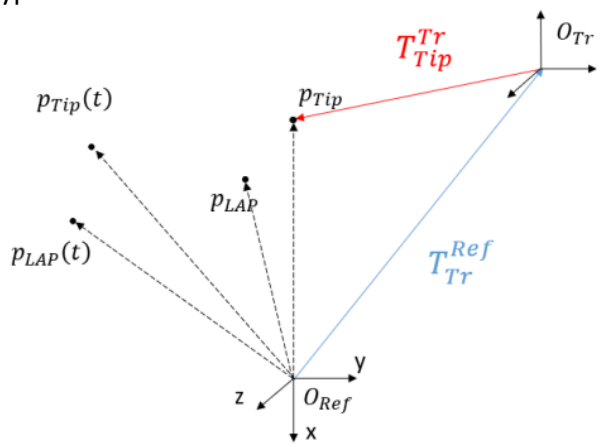

Abbildung 25: Übersicht Beziehungen zwischen Koordinatensystemen

Zu den gegebenen Ausgangsdaten gehören:

- Ausgangsposition Tip im Referenz-Koordinatensystem (KS) (pTipRef(t=0))
- Initiale Orientierung der Tip zum Tracker (RTipTr)
- Ausgangsposition LAP-Laser im Referenz-KS (pLAPRef(t=0))
- Inertiale Orientierung des LAP-Lasers zum Referenz-KS (RLAPRef)
- Position un Orientierung des Trackers im Referenz-KS (pTrRef , RTrRef)
- Position Tip im Referenz-KS nach Bewegung (pTipRef(t))
- Orientierung der Tip zum Tracker nach Bewegung (RTip Tr(t))

Berechnung:
Die subsequente Berechnung erfolgt durch mehrfache Transformationen des Koordinatensystems. Hierbei werden 4 x 4 – Transformationsmatrizen an KS A in KS B in der Art TBA= [$RBAp$BA01]
Verwendet, wobei $p_{\mathrm{B\,A}}$ die Posittion von B und $R_{\mathrm{B\,A}}$ die 3 x 3 – Rotationsmatrix bezüglich der Orientierung von B im KS A darstellt.
Das Ziel der Berechnung ist die Bestimmung der Position und Orientierung des LAP-Lasers nach Umstellung des Aufbaus von p_{LAP} zu $p_{LAP}\,(t)$. Hierfür wird die fixe Verbindung zwischen Tip und LAP-Laser verwendet. Daher muss eie Vorschrift für die Transformation von Tip zu LAP-Laser in Ausgangs- und bewegter Position aufgestellt werden. Diese Überlegung führt zu folgendem Ablauf:

- Aufstellung der Transformation von Referenz-KS ins Tracker-KS, da die Orientierung der Tip lediglich im Tracker-KS verfügbar ist:

TTrRef= [$RTrRefp$TrRef01]

- Aufstellen der Transformation vom Tracker-KS ins Tip-KS. Die Rotation ist dabei bereits durch RTipTr gegeben. Für die Translation muss die Position pTipRef ins Tracker-KS umgerechnet werden:

pTipTr= TRef TrpTipRef=(TTrRef)$^{-1}$ pTipRef
$TTip$Tr = [$RTipTrpTipTr$01]

- Transformation der Referenz-KS ins Tip-KS über das Tracker-KS:

TTipRef=TTrRef$T$TipTr

- Aufstellen der Transformation von Tip zu LAP-Laser:

$TLAPTip$= TRef Tip$TLAPRef$=($TTip$Ref)$^{-1}$ $TLAPRef$

- Die neue Relation zwischen Referenz-KS und Tip nach der Bewegung muss analog dazu aufgestellt werden:

pTip$Tr(t)$= TRef TrpTip$Ref(t)$
$TTip$Tr(t) = [$RTipTr(t)pTipTr(t)$01]
TTipRef(t)=TTrRef$T$TipTr(t)

- Die Transformation vom bewegten Tip-KS zum bewegten LAP-KS erfolgt mit der gleichen Vorschrift, die auch bei der unbewegten Transformation angewandt wurde, da sich die geometrische Relation zwischen Tip und LAP-Laser nicht verändert hat:

TLAPTip(t)=$TLAP$Tip

- Aus den Gleichungen ergibt sich:

TLAPRef(t)=TTipRef(t) TLAPTip

- Alternativ lässt sich der Punkt $pLAPTip$ in $pLAPTip(t)$ umwandeln, indem man eine Vorschrift für die Transformation Tip-KS zu bewegtem Tip-KS aufstellt. Gleiches gilt für die dazugehörige Rotation:

$TTip,dyn$Tip,fest=TRefTip $TTip$Ref(t)
pLAPTip,dyn=$TTip,festTip,dyn$ pLAPTip,fest
RLAPTip,dyn=TTip,festTip,dyn RLAPTip,fest

3.5.2 Datenfluss

Sämtliche Berechnungen mussten einhergehend mit der Ansteuerung des Laserprojektors in die Programmiersprache C++ überführt werden. Nachdem die Steuerung des Geräts funktionierte konnten zuvor aufgestellte Formeln übertragen und der Datenfluss zur praktischen Anwendung etabliert werden. Eine Herausforderung stellte hierbei die Datenzuführung dar.

- Zur inertialen Einmessung musste noch die Software des Herstellers genutzt werden, wobei die resultierenden Transformationsparameter händisch übertragen werden
    - Daten werden in ein Textdokument geschrieben
    - Ausgabe als Rotationsmatrix und Translationsvektor
- Leicas Trackerpilot bildet keinen Bezug zu Referenzsystemen, weshalb die Trackerreferenzierung und T-Probe Positionierung in Polyworks geschehen
    - Daten werden in ein Textdokument gespeichert
    - Ausgabe erfolgt als 4x4 Matrix (Referenzierung) und 3D-Koordinaten (T-Probe Position
    - Polyworks liefert keine Informationen über die Orientierung der T-Probe, weshalb speziell hierfür der Trackerpilot Anwendung findet
    - Daten werden als .csv Tabelle ausgegeben
    - Orientierung der T-Probe wird als Quaternionen parametrisiert
- Die API des Projektors lässt dessen 3D-Parameter nur als Translationsvektor und 3D-Eulerwinkel einlesen
- Eine, zu projizierende, Kontur muss im .dxf oder .iges Format eingelesen werden

Über eine zusätzliche SDK-basierte Ansteuerung der Referenziermesstechnik ließen sich die meisten potenziellen Fehlerquellen, welche dieser Workflow bietet, vermeiden. Im derzeitigen Stadium musste der Datenfluss für die prototypische Anwendung des Systems angepasst werden (siehe Abbildung 26).

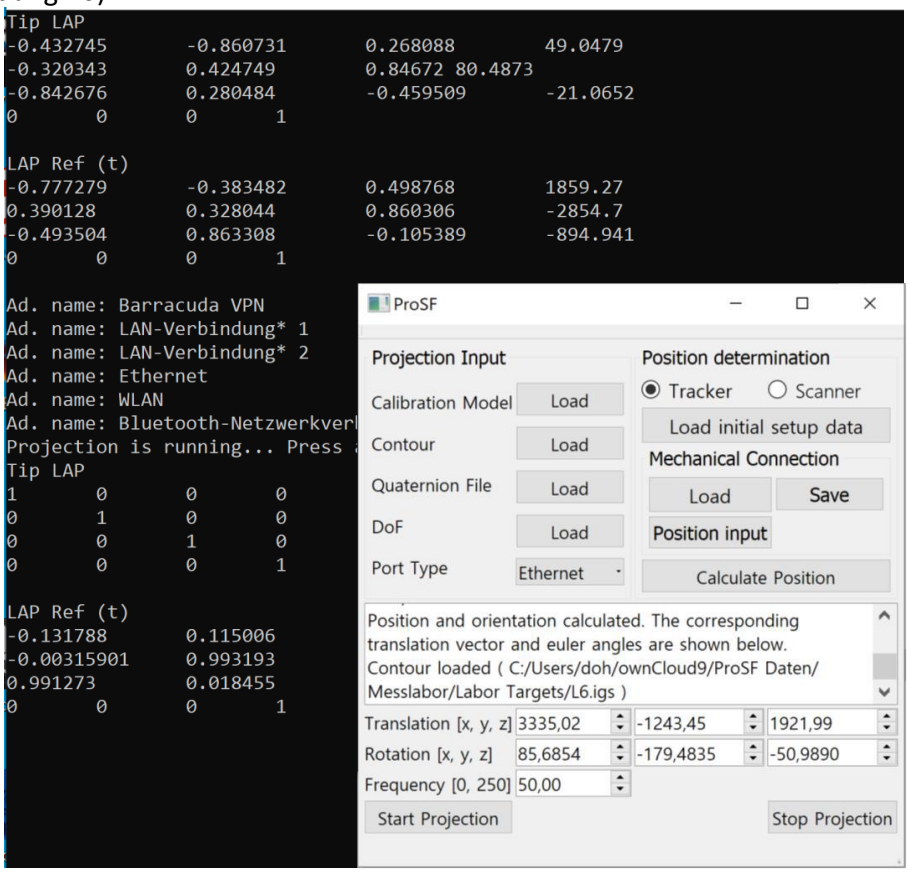

Abbildung 26: GUI zur Dateneingabe in aktuelle API-Ansteuerung

3.5.3 Ansteuerung

Zur Nutzung des Laserprojektors wird im Standardfall die herstellerspezifische Projektionssoftware PRO-SOFT genutzt. In ihr lassen sich vorkonzipierte Projektionskonturen im dazugehörigen CAD-Koordinatensystem initiieren und dazugehörige Einstellungen wie z.B. Projektionsfrequenz oder Projektionsabfolgen einstellen. Auch kann die Einmessung für den statischen Gebrauch hier gesteuert werden. Jedoch sind weiterführende Funktionen begrenzt, das Programm ist lediglich mit den nötigen Tools zur Verwendung in Serienfertigung o.Ä. ausgestattet.

Das in diesem Kontext bedeutsamere Utensil zur Steuerung des CAD-Pro stellt die mitgelieferte API dar (siehe Abbildung 27). Diese enthält vordefinierte Funktionen zur Verwendung des Projektors, welche in eigenen Programmen der Programmiersprache C++ genutzt werden können. In der API sind dieselben Funktionen der Software enthalten, jedoch mit weniger Restriktionen in der Anwendung. Die API ermöglicht den einzigen Weg zum Umgehen der herkömmlichen Einmessmethodik.

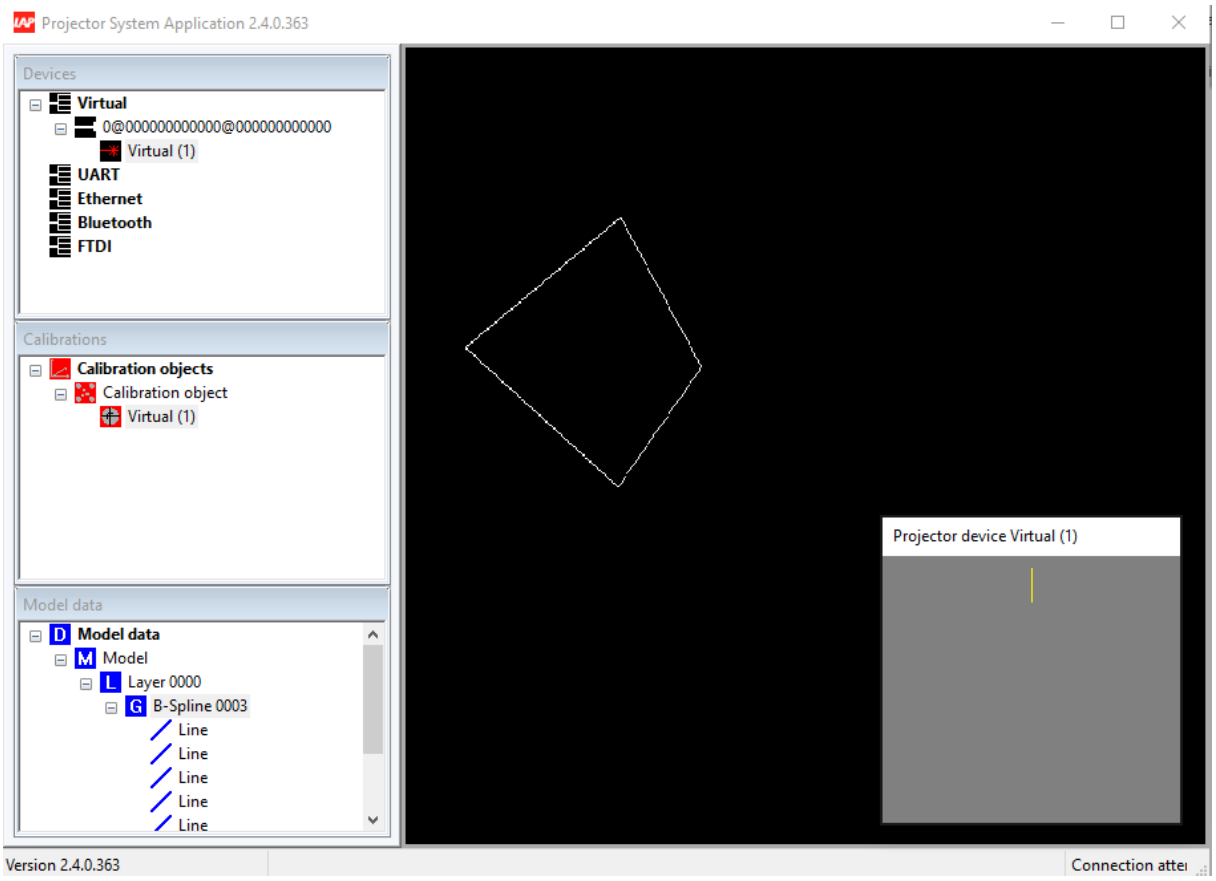

Abbildung 27: Programm über API des CAD-PRO

3.6 AP6: Genauigkeitsbetrachtungen

AP 6	Prototypische Anwendung des Multisensorsystems
Laufzeit: PM17 – PM23	**Personaleinsatz**: 4 MM, 4 MM Hiwi
Ziel: Entwicklung und Umsetzung eines exemplarischen Workflows	
Lösungsweg: Die hard- und softwaretechnischen Entwicklungen des AP 4 und AP 5 werden im AP 6 zu einem prototypischen Multisensorsystem zusammengeführt und an einem ausgewählten Anwendungsszenario demonstriert. Die Demonstration, in Form eines Workshops, stellt den PA-Mitgliedern den Workflow vom Aufbau des Systems über die Datenvorbereitung bis hin zur Messung und Projektion dar. Die PA-Mitglieder erhalten somit eine umfassende Einweisung und die Möglichkeit Vor- und Nachteile des Multisensorsystems in der praktischen Anwendung zu identifizieren. Die Anmerkungen der Industriepartner werden gesammelt und gehen in das AP 7 ein. Neben der prototypischen Anwendung wird auch eine Verifizierung des Multisensorsystems vorgenommen. Beurteilt wird zum einen die Güte der Referenzierung und zum andern die Datenvollständigkeit und –richtigkeit der Projektion. Dazu wird mittels eines übergeordneten Messsystems (z.B. Lasertracker) die Referenzierung überprüft. Die Datenvollständigkeit und -richtigkeit wird visuell und messtechnisch geprüft. Die Ergebnisse werden dokumentiert und stehen als Grundlage für eine Weiterentwicklung zur Verfügung. Im Zuge der Verifizierung soll auch eine Gegenüberstellung der Zeitaufwände zur herkömmlichen Vorgehensweise (manuelle Absteckung) durchgeführt werden. Die Ergebnisse sollen Aufschluss über die Effizienz des Systems geben und den Anschaffungskosten für ein mobiles Multisensorsystem gegen-übergestellt werden. Durch die Umsetzung eines Anwendungsszenariums und die Verifizierung wird die allgemeine Anwendbarkeit in der schiffbaulichen Fertigung demonstriert.	
Ergebnis: Beurteilung der erzielten Genauigkeit und Vollständigkeit in Bezug auf die gestellten Anforderungen aus AP 1. Effizienzbewertung des Multisensorsystems. Grundlage für das Integrations-konzept	

Frühe Versuche fanden an einem Demonstrationsobjekt statt, zu dem bereits ein CAD und projizierbare Konturen vorhanden waren. Am roten Aluminiumpanel (Abbildung 28) wurden zum Referenzierten des Projektors Reflektor-Adapter (Nester) angebracht und eingemessen.

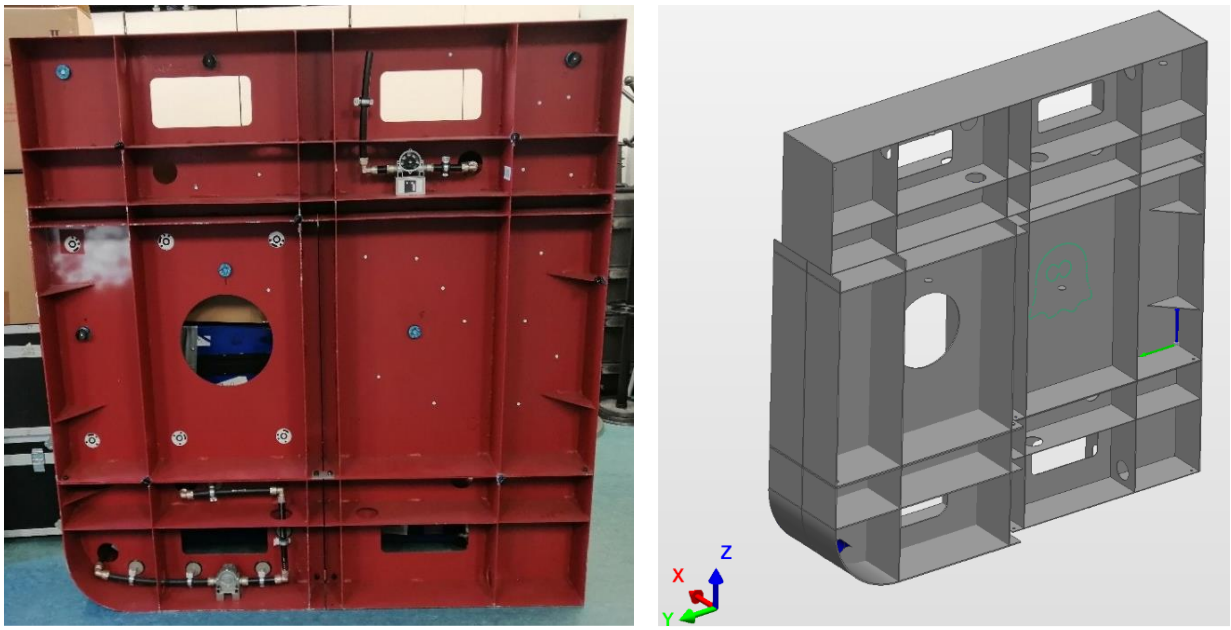

Abbildung 28: Erstes Testobjekt: Rotes Aluminiumpanel. Foto (links) und CAD-Modell (rechts)

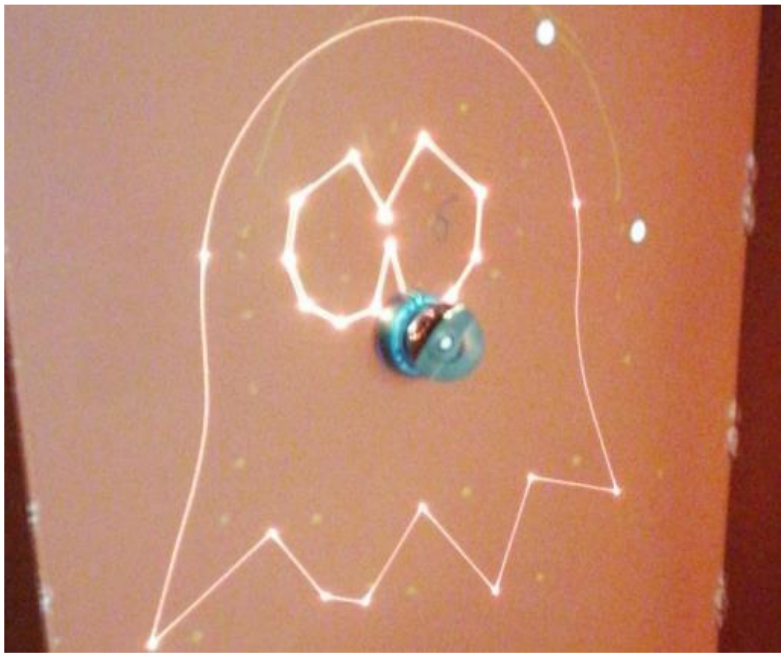

Abbildung 29: Konturenprojektion am roten Panel

Durch das einfach definierte Koordinatensystem, die vorhandene Datengrundlage und flexible Positionierung erwies sich das erste Testobjekt als sehr zielführend. Anwendungsnahe Szenarien ließen sich auf Grund der geringen Größe allerdings nicht nachstellen. Auch war die Einmessung am roten Paneel suboptimal, da das Objekt in sich nicht stabil genug ist und nicht das ganze Projektionsvolumen des LAP-Lasers genutzt werden kann.
Nachdem die Funktionalität des Prototypen hergestellt und erprobt werden konnte wurde zur empirischen Genauigkeitsbetrachtung eine Anwendungsorientierte Messumgebung geschaffen. Als Messumgebung dient hierbei das Messlabor am Fraunhofer IGP (siehe Abbildung 30).

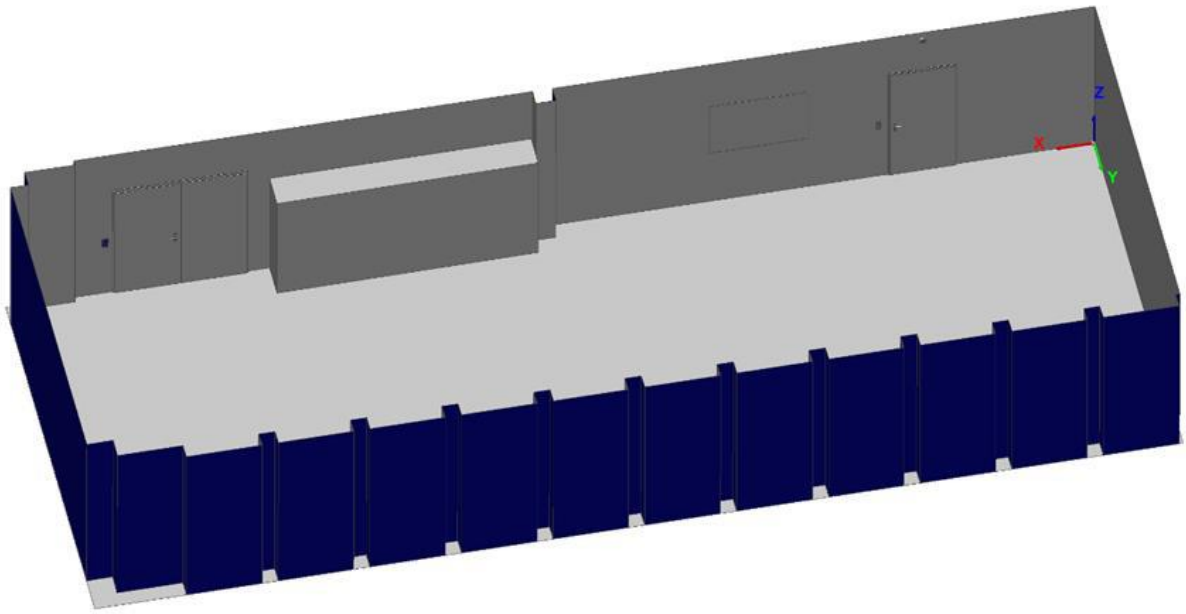

Abbildung 30: CAD-Modell des Messlabors

Die Gegebenheiten wurden auf Grundlage erster Tests an dem neuen Messobjekt optimiert. Die Messumgebung bietet längere Sichten, bei denen Systematische Abweichungen potenziell leichter zu erkennen sind. Auffällig in ersten Versuchen waren die teilweise erhöhten Abweichung der herkömmlichen LAP-Laser Einmessung (siehe Abbildung 31). Das System profitiert in seiner Einmessung von einer hohen Redundanz und Verteilung der Messmarken. Zugleich wurden die Passpunkte stabiler und homogener verteilt platziert. Bei der LAP-Laser Einmessung sind systembasiert mindestens vier Passpunkte notwendig, um eine „Kalibrierung“ durchzuführen. Auf Grund der gesammelten Erfahrung im Umgang mit dem System empfehle ich mindestens 12 Referenzpunkte zur Einmessung zu verwenden, um repräsentable Ergebnisse zu erzielen. Auch ist die korrekte Ausrichtung der retroreflektierenden Marken wichtig, da der Laser- und photodiodenbasierte Suchvorgang hierfür sehr anfällig ist. Die Suchfunktion lässt den Laser einem bestimmbaren Umkreis nach reflekierenden Marken suchen. Die Dioden messen hierbei durchgehend nach dem Zeitpunkt und der dazugehörigen Winkelstellung mit der höchsten, reflektierten Lichtintensität. Da diese Suchfunktion jedoch Zeitgesteuert ist und nach einem bestimmten Intervall lediglich in der letzten Winkelstellung verharrt kann die Einmessung leicht ungenau werden, da der letzte Winkelwert gespeichert wird.

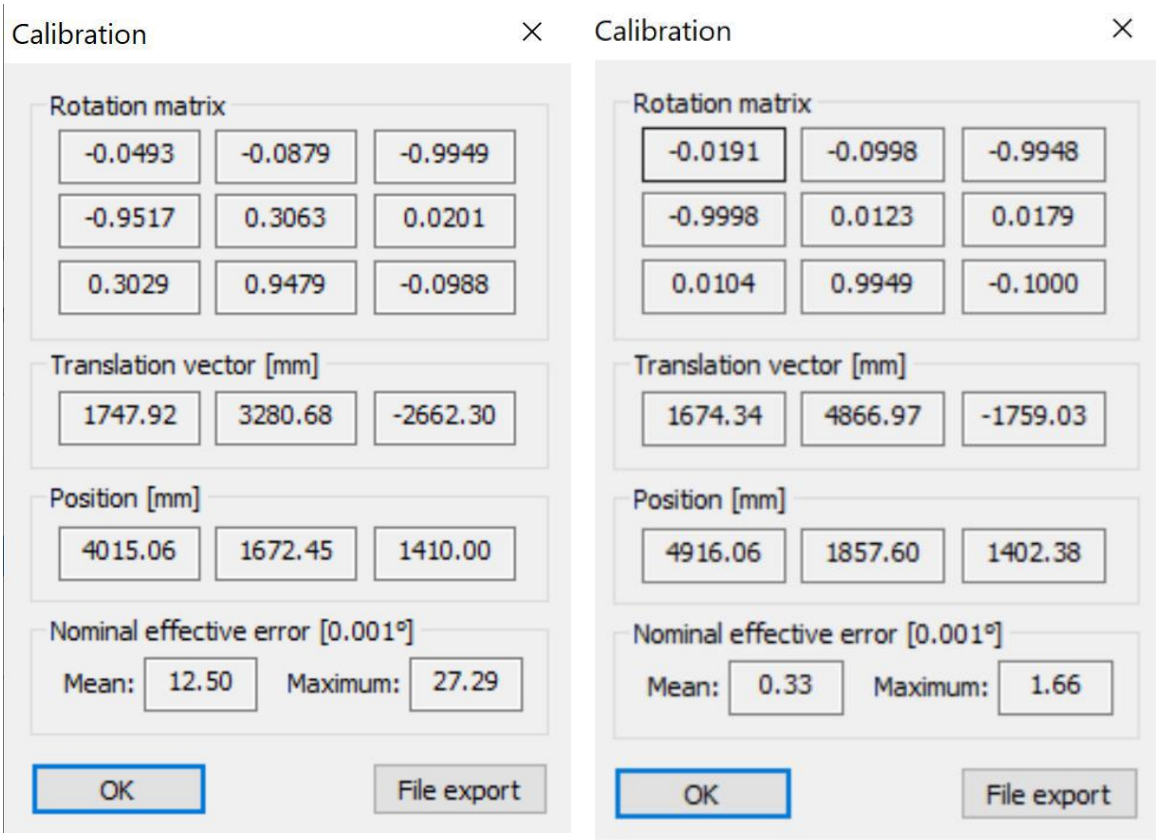

Abbildung 31: Suboptimale Einmessung (links) gegenüber Verbesserten Einmessbedingungen (rechts)

In Fortführung des Projektes können anhand diese Datengrundlage zudem noch realistischere Versuche und Demonstrationen stattfinden. Ein CAD für geplante Konturenprojektionen wurde neben der Genauigkeitsbetrachtung bereits angefertigt (siehe Abbildung 32).

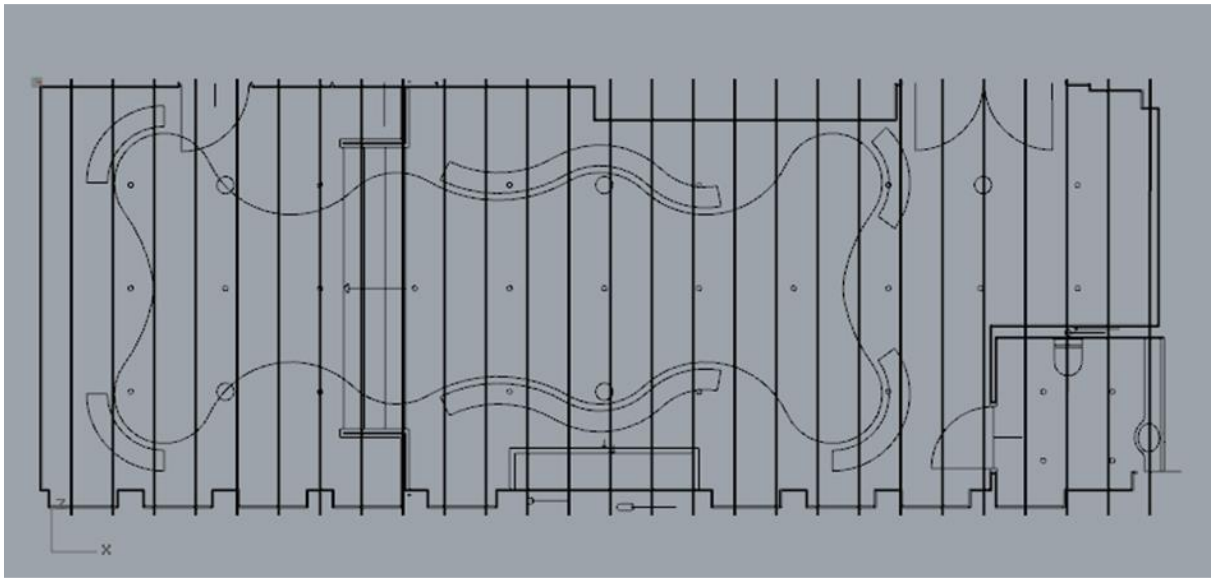

Abbildung 32: Bodenkonturen für geplante Versuche

Zur Genauigkeitsbetrachtung im Labor wurden Schachbrettmarken (Black&White-Targets, BW-Targets) homogen an den Außenwänden verteilt und projizierbare Konturen modelliert. Der Schnittpunkt der Linien bildet hierbei den Mittelpunkt des Ziels (siehe Abbildung 33).

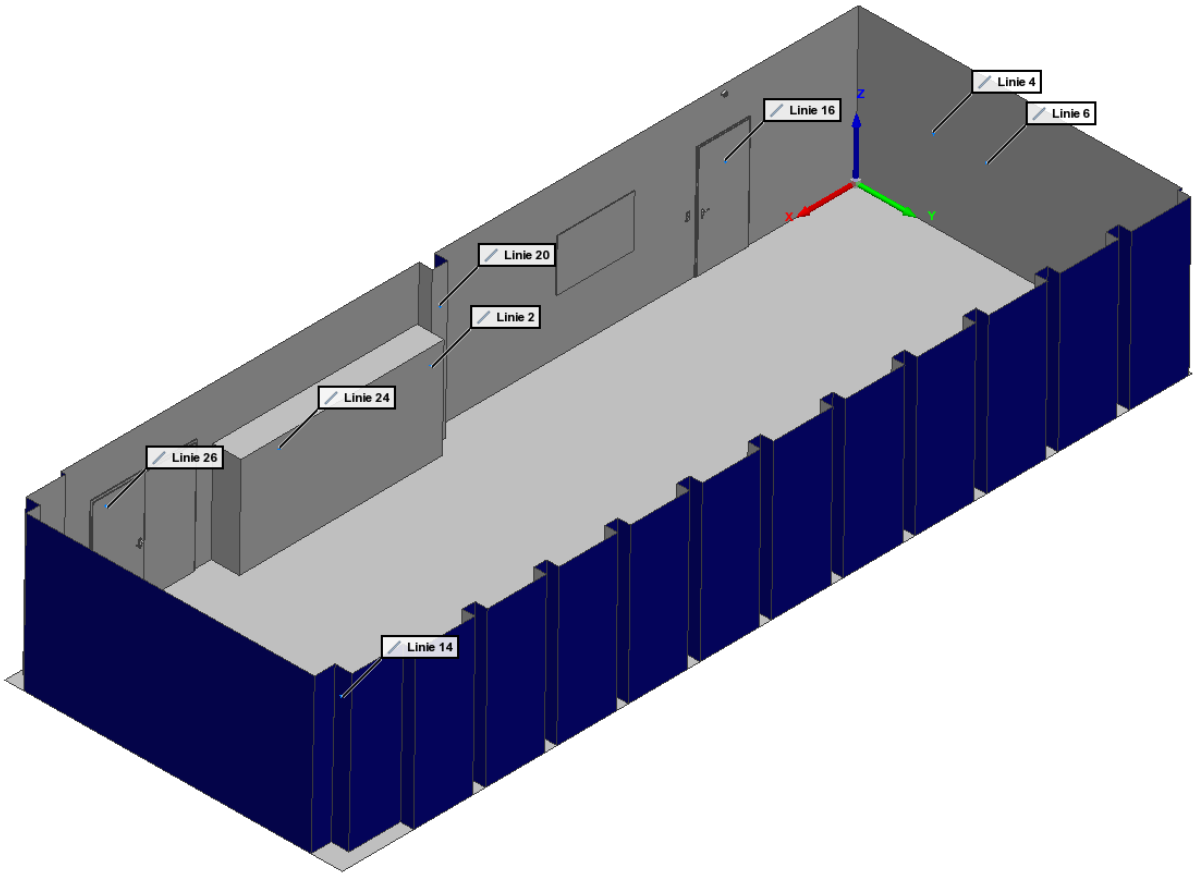

Abbildung 33: BW-Targets im Messlabor

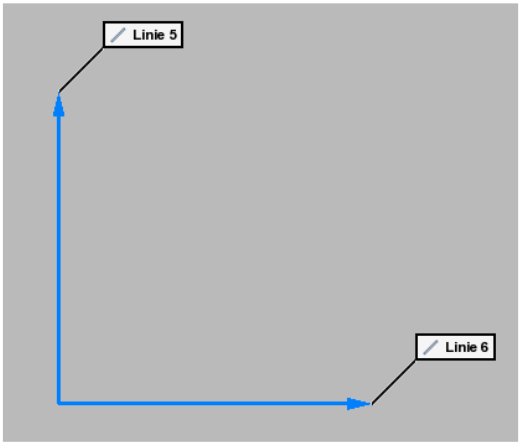

Abbildung 34: Targetmittelpunkt am Schnittpunkt der konstruierten Linien

Anschließend wurden die Targetmittelpunkte in verschiedenen Aufstellungen mit dem Multisensorsystem projiziert. Die Referenzierung der Sensorik geschieht in allen Aufstellungen über fest angebrachte Passpunkte im Messlabor. Jedes Target wurde dreimal gemessen, um Ausreißer zu vermeiden. Sind trotzdem auffällige Werte entstanden wurde ein neuer Standpunkt referenziert und der Prozess für das Target wiederholt. Der Unterschied zwischen Targetmittelpunkt und Projektion wurde in der Targetebene händisch gemessen. Dies hat zur Folge, dass die Messwerte abhängig vom persönlichen Ablesen sind bzw. die menschliche Imperfektion als Faktor mit einspielt.
Eine Verbesserung der Messung ist bereits geplant, hierzu sollen PSD Sensoren zur präzisen Positionserfassung des Laserpunktes genutzt werden. Die Umsetzung dieses Ansatzes ist jedoch zeitlich nicht mehr im Rahmen dieses Projektes einzubinden.

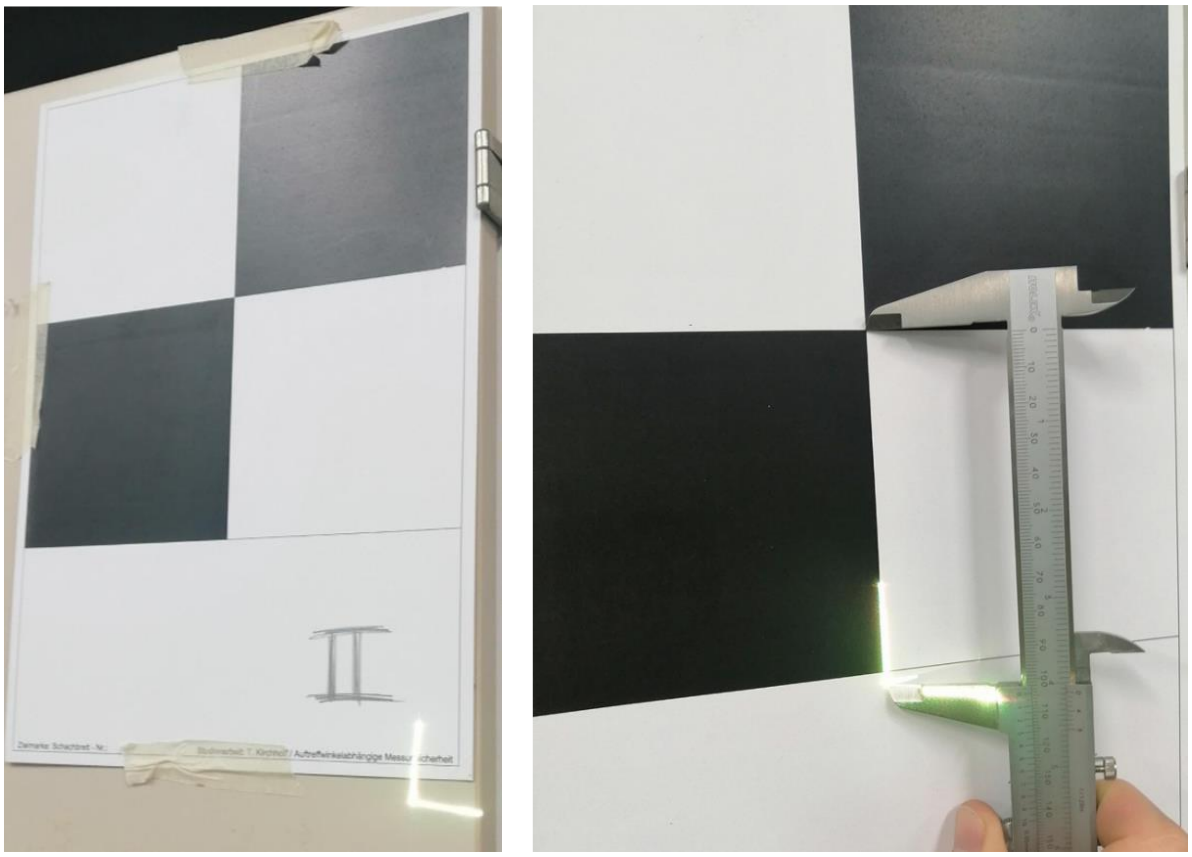

Abbildung 35: Projektionen mit hohen Abweichungen aus Trackermessung

Target	Messung [mm]			Mittelwert	Standardabw.
	1	2	3		
11	181,1	181,5	182,1	181,6	0,41
1	128,3	127,4	130,0	128,6	1,08
2	212,5	213,9	213,0	213,1	0,58
3	155,9	156,1	154,9	155,6	0,52
4	251,6	252,3	252,0	252,0	0,29
5	155,6	155,5	155,9	155,7	0,17
6	221,0	220,6	220,5	220,7	0,22
14	173,3	177,2	173,6	174,7	1,77
			Mittel:	185,2	0,63

Tabelle 1: Ergebnistabelle empirische Betrachtung Trackerweg

Im Kontrast zu den vorherigen Untersuchungen ergaben sich in diesem Szenario bedeutende Abweichungen von bis zu 252,3 mm. Im Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung lässt sich eine geringe Streuung der Messwerte bei einem sehr hohen systematischen Fehlereinfluss erkennen.

Vergleich zum scannerbasierten Lösungsweg

Nach einer intensiven Fehlersuche ließen sich allein am Lasertrackerbasierten Weg keine Auffälligkeiten erkennen. Daher wurde der scannerbasierte Lösungsansatz weiterbearbeitet, um Vergleichswerte zu generieren. Auf Basis des bestehenden Trackeransatzes konnte wurde das zweite Multisensorsystem für den prototypschen Einsatz vorbereitet. Die Umsetzung war durch die vorhandene Grundlage schneller und generell kurzweiliger durchzuführen, da die Transformationsverketteung, der Datenfluss und die Einmessung in diesem Ansatz jeweils weniger Einzelkomponenten aufweisen.

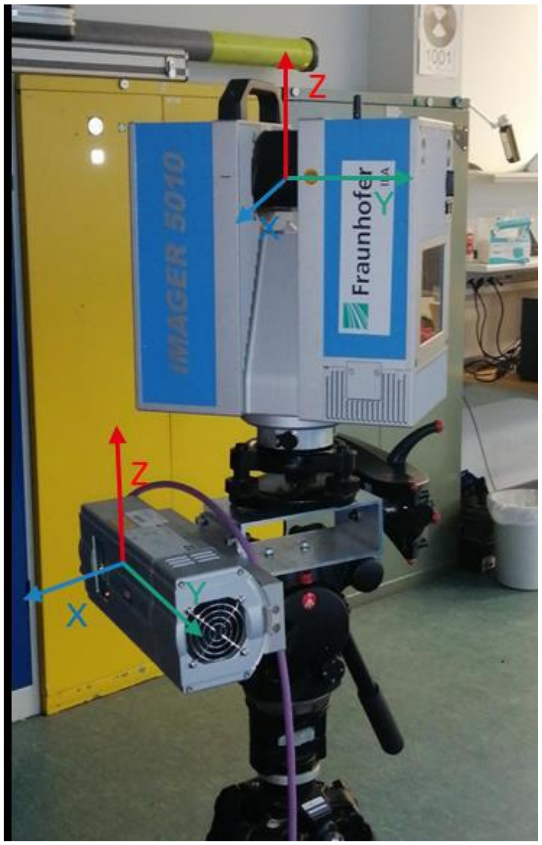

Abbildung 36: Mechanische Verbindung und Koordinatensystem Laserscanner-Lösungsansatz

Anschließend wurde dieselbe empirische Untersuchung durchgeführt:

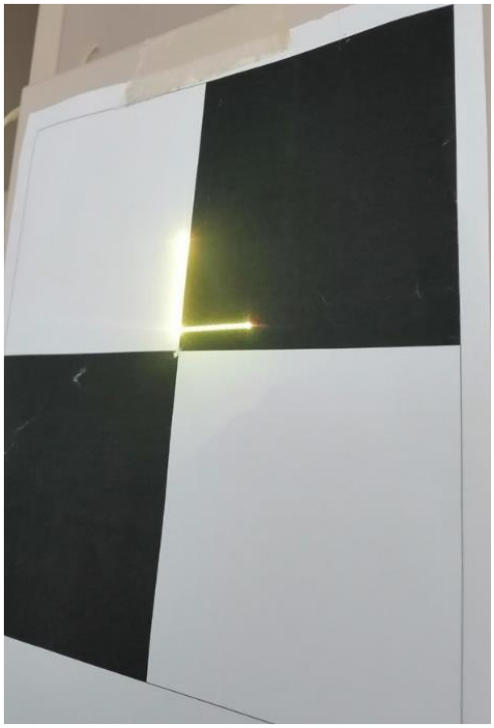

Abbildung 37: Projektion aus Scannermessung

Target	Messung [mm]				
	1	2	3	Mittelwert	Standardabw.
11	9,3	9,5	9,4	9,4	0,08
1	7,2	6,9	7,3	7,1	0,17
2	8,0	8,0	8,2	8,1	0,09
3	7,3	7,4	7,3	7,3	0,05
4	10,4	10,2	10,3	10,3	0,08
5	7,7	7,4	7,8	7,6	0,17
6	11,0	10,6	10,5	10,7	0,22
14	9,8	9,9	9,9	9,9	0,05
			Mittel:	8,8	0,11

Tabelle 2 : Ergebnistabelle empirische Betrachtung Scannerweg

Wie zu erwarten wurde eine höhere Streuung bei dem potenziell ungenaueren Messsystem festgestellt, jedoch sind die Absolutgenauigkeiten bedeutend höher. Der zuvor beobachtete systematische Fehler ist somit Tracker-spezifisch.
Die systematische Fehlerursache kann nun etwas eingegrenzt werden. Die Funktionalität des Projektors sowie die Richtigkeit einiger gemeinsamer Berechnungsschritte und API-Funktionen wurden hiermit bewiesen.
Allerdings lässt sich aus den bisherigen Beobachtungen noch nichts weiter identifizieren. Um den Fehler weiter eingrenzen zu können müssen weitere Untersuchungen stattfinden.

Monte-Carlo-Simulation

An dieser Stelle wird eine Monte-Carlo-Simulation zum Lösungsansatz LAP-Laser und Lasertracker durchgeführt.
Generell ist eine Monte-Carlo-Simulation (MCS), oder Monte-Carlo-Methode (MCM), ein mathematisches Verfahren, welches zur Ergebnisabschätzung verwendet werden kann. Es erstellt essenziell ein Modell möglicher Ergebnisse anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilung, wobei jede Variable in dem Rechenweg mit einer verteilungsbasierten Zufallsgröße behaftet werden kann. (Deggendorf) (Education, 2020)
Praktisch bekommt jede Variable einen möglichen Wertebereich zugeordnet, in diesem Bereich kann die Variable liegen und wo sie liegt wird über eine Verteilungsfunktion bestimmt. Ist die vollständige Berechnung vollendet wird sie erneut durchgeführt, wobei sich die Zufallswerte jeden Simulationsdurchlauf ändern. Nach ***n*** Berechnungen erhält man somit ***n*** verschiedene Ergebnisse in einem vermeintlich realistischen Wertebereich. Wirklich realistisch werden die Ergebnisse sofern die Verteilungsfunktion korrekt gewählt ist. (Deggendorf) (Education, 2020)
In diesem Anwendungsfall werden jegliche Funktionen normalerteilt sein, da die betrachteten Messwerte einen Ungewissheitsbereich besitzen, welcher einer Gaußschen Glockenkurve gleicht. Der Wertebereich ist hier Instrumenten- und Messwertabhängig und wird daher von der Gerätegenauigkeit bestimmt, bzw. werden im Fall der Trackerreferenzierung im Raumkoordinatensystem und der inertialen LAP-Einmessung die Transformationsresiduen verwendet.
Berechnet wird die Messung auf ein Target mit den tatsächlichen Targetkoordinaten als Referenzwert (True_Value). Die Berechnung wird ***n = 10.000***-mal simuliert und als Resultat steht unter anderem der euklidische Abstand zwischen Mittelwert der Simulationen und Wahrheitswert.

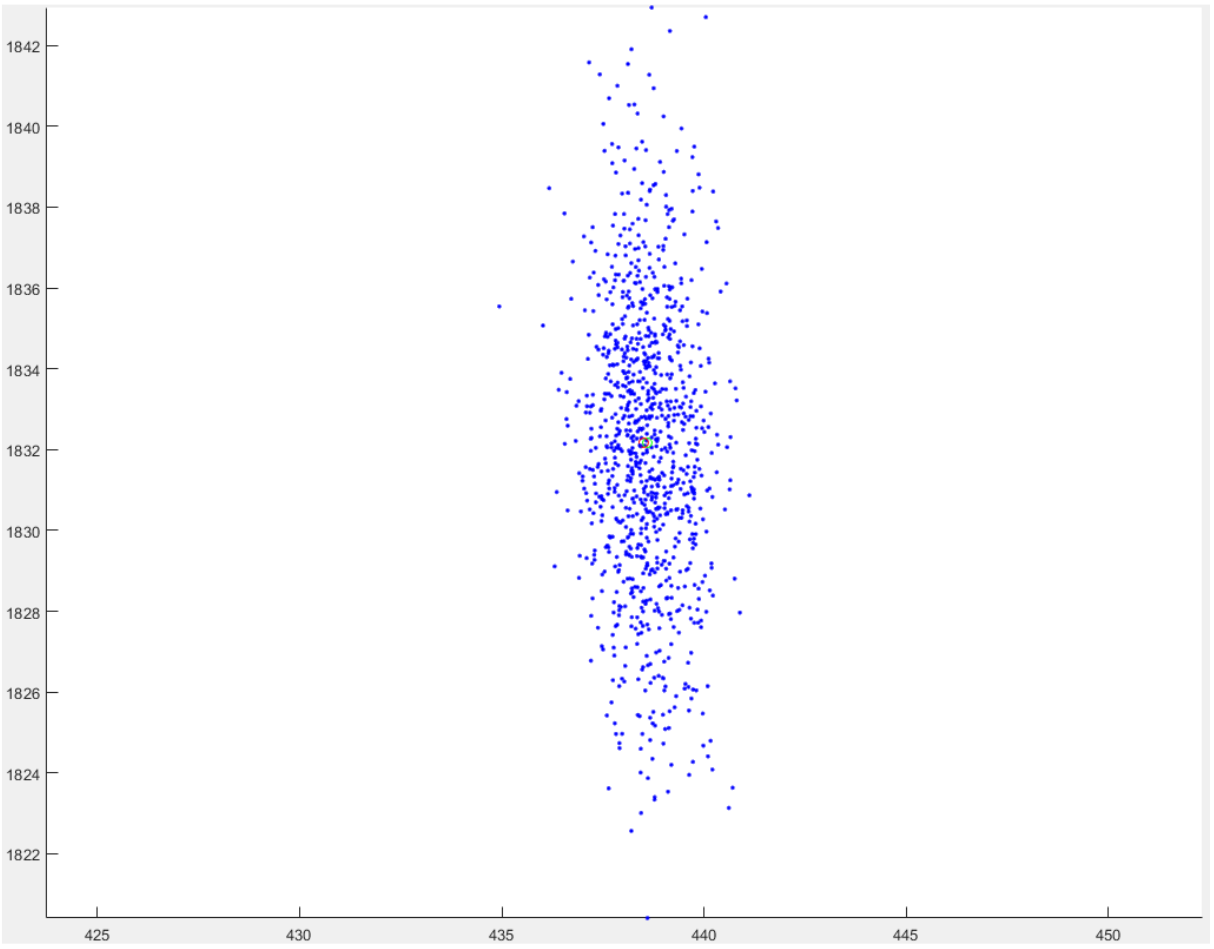

Abbildung 38: Ergebnis MCM Draufsicht (X 1820 – 1844: Y 420 - 455) [mm]

Abbildung 38 zeigt die Gesamtansicht der Streupunkte (blau) der Simulation, von denen nur jeder 10. Punkt geplottet wurde. In grün ist der Mittelwert der Streupunkte zu sehen, der rot gekennzeichnete Punkt ist der wahre Wert. In Abbildung 39 sind diese deutlicher zu erkennen. Dabei wird ersichtlich, dass der Mittelwert der Simulation nicht den True-Value erreicht hat. Die euklidische Distanz zwischen den beiden 3D-Punkten beträgt 0,23 mm.

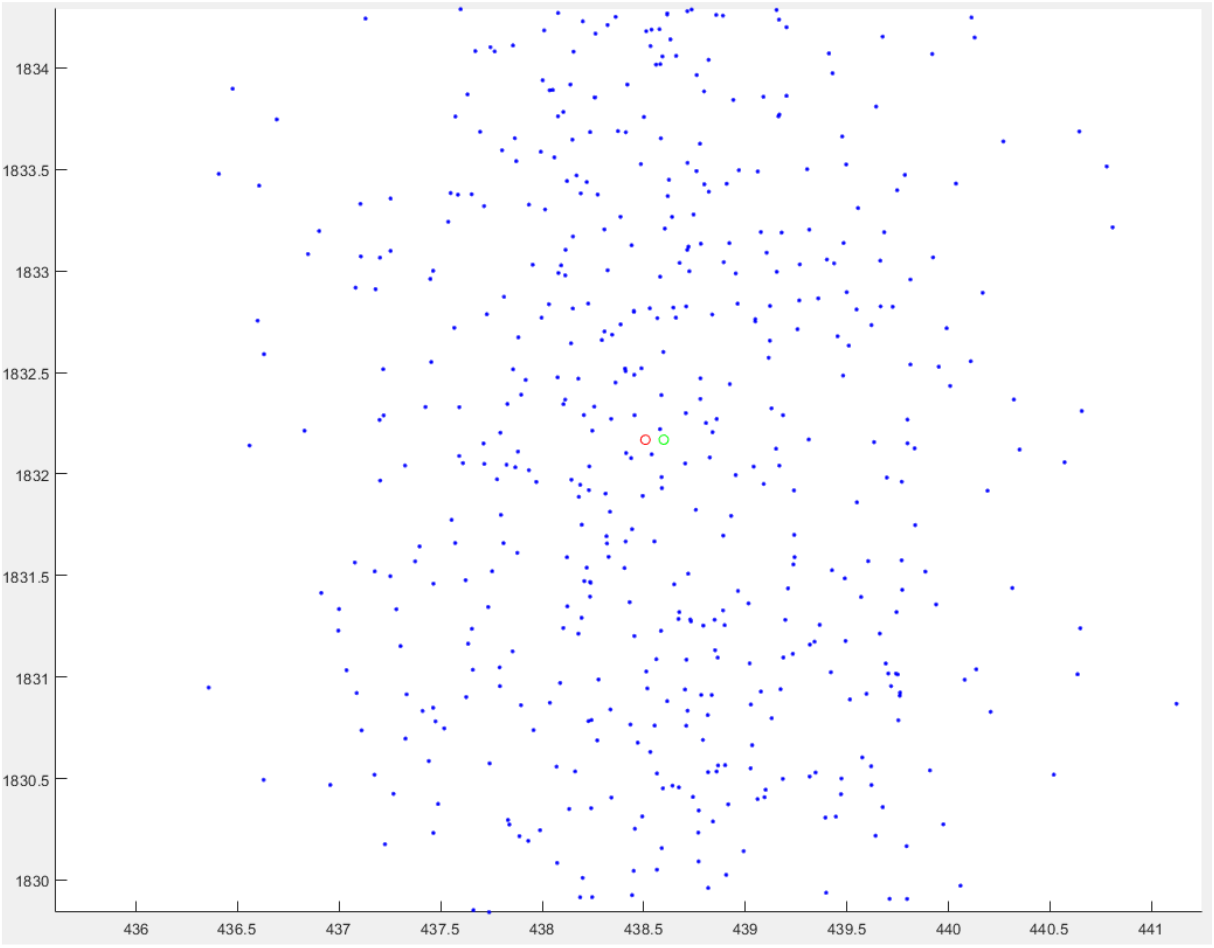

Abbildung 39: Ergebnis MCM Draufsicht, Nahansicht (X 1828,5 - 1835,5; Y 435,5 - 441,5) [mm]

Aus den Ergebnissen der MCM lassen sich einige Annahmen treffen. Die geringe Abweichung des Mittelwertes zum wahren Wert schließt auf eine hohes Genauigkeitspotential der Sensorkombination. In der Simulation wurde mit dem Mittelwert eine Projektionsabweichung unter einem Millimeter erreicht.
Doch vor der Vollendung des Multisensorsystems steht noch die Bestimmung der systematischen Abweichung in der empirischen Betrachtung. Hierzu lassen sich ebenso Schlüsse ziehen. Dadurch, da die Simulation erfolgreich durchgelaufen ist und Ergebnisse nahe dem Erwartungswert resultierten kann von einem korrektem Berechnungsweg zur Projektortransformation ausgegangen werden. Der Fehler lässt sich somit weiter eingrenzen. Durch die Scanner-Tests ist schon bekannt, dass die Sensoransteuerung funktioniert, durch die MCM konnte die Berechnungsform validiert werden. Eine potenzielle Fehlerquelle könnte sich somit im Datenfluss befinden. Der suboptimale Workflow, welcher händische Werteübertragung beinhaltet, die zusätzlichen Transformationen, Umwandlungen und Übertragungen liefern Raum für vermeintliche Fehlerquellen. Die potenziellen Lücken müssen weiter untersucht werden.

3.7 AP 7: Transfer und Dokumentation

AP 7	Transfermaßnahmen und Ergebnisdokumentation
Laufzeit: PM10 – PM24	**Personaleinsatz**: 3 MM, 2 MM Hiwi
Ziel: Planung und Koordination von Maßnahmen zum Transfer der Ergebnisse in die Industrie	
Lösungsweg: Während der Projektlaufzeit findet ein kontinuierlicher Wissensaustausch mit den Industriepartnern statt, die im PA vertreten sind. Durch die Praxisnähe des Forschungsprojekts ist zum einen ein erhöhtes Interesse der Industrievertreter gegeben und zum anderen eine Umsetzung erster Ergebnisse bereits während der Projektlaufzeit zu erwarten. Durch die Workshops bei den PA Mitgliedern sollen die Anforderungen, Erwartungen und äußeren Rahmenbedingungen der Projektion sukzessive Berücksichtigung bei der Hardwarekonfiguration und Algorithmenentwicklung finden. Sämtliche Ergebnisse sollen bereits während der Projektlaufzeit in die Wirtschaft transferiert werden, um die Defizite der Projektionssysteme möglichst noch während der Projektlaufzeit abzuschwächen. Die Ergebnisse der Untersuchungen und Praxisversuche werden über die Projektlaufzeit kontinuierlich dokumentiert, fließen in die Entwicklungsarbeit ein und werden im Abschlussbericht aufbereitet. Nach Abschluss der Verifizierung wir in Zusammenarbeit mit den PA ein Integrationskonzept entwickelt, dass den Wirtschaftsvertretern als Leitfaden zur Einführung des Systems dienen soll.	
Ergebnis: Transfermaßnahmen und Workshops zur Sicherung der Interessen der Industrievertreter im PA. Der Abschlussbericht liegt vor. Für die industrielle Nutzung der Ergebnisse liegt ein Integrationskonzept einschließlich Schulungsmaterial zur Nutzung durch bisher nicht mit der Technologie vertrauten KMU's vor.	

Zusätzlich zur den planmäßigen Zwischenmeetings und dem stätigen Austausch zum Projektablauf mit den Mitgliedern des PA in der Bearbeitungszeit des Forschungsvorhabens wurde noch ein außerplanmäßiges Abschlusstreffen als Hybridveranstaltung am Fraunhofer IGP abgehalten. Bei diesem Treffen wurden Ergebnisse dargestellt, ein Prototyp präsentiert und an das Projekt anschließende Verarbeitungen des erarbeitenden Wissensstandes geplant.
Die Maßnahmen zum Wissenstransfer sind weiter in Kapitel 6 erläutert.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die Komplexität des Vorhabens erfordert die Bearbeitung durch wissenschaftliche Mitarbeiter mit Kenntnissen auf den folgenden Gebieten:

- Schiffsfertigungstechnik
- Messtechnik
- Auswertemethoden von Messdaten
- Programmierung

Gebucht wurden folgende Personenmonate für unterschiedliche Stellen in der Projektbearbeitung:

- Wissenschaftliche Mitarbeite (EG13) mit 16,89 PM
- Technische Mitarbeiter (EG10 + EG8) mit 7,34 PM
- Wissenschaftliche Hilfskräfte mit 6,02 PM
- Studentische Hilfskräfte mit 2,16 PM

Innerhalb des Forschungsvorhabens waren umfangreiche Testmessungen und dessen Auswertungen durchzuführen, um zum einen eine Datenbasis zur Entwicklung der Algorithmen zu schaffen und zum anderen, um die erzielen Ergebnisse der Softwareberechnungen durch manuelle Auswertungen zu verifizieren. Die studentischen Hilfskräfte führten unterstützende Tätigkeiten zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Testmessungen durch. Zusätzlich wurden durch studentische Hilfskräfte redaktionelle Arbeiten durchgeführt. Alle studentischen Hilfsarbeiten erfolgen unter Anleitung eines wissenschaftlich-technischen Mitarbeiters.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mobilität ist ein wichtiger Faktor für die Anwendung von Projektionssystemen in der schiffbaulichen Fertigung. Die bisherigen Systeme, deren Positionsbestimmung mit Hilfe von Referenzmarken beruht, sind aufgrund des Aufwandes zur Positionsbestimmung und den Bedingungen im Schiffbau ungeeignet.
Um ein mobiles Projektionssystem zu entwickeln, das im Werftumfeld eingesetzt werden kann, wurden in Zusammenarbeit mit dem PA zwei relevante Anwendungsszenarien identifiziert: Die Projektion an Wänden in lang gestreckten, schmalen Innenräumen und die Projektion an Wände und Boden in großen, weitläufigen Räumen. Für diese Anwendungsfälle galt es, Referenziermesstechnik zu untersuchen, die zusammen mit einem Projektionssystem zu einem Multi-Sensor-Projektionssystem fusioniert werden konnten. Es wurde festgestellt, dass aufgrund der Unterschiedlichkeit der Anwendungsfälle verschiedene Referenziermesstechnik geeignet ist. In langen Räumen bietet sich die Fixierung einer T-Probe am Projektionssystem am, deren Position im Raum mit einem Lasertracker, nach Einmessung desselben, bestimmt werden kann. In weitläufigen Räumen hingegen können mit der Verwendung eines auf dem Projektionssystems fixierten Laserscanner gute Ergebnisse erzielt werden. Anhand der 3D-Punktwolke, die aus einem Scan resultiert, kann auf Basis der bekannten räumlichen Begebenheiten, beispielsweise durch ein CAD oder ein vorheriger Scan, die Position des Laserscannerzentrums ermittelt werden.
Um die Position des Projektionszentrums zu bestimmen, muss dessen relative Position zum Zentrum des Referenziermesssystems bekannt sein. Dazu gilt es jeweils, die mechanische Verbindung zwischen Messsystem und Projektionssystem zu kalibrieren. Die Kalibrierung erfolgte durch die Kenntnis der Transformationsparameter zwischen den Systemen.
Für den Einsatz der beiden Multi-Sensor-Projektionssystemen wurden Workflows inklusive des Datenflusses entwickelt. Zudem wurden Genauigkeitsuntersuchungen anhand von empirischen Tests durchgeführt. Diese ergaben, dass die erreichten Projektionsgenauigkeiten den Anforderungen nicht genügen. Hier gilt es weitere Untersuchungen durchzuführen. Insbesondere wird eine Steigerung der Genauigkeit durch eine Einbindung von PSD-Sensoren in die Kalibrierung erwartet.
Bisher wurden die entwickelten mobilen Multi-Sensor-Projektionssysteme nur unter Laborbedingungen getestet. Eine Anwendung unter Werftbedingungen steht noch aus. Wird eine Anwendbarkeit im Schiffbau festgestellt, so gilt es, den Einsatz mobiler Projektionssysteme in die Fertigungsprozesse zu integrieren. Dabei ist jeweils zu prüfen, ob die Charakterisierung der Einsatzgebiete den Anwendungsfälle abdeckt. Es wird erwartet, dass weitere Anwendungsszenarien zu identifizieren und für diese geeignete Referenziermesssysteme zu finden sind.

6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft und durchgeführte Maßnahmen

Folgend sind die geplanten und bereits umgesetzten Maßnahmen zum Ergebnistransfer des Forschungsvorhabens dargestellt.

Verröffentlichungen:

Schiff&Hafen Ausgabe 1/2021
Titel: Projektionssysteme in der schiffbaulichen Fertigung (ProSF)
Entwicklung von Methoden zum flexiblen Einsatz von mobilen Projektionssystemen zur Fertigungsunterstützung

Schiff&Hafen Ausgabe 1/2023
Titel: AiF-Vorhaben ProSF
Projektionssysteme in der schiffbaulichen Fertigung – Entwicklung von Methoden zum flexiblen Einsatz von mobilen Projektionssystemen zur Fertigungsunterstützung

Masterarbeit
Autor: Dominik Hack
Titel: Untersuchung multisensorischer Ansätze zum mobilen Einsatz von Projektionssystemen
Erstprüfer: Prof. Dr. –Ing. Thomas Willemsen
Zweitprüfer: Dr. –Ing. Michael Geist
URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2022-0252-5
Abgabedatum: 10.06.2022

Jahresbericht des Fraunhofer Instituts für Großstrukturen in der Produktionstechnik IGP 2021,
Titel: ProSF: Projektionssysteme in der schiffbaulichen Fertigung – Entwicklung von Methoden zum flexiblen Einsatz von mobilen Projektionssystemen zur Fertigungsunterstützung [22]

Verwertung nach Projektende:

Zum Einbringen der im Forschungsprojekt gesammelten Kenntnisse im Bereich Laserprojektionssysteme in die industrielle Fertigung von Großstrukturen werden Industrieprojekte mit folgenden Partnern durchgeführt:
Liebherr:
Projektionstests in 2022 und 2023 zur Einbindung von Laserprojektionssystemen in 4 verschiedene Fertigungsprozesse
Geplante Nutzung des, in ProSF entwickelten, mobilen Projektionssystems

Tfc:
Geplante Projektionstests in 2023 zur Einbindung in einem vorhandenen Fertigungsprozess

7 Literaturverzeichnis

[1] Knaack, L.; Geist, M.; Gierschner, F.: Abschlussbericht IGF-Vorhaben: Einsatz von Laserscannern im Stahlkörperbau (ELASTA). Rostock 2014.
[2] Buchholz, H.; Reiter, K.: OFIN - Optimierung und Beurteilung des Oberflächenfinishs im Yachtbau, Bd. Tagungsband der Statustagung 2010 2010.
[3] Meister, M.; Gierschner, F.; Geist, M.; Knaack, L.: Regelgeometriebasiertes Ist-Modell für den Innenausbau von Megayachten. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016. Heidelberg 2016.
[4] Grewe, O.; Geist, M.: Reverse Engineering von Schiffsstrukturen. In: HANSA Internationale Maritime Journal 151. Jahrgang 2014 Nr. 5 (2014) Mai 2014, S. 30–34.
[5] Grewe, O.; Geist, M.; Bohnenberg, R.: Einsatz terrestrischer Laserscanner bei der Reorganisati-on von Fertigungslayouts. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscan-ning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011. Berlin 2011.
[6] Biskup, K.; Arias, P.; Lorenzo, H.; Armesto, J.: Application of Terrestrial Laser Scanning for Shipbuilding. In: P. Rönnholm, H. Hyyppä, J. Hyyppä (Hrsg.): Proceedins of the ISPRS Work-shop "Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007" 2007.
[7] Hiekata, K.; Yamato, H.; Enomoto, M.; Oida, Y.; Furukawa, Y.; Makino, Y.; Sugihiro, T.: Development of Accuracy Evaluation System for Curved Shell Plate by Laser Scanner. In: Pokojski, J.; Fukuda, S.; Salwiński, J. (Hrsg.): New World Situation: New Directions in Concurrent Engi-neering. Proceedings of the 17th ISPE International Conference on Concurrent Engineering. London 2011.
[8] Ernst-Siebert, R.: KMU im globalen Innovationswettbewerb. Eine Untersuchung des betriebsgrößenspezifischen Innovationsverhaltens und innovationsinduzierter Beschäftigungseffekte, 1. Auflage. Mering 2008.
[9] Api-Metrology. 2021. apimetrology.com. https://apimetrology.com/api-brochures/. [Online] 2021. [Zitat vom: 09. Juni 2023.]
[10] Ludwig, T.; Wolnik, K.; Tholen, J.: Beschäftigung, Auftragslage und Perspektiven im deutschen Schiffbau. Ergebnisse der 23. Betriebsrätebefragung im September 2014. URL: https://www.econstor.eu/bitstream/10419/109018/1/821089498.pdf 25.07.2023.
[11] Quality Engineering: Siemens nutzt mobile Projektionssysteme. Laser statt Schablone. URL: http://quality-engineering.industrie.de/allgemein/laser-statt-schablone/. Abrufdatum 25.07.2023.
[12] Thomas Lübke: Laserprojektoren in der Fertigung verbessern Produktionsabläufe. URL: https://www.plastverarbeiter.de/qualitaetssicherung/laserprojektoren-in-der-fertigung-verbessern-produktionsablaeufe.html. Abrufdatum 25.07.2023.
[13] GLM Lasermeßtechnik GmbH: 3D-Lasermesstechnik im Schiffbau. Projektbeispiel Flensburger Schiffbau-Gesellschaft 2017.
[14] LAP GmbH Laser Applikationen: COMPOSITE PRO LASERPROJEKTIONSSYSTEM für die Produktion von und mit Verbundwerkstoffen. URL: https://www.lap-laser.com/de/produkte/cad-pro/ Abrufdatum 25.07.2023
[15] LAP GmbH: CAD-PRO Laserprojektoren. URL: https://www.lap-laser.com/de/produkte/cad-pro/ Abrufdatum 25.07.2023
[16] Deggendorf, Technische Hochschule. www.risknet.de. https://www.risknet.de/wissen/rm-methoden/monte-carlo-simulation/. [Online] [Zitat vom: 09. Juni 2023.]
[17] EXTEND3D GmbH: Zubehör URL: https://www.extend3d.com/de/produkt/zubehoer/ Abrufdatum: 25.07.2023
[18] Bär, T.et al.: Das Verbundprojekt ARVIDA. In:Schreiber, Zürl et al. (Hg.) 2017 – Web-basierte Anwendungen Virtueller Techniken

[19] Encarnação, J. L.: Augmented-Reality für industrielle Anwendungen in Entwicklung, Produktion und Service – Am Beispiel des Leitprojektes ARVIKA (1999 bis 2003) 2008
[20] Alt, T. et al.: Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld – Das AVILUS-Projekt – Techniken und Anwendungen. 2012 Springer, Berlin, Heidelberg
[21] Ait-Djoudi, J.: TUHH: Projekt PROSPER zeigt die Zukunft des Schiffsbaus. 2015 URL: https://intranet.tuhh.de/presse/pressemitteilung_einzeln.php?id=10155&Lang=de Abrufdatum 25.07.2023
[22] Fraunhofer IGP: FhG Jahresbericht 2021 URL: https://www.igp.fraunhofer.de/content/dam/agp/de/documents/Jahresberichte/Fraunhofer%20IGP%20Jahresbericht%202021web.pdf Abrufdatum 25.07.2023
[23] Education, IBM Cloud. 2020. www.ibm.com. https://www.ibm.com/de-de/cloud/learn/monte-carlo-simulation. [Online] 24. August 2020. [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[24] Engineering, Quality. Quality Engineering: Siemens nutzt mobile Projektionssysteme. Laser statt Schablone. http://quality-engineering.industrie.de/allgemein/laser-statt-schablone/. [Online] [Zitat vom: 02. März 2017.]
[25] Faro. 2022. faro.com. https://www.faro.com/de-DE/Products/Hardware/Tracer-Laser-Projectors-for-Manufacturing. [Online] 2022. [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[26] Fröhlich, Zoller und. 2022. www.zofre.de. https://www.zofre.de/en/laser-scanners. [Online] 2022. [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[27] Gordon, Bianca. 2008. Doktorarbeit zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. Darmstadt : s.n., 2008.
[28] Hexagon. 2022. www.hexagonmi.com. https://www.hexagonmi.com/de-DE/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960. [Online] 2022. [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[29] IGP, Fraunhofer. igp.fraunhofer.de. https://www.igp.fraunhofer.de/de/Im_Profil.html. [Online] Fraunhofer-Gesellschaft. [Zitat vom: 9. Juni 2022.]
[30] Joeckel, Rainer, Stober, Manfred und Huep, Wolfgang. 2008. Elektonische Entfernungs- und Richtungsmessung . Stuttgart : Herbert Wichmann Verlag, 2008.
[31] Kahmen, Heribert. 2006. Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde. Berlin : Awlter de Gruyter, 2006.
[32] Keferstein, Claus P. 2011. FertigungsmesstechnikPraxisorientierteGrundlagen, moderne Messverfahren 7.Auflage. Buchs, Schweiz : Vieweg + Teubner Verlag, 2011.
[33] Keitler, Peter und Heuser, Nicolas. extend3d.com. https://www.extend3d.com/de/produkte/. [Online] [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[34] Keyence. 2021. www.keyence.de. www.keyence.de. [Online] 2021. [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[35] Kreutzer, Michael. 2016. Entwurf, Simulation und Optimierung mehrkamerabasierter 6D-Pose-Messsysteme robotergestützten Koordinatenmesstechnik: zur Verringerung der Positionsunsicherheit in der. [Online] 2016. [Zitat vom: 10. 6 2022.] https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00000258.
[36] LAP-Laser. 2022. lap-laser.com. https://www.lap-laser.com/de/produkte/pro-soft/. [Online] 2022. [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[37] Lasercomponents. www.lasercomponents.com. https://www.lasercomponents.com/de/fotodioden/positionsempfindliche-detektoren/psd/. [Online] [Zitat vom: 09. Juni 2022.]
[38] Lübke, Thomas. Laserprojektoren in der Fertigung verbessern Produktionsabläufe. http://www.plastverarbeiter.de/35811/laserprojektoren-in-der-fertigung-verbessern-produktionsablaeufe/. [Online] [Zitat vom: 02. März 2017.]
[39] Luhmann, Thomas. 2000. Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen Methoden und Anwendung. Heidelberg : Wichmann Verlag, 2000.

[40] Luhmann, Tohmas. 2017. Nahbereichsphotogrammetrie. Oldenburg : Wichmann Verlag, 2017.
[41] Müller, T. und Schwendemann, J. 2009. iGPS - ein vielseitiges Messsystem hoher Genauigkeit. s.l. : AVN, 2009.
[42] Schäfer, Stephan und Carsten:, Pinnow. 2015. Industrie 4.0: Grundlagen und Anwendungen; Branchentreff der Berliner Wissenschaft und Industrie. . Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2015.
[43] Schuth, Michael und Buerakov, Wassili. 2017. Handbuch Optische Messtechnik. Trier : Carl Hanser Verlag, 2017.
[44] Witte, Bertold und Sparla, Peter. 2010. Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen 7. Auflage. Aachen : Wichmann Verlag, 2010.
[45] Z-Laser. z-laser.com. https://z-laser.com/produkte/laserprojektor/zlp2/. [Online] [Zitat vom: 09. Juni 2022.]