

# Instant Factory Maps

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19170 N

## Thema

Entwicklung einer automatisierten 3D-Layouterfassung zur Unterstützung von Fabrikplanungsprozessen

## Berichtszeitraum

01.01.2017 – 31.08.2019

## Forschungsvereinigung

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB

## Forschungseinrichtung(en)

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Hannover, 05.10.2020

---

Ort, Datum

M. Sc. Dominik Melcher *i. A. D. Melcher*

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung</b> .....	<b>4</b>
<b>3 Darstellung der erzielten Ergebnisse</b> .....	<b>5</b>
<b>AP1: Definition von Use-Cases und Anforderungen</b> .....	<b>5</b>
<b>AP2: Konzeption</b> .....	<b>5</b>
<b>AP3: Umsetzung</b> .....	<b>11</b>
<b>AP4: Validierung</b> .....	<b>18</b>
<b>AP5: Projektmanagement und Dokumentation</b> .....	<b>30</b>
<b>4 Durchführende Forschungsstellen</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1 Forschungsstelle 1: IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH</b> ....	<b>31</b>
<b>5 Förderhinweis</b> .....	<b>31</b>
<b>6 Literatur</b> .....	<b>32</b>
<b>7 Bilderverzeichnis</b> .....	<b>32</b>
<b>8 Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>33</b>

## **1 Zusammenfassung**

Die logistische Planung einer Fabrik stellt einen komplexen Prozess dar, der aus verschiedenen Teilprozessen besteht. Ein besonders ressourcenintensiver Teilprozess bildet die Aufnahme der vorhandenen Fabrikstrukturen. Konventionell werden diese Aufnahmen händisch von einem oder mehreren Experten vor Ort durchgeführt. Die Dauer der Aufnahme nimmt dabei teilweise die Hälfte des gesamten Fabrikplanungsprojekts in Anspruch. Aufwendig ist hierbei vor allem die Aufnahme, Zuordnung und Interpretation von vorhandenen Fabrikflächen und Betriebseinrichtungen. Dieser hohe Aufwand wirkt insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen abschreckend. Aus diesem Grund werden umfassende Fabrikplanungsprozesse nicht durchgeführt, wodurch Potenziale verloren gehen und eine frühzeitige Ausrichtung der Produktion auf die steigenden Marktanforderungen nicht möglich ist. Das durchgeführte Forschungsprojekt „Entwicklung einer automatisierten 3D-Layouterfassung zur Unterstützung von Fabrikplanungsprozessen“ hatte das Ziel den Aufwand für die Datenaufnahme zu reduzieren und gleichzeitig ein umfassendes dreidimensionales Abbild des Fabriklayouts zu erzeugen. Innerhalb des Abbilds soll das Bearbeiten des Layouts ohne Nachbearbeitung möglich sein.

Die Kernbereiche des Forschungsprojekts sind der Einsatz einer Drohne für die Aufnahme des IST-Layouts und eine automatisierte dreidimensionale Datenverarbeitung des aufgenommenen Layouts. Eine Drohne besitzt im Gegensatz zu dem Menschen verschiedene Vorteile, wie bspw. die Möglichkeit eine Anlagen zu überfliegen. Für die Aufnahmen wird die Drohne mit einer hochauflösenden Kamera bestückt. Während des Fluges nimmt sie Bild- oder Videodaten der Fabrikumgebung auf. Die Daten werden anschließend mittels Photogrammetrie verarbeitet und daraus ein dreidimensionales Modell erzeugt. Das Modell wird anschließend ausgerichtet und skaliert, sodass ein dreidimensionales Abbild der Fabrik entsteht.

Neben der reinen Aufnahme des Fabriklayouts umfasst die Forschungsarbeit eine automatisierte Auswertung der Layoutdaten. Konventionell ist es mit großem Aufwand verbunden die verschiedenen funktionalen Flächen, wie bspw. Transportwege, Gehwege oder Lagerflächen und Objekte in einer Fabrik zu erkennen und richtig zu interpretieren. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden Methoden entwickelt, die automatisch Objekte oder Flächen innerhalb des dreidimensionalen Abbilds erkennen und segmentieren. Dadurch wird der Fabrikplaner bei der Flächen- und Objekterkennung unterstützt. Durch die Ergebnisse sind Layoutplanungen oder Layoutanalysen direkt in dem dreidimensionalen Abbild möglich. Weiterhin können Materialflüsse in dem dreidimensionalen Abbild visualisiert werden.

## **2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Steigende Marktdynamik und erhöhter Kostendruck aufgrund der Globalisierung zwingen produzierende Unternehmen sich zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit dem dynamischen Unternehmensumfeld anzupassen [Gru15]. Dabei kann die hohe Reaktions- und Veränderungsfähigkeit nur durch eine kontinuierliche und innovative Anpassung der Fabrik- und Produktionsstrukturen sowie die Planung wandlungsfähiger Fabriken sichergestellt werden [Wie14]. Die Fabrikplanung stellt dabei den Prozess zur systematischen und zielorientierten Gestaltung einer Fabrik dar, mit dem Ziel, eine hohe Wirtschaftlichkeit, die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit sowie die Attraktivität der Fabrik sicherzustellen [Paw14].

Fabrikplanungsprozesse sind in der Regel komplex und ressourcenintensiv. Besonders die aktuell händisch durchgeführte Datenaufnahme und -analyse im Rahmen der Grundlagenermittlung nimmt bis zu 50 Prozent des Projektaufwands ein [Wie14]. Aufwandstreiber ist insbesondere die Ermittlung des bestehenden Layouts mit seinen Betriebsanrichtungen und unterschiedlichen Flächen, wie Lager-, Bereitstellungs-, Maschinen- sowie weiteren Funktionsflächen und deren Zuordnung bzw. Interpretation. In der Folge liegen aufgrund des hohen Erhebungsaufwands häufig keine detaillierten und durch gewachsene Strukturen keine aktuellen Layoutinformationen vor [Wie14]. Aufgrund der daraus resultierenden hohen Projektdauer und -kosten zur Ermittlung der Flächenbilanz sowie der Erstellung der Maschinendatenblätter, lehnen kleine und mittlere Unternehmen (KMU) umfassende und strukturierte Fabrikplanungsprojekte häufig ab [Ham14].

Da die Gebäudeplanung aktuell häufig über dreidimensionale Computermodelle erfolgt (Building Information Modeling – BIM) sollte nicht nur im Rahmen einer digitalen Fabrik und Industrie 4.0 die Layouterfassung im Rahmen der Grundlagenermittlung in drei Dimensionen erfolgen. Aktuell werden Layouts meist zweidimensional aufgezeichnet. Vor dem beschriebenen Hintergrund des Aufwands sollte die Grundlagenermittlung außerdem stärker automatisiert werden. Moderne Technologien wie bspw. teilautonom fliegende Flugroboter, 3D-Kameras oder computergestützte Bildverarbeitung bieten das dafür notwendige Potenzial.

### **3 Darstellung der erzielten Ergebnisse**

#### **AP1: Definition von Use-Cases und Anforderungen**

##### ***Durchgeführte Arbeiten***

Im Rahmen von AP 1 wurden die Anforderungen und Use-Cases für das Forschungsvorhaben aufgenommen und mit den beteiligten Projektpartnern diskutiert. Die Anforderungsaufnahme erfolgte abschließend im Rahmen eines Projekttreffens am 27.06.2017 mit allen Projektpartnern. Es wurden insbesondere die Anforderungen an das Drohnensystem und an das Aufnahmeverfahren für den Layoutscan diskutiert und im Nachgang aufgearbeitet und strukturiert.

##### ***Erzielte Ergebnisse***

Die Use-Cases für das Forschungsprojekt sind vielfältig und gestalten sich wie folgt:

- Scan von einzelnen Anlagen, um eine digitales 3D-Abbild der Anlage zu erstellen
- Scan von Produktionszellen (mehreren Produktionsanlagen) für die Planung von einzelnen Fertigungsbereichen in einer Fabrikhalle
- Scan eines ganzen Fabriklayouts für die Fabrikplanung
- Scan der Außenseite einer Fabrik, um die Daten mit dem Layoutscan zu kombinieren und daraus ein vollständiges Fabrikabbild zu schaffen

Für das Drohnensystem und das zu erstellende digitale Fabriklayout wurden folgende Anforderungen festgelegt:

- Genauigkeit des Messsystems je nach Anwendungsfall zwischen 1 cm und 10 cm
- Flugsteuerung vorerst manuell mit Assistenzsystemen
- Flugdauer ca. 20 min
- Traglast der Drohne ca. 2 kg
- Verfügbarkeit von Farbdaten in der dreidimensionalen Punktwolke
- Erweiterbarkeit des Drohnensystems und der -steuerung
- Ein GPS-Signal kann nicht zur Flugunterstützung verwendet werden, da keine flächendeckende Verfügbarkeit sichergestellt werden kann.
- Teilautonomer Flug nur als Konzept, für Tests bei Projektpartnern manuell gesteuerter Flug
- Digitales Fabriklayoutmodell soll in offenen Datenformaten wie .obj oder .ply gespeichert werden
- Digitales Fabriklayoutmodell soll in einzelne Objekte unterteilt werden
- Messen von Strecken, Flächen und Volumina in dem dreidimensionalen Modell
- Importieren und Exportieren von Objekten in und aus dem Fabriklayout
- Neuordnen vorhandener und importierter Strukturen
- Löschen von Strukturen in dem Fabriklayout
- Extrahieren des Bodenbereiches für die Analyse und Planung von Wegen und Flächen
- Erstellung von verschiedenen Layern, die individuell ein- oder ausgeblendet werden können

#### **AP2: Konzeption**

##### ***AP2.1: Auslegung einer Steuerung für teilautonomen Drohnenflug***

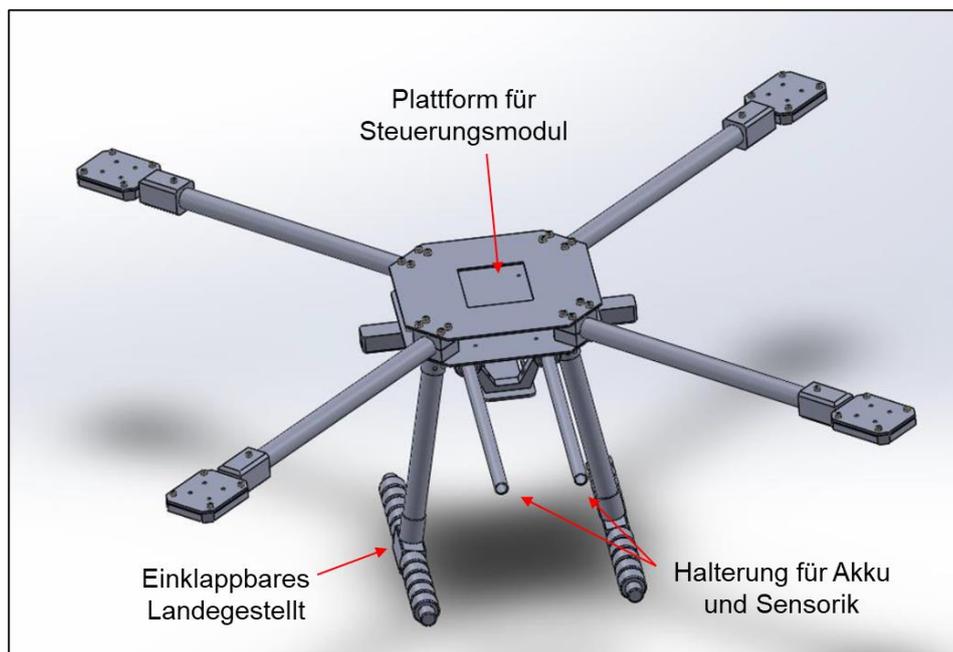
##### ***Durchgeführte Arbeiten***

Das AP 2.1 behandelt die Auslegung der Drohnensteuerung. Hierfür wurde eine Recherche über den Stand der Technik für die Hard- und Software im Bereich Drohnensteuerung durchgeführt. Aus dem AP 1 wurde die Anforderung des manuellen Fluges übernommen. Da ein teilautonomer Flug für die Versuche bei Projektpartnern nicht vorgesehen ist, wurde das Steuerkonzept in zwei Bereiche unterteilt. Der erste Bereich behandelt die Auswahl und Auslegung von Drohnenhardware für die Versuchsflüge. Der zweite Bereich behandelt die Entwicklung eines teilautonomen Steuerkonzepts, das in einer Simulation getestet und teilweise umgesetzt wurde.

### **Erzielte Ergebnisse**

Im Rahmen einer umfassenden Recherche zu Drohnen mit manueller Steuerung wurden verschiedene Komplett- und Teilsysteme verglichen und anhand der Anforderungen aus AP 1 analysiert. Das Ergebnis hat gezeigt, dass es sowohl aus technischer wie auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoller ist, ein eigenes modulares Drohnensystem zusammenzustellen. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass sowohl die Sensoren, als auch die Steuerung individuell auf die Problemstellung anpassbar ist. Weiterhin können Angebotsvergleiche für Einzelkomponenten durchgeführt und damit die preiswerteste Variante ausgewählt werden. Komplettsysteme stellen häufig geschlossene Systeme dar, die im Nachhinein nicht veränderbar sind.

In Verbindung mit den gegebenen Anforderungen aus AP 1 wurde das auf Bild 1 dargestellte Drohnengrobkonzept entwickelt und als CAD-Modell aufgebaut. Vorgesehen ist ein Quadrocopter, der in der Mitte über eine Plattform für Steuerungs- und Sensormodule verfügt. Darunter befindet sich ein Landegestell, das während des Fluges einklappbar ist. Über zwei Verlängerungsstäbe unterhalb der Plattform ist es möglich, mehrere Sensoren nebeneinander zu platzieren.



**Bild 1: CAD-Modell Drohnengrobkonzept**

Als Grundlage für das Steuerungskonzept wurde der Mikrocontroller 3D Robotics Pixhawk Mini gewählt. Dieser verfügt bereits über eine Steuerungssoftware und besitzt herstellerseitig verschiedene Steuerungsmöglichkeiten. Weiterhin zeichnet sich das Steuerungskonzept durch eine offene Softwarestruktur aus, was eine spätere Erweiterung der Steuerung ermöglicht. Die Flugbefehle werden mit einer Funkfernbedienung an die Drohne übermittelt.

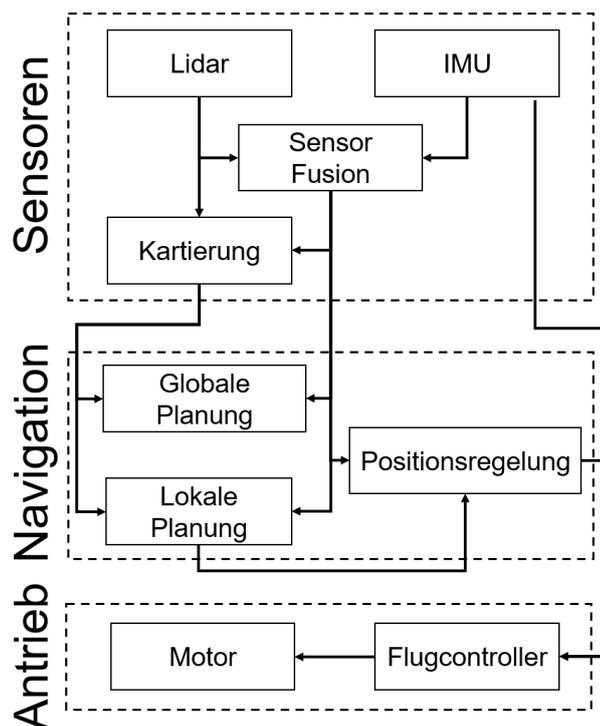
Der Drohnenaufbau besteht aus vier Rotoren, die um die Steuereinheit in der Mitte angeordnet sind. Die Motoren besitzen jeweils eine Leistung von ca. 1 kW und stellen eine Traglast von 2 kg sicher. Um die Flugzeit von 20 Minuten zu erreichen ist ein 12.000 mAh Akku vorgesehen. Ausgelegt wurden diese Komponenten mithilfe des Berechnungstools eCalc ausgelegt [Eca20]. Die Konfiguration erzielt im Rahmen der Anforderungen ein optimales Verhältnis zwischen Leistung und Gewicht.

Die Steuerung in der Mitte der Drohne wurde so angeordnet, dass sowohl über als auch unter der Steuereinheit Platz für Messsysteme vorhanden ist. Zur Unterstützung des Flugs ohne GPS-Signal wurde eine Positionshaltesensorik ausgewählt. Die Sensorik besteht aus einem Flow-Motion-Modul, das direkt mit dem Pixhawk-Flugkontroller verbunden ist. Die Sensorik ist speziell für Flüge innerhalb von Gebäuden ausgelegt und verfügt über eine nach unten gerichtete Kamera und einen Ultraschallsensor. Die Kamera erfasst den optischen Fluss des Bodens in Relation zur Drohne und kann basierend darauf erkennen, ob und in welche Richtung sich die Drohne bewegt. Der Ultraschallsensor misst die Entfernung der Drohne zum Boden und kann so die Höhengschwankungen erfassen. Die Sensorik kommuniziert direkt mit dem Flugcontroller der Drohne, wodurch dieser in der Lage ist, potenzielle Bewegungsschwankungen zu erkennen und auszugleichen.

Der zweite Bereich der Steuerung bildet den teilautonomen Drohnenflug ab. Die Anforderungen an einen teilautonomen Flug zum Layoutscan wurden mit dem projektbegleitenden Ausschuss erarbeitet. Die in AP 1 festgelegten Anforderungen sollen auch hier gelten und werden durch folgende Punkte ergänzt:

- Flugumgebung ist zu Beginn des Fluges unbekannt
- Drohne muss selbstständig eine Route für den Flug berechnen
- Die Berechnung muss onboard geschehen, es steht keine Kommunikationsmöglichkeit zu einem Remotecomputer oder Ähnlichem zur Verfügung
- Statische Flugumgebung
- Route muss kollisionsfrei geplant werden, Hindernisse müssen selbstständig erkannt werden

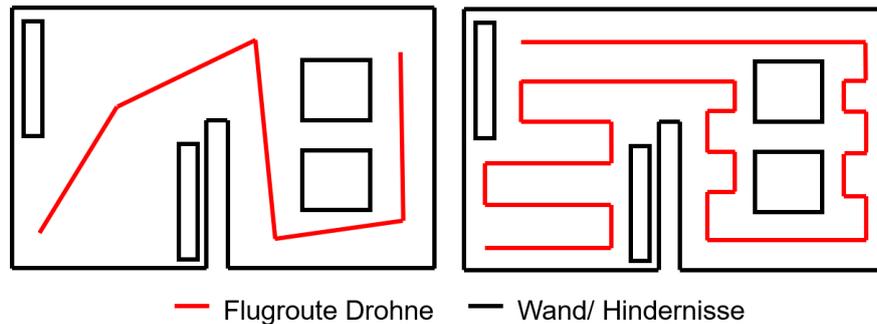
Das Grobkonzept für einen teilautonomen Flug sieht einen mehrstufigen Prozess vor, der auf Bild 2 dargestellt ist.



**Bild 2: Grobkonzept für die teilautonome Flugsteuerung**

Die Sensorik des teilautonomen Drohnenkonzepts besteht aus einem horizontal ausgerichteten 360° Light Detection and Ranging(Lida)-Laserscanner und einen Internal-Measurement-Unit (IMU). Der Lidar-Laserscanner erfasst über einen rotierenden Laser die Umgebung. Gleichzeitig erfasst die IMU Beschleunigungen in den drei Translations- und den drei Rotationsachsen. Die Sensorwerte werden in einem ersten Schritt über eine Sensor-Fusion zusammengeführt und daraus eine Kartierung der Umgebung erstellt. Die Kartierung gleicht kontinuierlich die aktuelle Position und die Umgebungserfassung der Drohne ab und ergänzt die Karte mit neuen Umgebungsinformationen. Innerhalb der sich kontinuierlich erweiternden Karte navigiert die Drohne selbstständig. Hierzu werden eine globale Routenplanung und eine lokale Routenplanung eingesetzt. Die globale Planung berechnet aus den vorhandenen Daten den nächsten Punkt, zu dem sich die Drohne bewegen soll. Die lokale Planung übernimmt die Navigation zwischen dem aktuellen Punkt und dem nächsten Punkt und berechnet eine kollisionsfreie Route zwischen den Punkten.

Das Ziel des teilautonomen Flugs ist es, eine detaillierte Umgebungskarte für die Fabriklayoutplanung zu erstellen. Um ein qualitativ gleichmäßiges und vollständiges Modell für die Fabrikplanung zu erstellen, ist ein gleichmäßiger und systematischer Scan der Fabrik erforderlich. Da die Umgebung zu Beginn des Drohnenfluges jedoch unbekannt ist, ist es schwierig eine systematische und auch effiziente Route für einen Layoutscan zu planen. Aus diesem Grund wird die globale Routenplanung aus Bild 2 in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste Phase ist für eine automatisierte Erkundung der unbekannteren Umgebung zuständig. Hierbei wird eine rudimentäre Karte der gesamten Umgebung aufgebaut. Nach Fertigstellung der rudimentären Karte folgt als zweite Phase eine systematische Routenplanung für einen gleichmäßigen und vollständigen Scan des Fabriklayouts. Auf Bild 3 ist die Vorgehensweise bei der globalen Routenplanung dargestellt.



**Bild 3: Vorgehensweise automatisierter Layoutscan mit Erkundung (links) und systematischer Scan des Layouts (rechts)**

Die systematische Routenplanung ist über einen Parametersatz einstellbar, der folgende Elemente enthält:

- Sicherheitsabstand zwischen Drohne und Umgebungsobjekten
- Maximale Drohnengeschwindigkeit
- Abstand zwischen den Flugbahnen
- Abstand zwischen Drohne und zu scannenden Objekten

Die Parameter können teilweise frei gewählt werden (bspw. Abstand zu den Wänden oder zum Boden) oder hängen von der verwendeten Hardware ab (FOV-Kamera). Die Parameter sind so gewählt, dass es möglich ist, durch eine Variation den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Scanergebnis zu bestimmen.

Die Informationen aus der Navigation werden über die Positionsregelung verarbeitet und an den Flugcontroller der Drohne weitergegeben. Dieser wandelt die Steuersignale in Spannungssignale für die Motoren um, wodurch die Drohne die geplante Bewegung ausführt.

### ***AP2.2: Auslegung eines Algorithmus zur Erzeugung eines 3D-Fabriklayouts Durchgeführte Arbeiten***

In AP 2.2 wurde eine Recherche über 3D-Messsysteme durchgeführt. Die Recherche beinhaltet die zur Verfügung stehende Software für die Auswertung von Bildinformationen und den Aufwand der Implementierung in ein Drohnensystem. Mit Berücksichtigung der Anforderungen aus AP 1 wurde ein Scansystem ausgewählt und ein Konzept für die Erstellung eines digitalen 3D-Fabriklayouts erstellt. Das Konzept bildet darüber hinaus weitere Verarbeitungsschritte ab, die für die weitere Betrachtung der Daten in AP 2.3 notwendig sind.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Die Recherche hat ergeben, dass sich die Messtechniken Photogrammetrie, Laserscan und 3D-Kameratechnik für den Layoutscan eignen. Vor allem im Bereich Photogrammetrie und Laserscan befinden sich bereits verschiedene Systeme in der Industrie oder Forschung im Einsatz. Der Fokus der Untersuchung liegt auf dem Einsatz der Photogrammetrie, da hiermit im Outdoorbereich bereits gute Ergebnisse erzielt wurden und es möglich ist, die Textur (Farbdaten) in der Punktwolke abzubilden. Für die Umsetzung soll an der Drohne eine Kamera verbaut werden. Über die Kamera werden Bilder von der Fabrikumgebung aufgenommen und diese mit einer Photogrammetriesoftware ausgewertet und zu einer Punktwolke zusammengefügt. Durch einen Vergleich verschiedener Photogrammetrie-Programme wurde die Software Agisoft Photoscan für die

Datenverarbeitung ausgewählt. Die Software besitzt eine umfassende Funktionalität und kann verschiedene Datentypen importieren und exportieren. Somit ist eine Weiterverarbeitung mit anderen Programmen möglich.

Für den teilautonomen Flug wird die Drohne durch einen Lidar-Laserscanner ergänzt. Der Lidar-Laserscanner nimmt während des Flugs Entfernungsdaten der Umgebung auf, aus denen eine Umgebungskarte berechnet werden kann. Als Lidar-Laserscanner wurde der Velodyne LiDAR PUCK ausgewählt. Dieser scannt die Umgebung in 16 Ebenen gleichzeitig und erzeugt 300.000 Messpunkte pro Sekunde. Das horizontale Blickfeld beträgt 30°, wobei zwischen jeder Ebene ein Winkelversatz von 2° liegt. Die Messreichweite beträgt 100 m mit einer angegebenen Genauigkeit von  $\pm 3$  cm. Der Laserscanner wird über einen Spannungswandler und einem Netzkabel mit einem mobilen Akku und einem OnBoard-Computer verbunden. Dadurch entsteht eine mobile und autonome Einheit, die sowohl auf der Drohne, wie auch manuell durch eine zu scannende Umgebung geführt werden kann. Der manuelle Einsatz kann potenziell in Zukunft in Bereichen eingesetzt werden, wo es nicht möglich ist mit der Drohne zu fliegen.

In Vorbereitung auf die Auswertung der Punktwolken Daten wurde die Photogrammetriesoftware Agisoft weiter untersucht. Über Agisoft ist es möglich verschiedene Punktwolkenformate zu exportieren. Für die spätere Verwendung in CAD-Programmen kann über Agisoft die Punktwolke vermascht werden. Das bedeutet, aus der Punktwolke entsteht ein zusammenhängendes Netz, das als Flächenmodell exportiert werden kann.

Für die Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Daten in AP 2.3 wurden ein Konzept erstellt, mit dem die Punktwolke orientiert und skaliert werden kann. Umgesetzt wurde das Konzept in Matlab und in Form einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI). Das Konzept enthält folgende Teilschritte:

1. Vorverarbeitung: Konvertieren der Daten aus Agisoft in Matlab
2. Orientieren und Skalieren: Ausrichten der Punktwolke zu einem Referenzkoordinatensystem und Skalieren durch Referenzmessungen
3. Segmentieren: Aufteilen der Gesamtpunktwolke in Teilpunktwolken. Jede Teilpunktwolke kann individuell bearbeitet oder verändert werden.
4. Objekt- und Flächenerkennung: Erkennung und Zuordnung von Objekten und Flächen in der Punktwolke
5. Planung: Planung des Fabriklayouts innerhalb der GUI durch Verschieben, Drehen, Löschen von Teilpunktwolken und Importieren von anderen Punktwolkenmodellen.

Das Ergebnis der Verarbeitung ist ein segmentiertes dreidimensionales Fabriklayout, in dem einzelne Objekte nach Vorgabe aus den Anforderungen aus AP 1 direkt ausgewählt und verändert werden können.

### ***AP2.3: Auslegung eines Algorithmus zur Erkennung von Fabrikobjekten*** ***Durchgeführte Arbeiten***

In AP 2.3 wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss Anforderungen und Ziele für den Auswertalgorithmus definiert. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Datenformat und wie die Informationen aus der Auswertung in andere Programme übergeben werden können. Für die Erkennung von Fabrikobjekten wurde das Konzept aus AP 2.2 erweitert.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Für die Erkennung von Fabrikobjekten wurde der vierte Schritt aus AP 2.2 erweitert. Die Ausgangslage für die Objekterkennung stellt eine segmentierte Punktwolke dar. Die Erkennung der Objekte soll automatisiert werden. Hierfür wird ein Neuronales Netz verwendet. Für die automatisierte Erkennung muss das neuronale Netz im Vorhinein mit Trainingsdaten angelernet werden. Hierfür sollen vorzugsweise dreidimensionale Punktwolken oder CAD-Daten verwendet werden. Recherchen hierzu haben ergeben, dass solche Datensätze nur vereinzelt frei verfügbar sind. Aus diesem Grund wird als Alternative zu diesem Ansatz ein Vergleich von zweidimensionalen Bildern vorgesehen. Welches Verfahren besser geeignet ist, wird in AP 3.3 geprüft. Für die zu erkennenden Objekt wurde sich mit dem Projektbegleitenden Ausschuss auf Paletten und Gabelstapler geeignet, da diese in nahezu jedem Fabriklayout vorkommen und es viele Referenzdatensätze gibt.

Für alle Objekt, die in dem Layout nicht automatisiert erkannt werden, soll eine Möglichkeit bestehen, Informationen direkt dem Objekt zu hinterlegen. Hierfür soll jedes Teilobjekt in der Punktwolke einen Referenzdatensatz erhalten, der eine Erweiterung oder Definition ermöglicht.

### **AP3: Umsetzung**

#### ***AP3.1: Umsetzung der Steuerung für teil-autonomen Drohnenflug***

##### ***Durchgeführte Arbeiten***

In AP 3.1 wurden das in AP 2.1 geplante Konzept ausgearbeitet und umgesetzt. Der erste Teil der Umsetzung umfasste das Beschaffen und der Zusammenbau der Drohne für den realen Betrieb. Die Drohne inklusive Sensorik wurde im Laborumfeld des IPH ausführlich getestet und im Hinblick auf Flugverhalten innerhalb geschlossener Gebäude und ohne Positionsstabilisierung durch GPS-Signal, Qualität der Kameraaufnahmen während des Fluges und Flugdauer untersucht.

Der zweite Teil von AP 3.1 befasste sich mit der Entwicklung einer Simulationsumgebung und der Umsetzung des teilautonomen Flugkonzepts aus AP 2.1. Als Grundlage für die Simulation wurden die Hardwarekomponenten aus AP 2.1 und AP 2.2 gewählt.

##### ***Erzielte Ergebnisse***

Das in AP 2.1 ausgelegten Drohnenkonzept wurde beschafft und zusammengebaut. In Bild 4 ist das fertiggestellte Drohnensystem dargestellt. Hiermit ist es möglich, manuell über eine Fernsteuerung die Drohne zu steuern. Um das Flugverhalten zu analysieren, wurden mehrere Tests innerhalb des IPH-Versuchsfelds durchgeführt. Zu sehen ist dies bspw. auf dem Videolink in [IPH18].



**Bild 4: Umsetzung Drohnenkonzept**

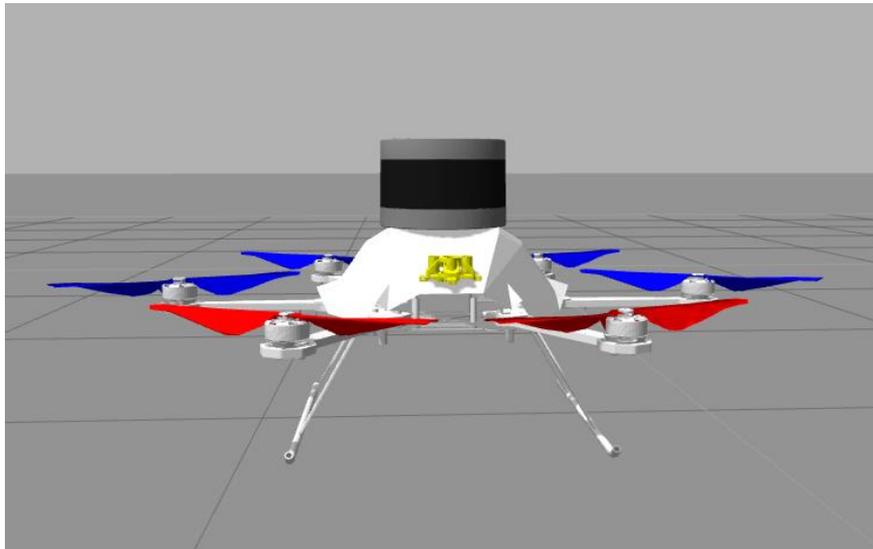
Das Flow-Motion-Modul für die Unterstützung beim Halten der Position wurde unterhalb der Drohne platziert, sodass jederzeit ein freies Sichtfeld zum Boden gegeben ist. In verschiedenen Tests wurde der Einsatz dieses Moduls für den Flug in Fabrikhallen getestet. Dabei hat sich herausgestellt, dass dieser Sensor nur bedingt für dieses Anwendungsfeld geeignet ist. Dies liegt zum einen daran, dass das Halten der Höhe mit diesem Sensor nur relativ und nicht absolut möglich ist. Dadurch wird beim Überfliegen von Hallenobjekten automatisch die Flughöhe erhöht, was nicht immer gewünscht ist. Ein weiterer Schwachpunkt des Flow-Motion-Moduls ist die verbaute Kameratechnik zur Bestimmung der horizontalen Verschiebung relativ zum Boden. Bei den Tests hat sich herausgestellt, dass die Helligkeit innerhalb des Gebäudes teilweise nicht ausreicht, damit das Kamerasystem ausreichend funktioniert. Weiterhin benötigt das System markante Punkte auf den Boden, an denen es sich orientieren kann. Die Versuche im Laborumfeld haben ergeben, dass das Flow-Motion-Modul für diesen Einsatzzweck nicht zuverlässig funktioniert. Ein Problem beim Einsatz ist die vergleichsweise niedrige Flughöhe der Drohne (im Vergleich zu Drohnen, die im Outdoorbereich fliegen), wodurch das Blickfeld des Moduls sehr begrenzt ist. Dadurch kann es beim Überfliegen von Freiflächen, die wenige markante Punkte aufweisen oder beim Überfliegen von Bereichen mit geringer Helligkeit zu Störungen des Systems kommen. Aus diesem Grund wurde das Flow-Motion-Modul für weitere Testflüge nicht genutzt.

Im Rahmen der Testflüge konnten mehrere manuelle Flüge mit der Drohne im Laborumfeld durchgeführt werden. Für die Flugdauer konnte im Durchschnitt ein Wert von 15 Minuten erreicht werden. Damit liegt die Flugzeit fünf Minuten unter dem geplanten Sollwert. Eine Flugdauer von 20 Minuten wäre theoretisch mit dem vorhandenen Drohnenaufbau erreichbar, wenn der Akku bis auf seine absolute Minimalspannung geflogen worden wäre. Dies wurde jedoch aus Sicherheitsgründen nicht umgesetzt, da Akkus bei sehr niedriger Spannung zu Leistungseinbrüchen neigen, wodurch sich das Flugverhalten der Drohne verschlechtert. Besonders für einen Flug innerhalb von Gebäuden mit begrenzten Ausweichmöglichkeiten ist ein gleichbleibendes Flugverhalten wichtig.

Die Aufnahmen des Hallenlayouts wurden mit einer GoPro Hero 5 durchgeführt. Der Vorteil dieser Kameras ist ein sehr großer Aufnahmewinkel bei kurzer Belichtungszeit, wodurch trotz schneller Bewegungen eine hohe Bildqualität erreicht werden kann. Um die Vibrationen der Drohne und

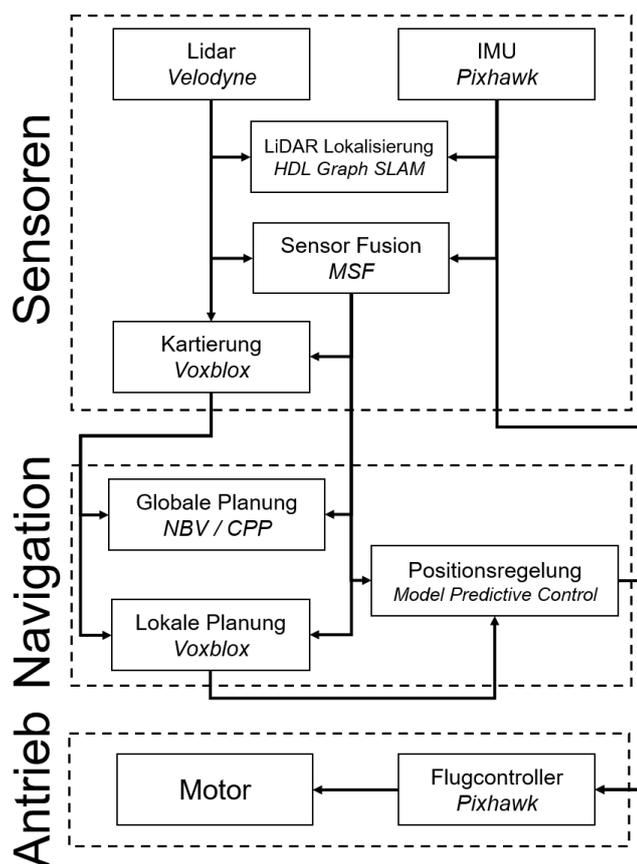
die Unregelmäßigkeiten im Flugverhalten zu kompensieren, wurde die GoPro mit einem aktiven Gimbal ausgestattet, das Vibrationen kompensiert und die Kamera während des Fluges in einer stabilen Lage hält. Im Rahmen der Testflüge wurden verschiedene Kameraeinstellungen wie Videoaufnahmen und Serienbilder genutzt.

Als Framework für die Simulation des teilautonomen Drohnensystems wird das Robot-Operation-System (ROS) verwendet. Innerhalb von ROS wird die Simulationssoftware RotorS verwendet. RotorS ist eine offene Software mit der Drohnenflüge unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und Sensorrauschen simuliert werden können. Das Drohnenmodell für die Simulation ist auf Bild 5 dargestellt. Als Vorlage für die Drohne wurde ein bereits in RotorS vorhandenes Modell gewählt. Das vorhandene Modell ist ein Hexacopter, der durch einen Lidar-Laserscanner ergänzt wurde. Der Lidar-Laserscanner entspricht dem in AP 2.2 ausgewählten Velodyne LiDAR PUCK.



**Bild 5: Drohnenmodell für Simulation des automatisierten Layoutscans**

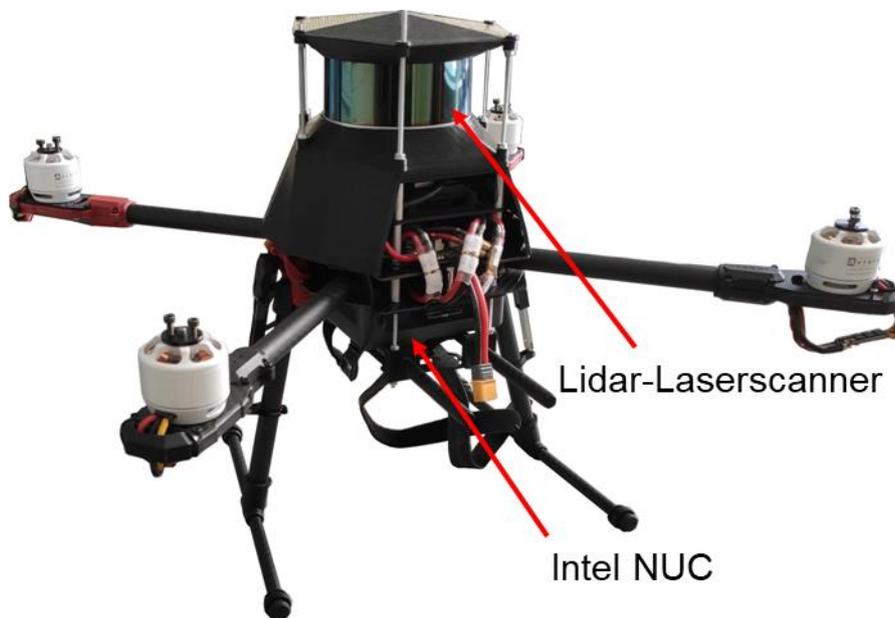
Die Umsetzung des teilautonomen Drohnenkonzepts setzt sich aus verschiedenen Algorithmen zusammen. Eine Übersicht hierzu ist in Bild 6 dargestellt, wobei das Konzept aus AP 2.2 aufgegriffen und durch Implementierungslösungen ergänzt wird.



**Bild 6: Umsetzung des teilautonomen Steuerungskonzepts**

Die Daten aus dem Lidar-Laserscanner und der IMU des Pixhawk-Controllers werden zuerst für eine Lokalisierung mittels HDL Graph SLAM verwendet. Dieser SLAM-Algorithmus basiert auf einem Graphen, dessen Knoten die Pose der Drohne sowie die gemessenen Umgebungsmerkmale zu verschiedenen Zeitpunkten darstellt. Über den kontinuierlichen Abgleich zwischen Pose und Umgebungsmerkmalen wird die aktuelle Position der Drohne berechnet und eine Kartierung der Umgebung erstellt. Parallel wird in einer Multi-Sensor-Fusion (MSF) die Lage der Drohne berechnet und abgeschätzt. Dieser Algorithmus kann hochfrequente Signale, bspw. aus der IMU, verarbeiten und daraus eine Korrektur für die Berechnung der Lage abschätzen. Die Kombination aus Entfernungsmessung mittels IMU und Abschätzung der aktuellen Lage wird über die Software Voxelox zu einer Umgebungskarte zusammengeführt. Innerhalb dieser Karte wird zuerst mittels globaler Planung die nächsten Flugpunkte berechnet und anschließend über die lokale Planung der Weg zwischen den Flugpunkten berechnet und an die Positionsregelung weitergegeben. Zu Beginn des Fluges wird die Globale Planung von dem Next-Best-View-Planner (NBV) bestimmt. Dieser berechnet eine möglichst effiziente Route, um eine unbekannte Umgebung zu erkunden. Anschließend wird der Complete-Path-Planner (CPP) zur Berechnung einer systematischen Route für den Layoutscan eingesetzt. Alle Flugbefehle werden über das Model-Predictive-Control-System (MPC) erfasst und als Steuerbefehle an die Flugcontroller weitergegeben. Das MPC regelt das Flugverhalten und nutzt als Grundlage ein Modell, das das dynamische Verhalten des Drohnensystems abbildet und basierend darauf Aussagen über die zukünftige Dynamik des Multicopters trifft und optimale Steuerbefehle für die Drohne berechnet. Die Flugbefehle für die Drohne werden über den Flugcontroller der Firma Pixhawk in Steuerbefehle für die Motorcontroller übersetzt und die geplante Bewegung durchgeführt.

Im Rahmen erster experimenteller Versuche wurde das teilautonomen Flugkonzept inklusive Lidar-Laserscanner und Verarbeitungscomputer auf dem bisherigen Drohnenmodell modular ergänzt. Auf Bild 7 ist der Zusammenbau dargestellt. Dieses Modell ist nur eingeschränkt flugfähig, da durch die zusätzlichen Massen eine erhebliche Anpassung der Steuerregelungsparameter notwendig ist, um einen sicheren Flug gewährleisten zu können. Die Steuerungsfunktionalität aus Bild 6 ist jedoch vollständig auf dem System implementiert und funktionsfähig.



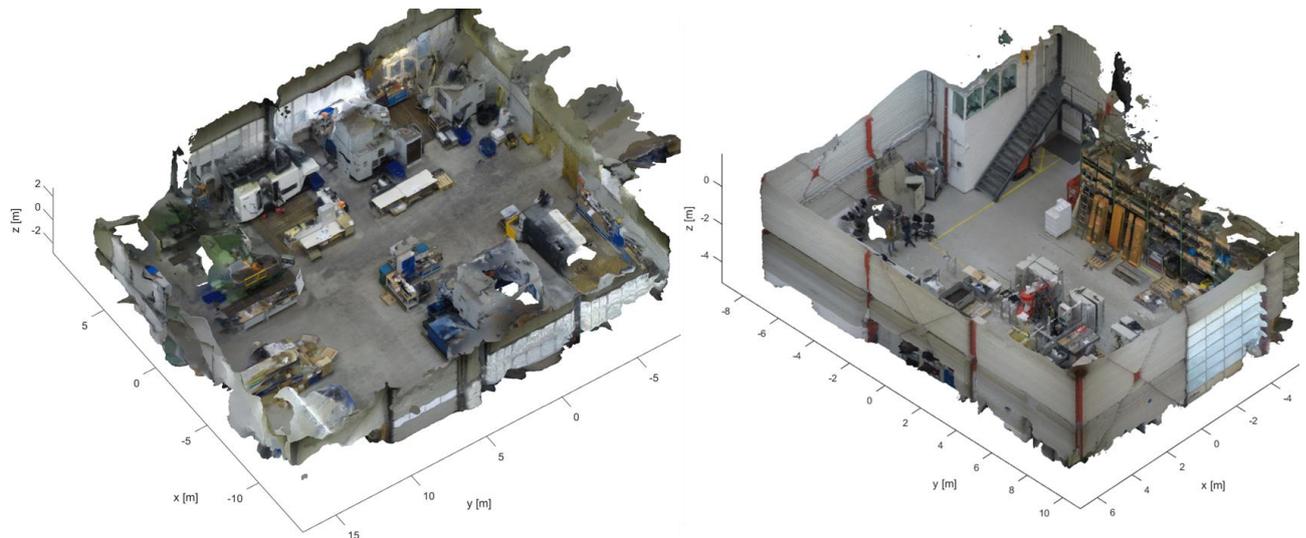
**Bild 7: Teilautonomes Drohnensystem**

### ***AP3.2: Umsetzung des Algorithmus zur Erzeugung eines 3D-Fabrikabbildes Durchgeführte Arbeiten***

In AP 3.2 wurde das Konzept aus AP 2.2 umgesetzt und ausgearbeitet. Für die Verarbeitung der Daten wurde eine Photogrammetriesoftware beschafft. Im Rahmen von ersten Tests wurden Datensätze für die Umsetzung des Datenverarbeitungskonzepts erstellt. Das Datenverarbeitungskonzept wurde in der Programmierumgebung Matlab umgesetzt. Die Umsetzung und Zwischenergebnisse wurden mit dem Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert und die Funktionalität angepasst. Die Umsetzung des Punktwolkenverarbeitungskonzept wurde in fünf Bereiche unterteilt.

### ***Erzielte Ergebnisse***

In Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden erste Kameraaufnahmen mit der Drohne in einer realen Industrieumgebung und im IPH durchgeführt. Die aufgezeichneten Bilddaten wurden anschließend in die Photogrammetriesoftware übertragen. Das Ergebnis sind digitale Modelle der Fabriklayouts, wie bspw. auf Bild 8 dargestellt.



**Bild 8: Digitales Fabriklayout, Industrieunternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss links, Versuchsfeld IPH rechts**

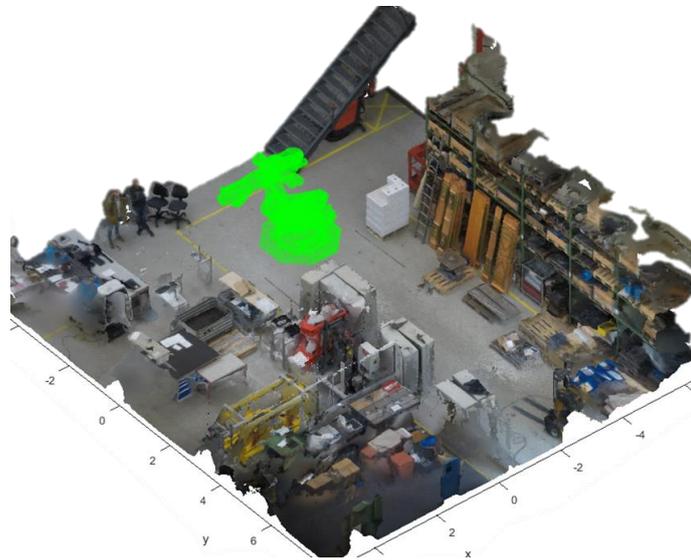
Anhand der Ergebnisse kann erkannt werden, dass die Genauigkeit der Vermessung nicht gleichmäßig ist. Bereiche, die nicht gut überflogen werden konnten, wurden gar nicht oder nur verzerrt dargestellt. Anhand der ersten Versuche wurde weiterhin erkannt, dass ein Flug innerhalb eines Fabrikgebäudes nicht immer möglich ist. Die Flugmöglichkeiten hängen stark von den Gegebenheiten ab. Für einen sicheren Flug sollte die Drohne 2 m freien Raum in jede Raumrichtung besitzen. Außerdem führen Bereiche mit erhöhter Luftbewegung, wie bspw. Lüftungen oder Gebläse, zu einem unruhigen Drohnenflug. Die aufgenommenen Daten müssen im Anschluss an den Flug manuell analysiert und aussortiert werden, da die Ergebnisqualität aus der Photogrammetrie stark von der Bilddatenqualität abhängt. Unschärfe oder verwackelte Bilder können zu Berechnungsfehlern führen, wodurch Teilbereiche in dem digitalen Fabriklayoutmodell nicht oder falsch berechnet werden.

Die Berechnungsdauer der Punktwolke hängt von der Anzahl der verwendeten Bilder und der zur Verfügung stehenden Hardware ab. Berechnungen mit der Software Agisoft und ca. 1.500 Bildern benötigen ca. 14 Tage Berechnungszeit. Die Kernelemente der Hardware bestehen aus einer Intel i7-7820X CPU, einer NVIDIA GTX 1080 Grafikkarte und 128 GB DDR 4 Arbeitsspeicher.

Die Verarbeitung der Punktwolke geschieht nach dem Konzept aus AP 2.2. Zuerst wird die Punktwolke eingeladen und orientiert. Als Referenzen für die Orientierung werden der Boden und die Außenwände des Modells genutzt. Für die Orientierung des Bodens wird ein Histogramm über alle Höhenwerte der Punktwolke gebildet. Das Histogramm stellt die Anzahl der Punkte dar, die auf den verschiedenen Höhenwerten zu finden sind. Unter der Annahme, dass der Boden die größte waagerechte Fläche in dem Modell ist und damit die größte Anzahl an gleichen Höhenwerten zum Boden gehören, können daraus die zum Boden gehörenden Punkte im Histogramm bestimmt werden. Alle Punkte, die im Maximum des Histogramms liegen gehören zum Boden des Modells. Durch alle Bodenpunkte wird eine Fläche gelegt, die die Bodenebene des orientierten Modells darstellt. Die Ausrichtung der Außenwände geschieht analog zu der Bodenausrichtung über ein Histogramm. Hierbei werden alle Punkte die vertikal übereinander liegen genutzt.

Die Segmentierung unterteilt die Gesamtpunktwolke in Teilpunktwolken. Jede Teilpunktwolke soll ein Teilelement des Fabriklayouts darstellen, wie z. B. den Boden, eine Maschine oder ein Regal. Für die Segmentierung wird in einem ersten Schritt der Boden und die Außenwände von dem

Modell getrennt. Die Restpunktswolke wird mithilfe eines Region-Growing-Algorithmus segmentiert. Der Algorithmus untersucht die Gesamtpunktswolke nach zusammenhängenden Punktegruppen. Ob eine Punktegruppe zusammenhängt, hängt von dem räumlichen Abstand zueinander ab. Ab einem vordefinierten Abstand werden weitere Punkte als nicht zu der Gruppe gehörend definiert und zu einer neuen Gruppe zugeordnet. Das Resultat der Untersuchung ergibt eine Segmentierung aller Objekte, die nicht über Punkte miteinander verbunden sind. Für eine weitere Detaillierung der Segmentierung kann manuell die Segmentierung erweitert werden. Das Ergebnis dieses Verarbeitungsschritts sind Teilpunktswolken, die individuell abgespeichert werden, jedoch zueinander orientiert sind. Damit ist es möglich in dem Fabriklayout jedes Einzelobjekt auszuwählen und zu verändern. Weiterhin können jedem Objekt Metadaten hinterlegt werden, die Eigenschaften wie Typ, Kostenstelle oder Leistungsdaten enthalten können. Um neue Objekte in das Layout zu laden, gibt es die Möglichkeit CAD-Dateien zu importieren (siehe Bild 9). Diese werden in der Einzelteilliste der Fabrikelemente ergänzt und können analog zu den Teilpunktswolken bewegt werden. Die Veränderung des Layouts kann gespeichert und auch wieder geladen werden. Somit ist es möglich verschiedene Layoutvarianten zu erzeugen und zu vergleichen.



**Bild 9: Import von CAD-Modell in Punktswolke**

### ***AP3.3: Umsetzung des Algorithmus zur Erkennung von Fabrikobjekten Durchgeführte Arbeiten***

In AP 3.3 wurde das Konzept aus AP 2.3 umgesetzt und in das Datenverarbeitungskonzept von AP 3.2 integriert. Analog zu AP 3.2 wird die Umsetzung in der Programmierumgebung Matlab realisiert. Die zu untersuchenden Objekte wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss definiert. Die erreichten Ergebnisse wurden mit dem Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert und Verbesserungspotenziale aufgezeigt.

### ***Erzielte Ergebnisse***

Die Erkennung von Objekten in der Punktswolke schließt sich direkt an die Objektsegmentierung aus AP 3.2 an. Für eine automatisierte Erkennung mittels Neuronaler Netze ist es notwendig im Vorhinein Objekte zu definieren, die der Algorithmus zuordnen soll. Aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Objekten in Fabriklayouts wurde sich mit dem Projektbegleitenden Ausschuss auf

das Objekt Palette und das Objekt Gabelstapler geeignet. Für die Umsetzung des Neuronalen Netzes wurden fertige Bausteine aus Matlab verwendet und auf die Problemstellung adaptiert.

Der erste Schritt für die automatisierte Erkennung ist das Anlernen des Neuronalen Netzes. Das in AP 2.3 geplante Ziel als Referenz 3D-Datensätze zu nutzen, war dabei nicht möglich. Es konnten nur wenige dreidimensionale Modelle in frei zugänglichen Datenbanken gefunden werden. Aus diesem Grund wurden als Referenzdatensätze 2D-Bilder gewählt. Um das 3D-Objekt aus dem Fabriklayout mit den 2D-Bildern vergleichen zu können, wurden alle Objekte aus dem Fabriklayout aus verschiedenen Blickwinkeln in 2D-Ansichten gespeichert. Ein Beispiel hierzu ist auf Bild 10 dargestellt. Die 2D-Ansichten von den Fabrikobjekten wurden in das angelehrte neuronale Netz übertragen und dort hinsichtlich Wiedererkennungsmerkmale untersucht. Bei einer Übereinstimmung mit einem im Vorhinein definierten Objekt wird das Objekt in dem Fabriklayout vermerkt und in einer Datenbank das Objekt benannt. Der Algorithmus durchsucht automatisch alle Objekte im Fabriklayout.

Aufgrund der schwankenden Datenqualität oder Problematiken bei der Erzeugung der 2D-Ansichten (bei eng beieinanderstehenden Objekten) kann es zu einer fehlerhaften Erkennung kommen. Für diese Problematik wurde ein manuelles Auswahlfeld erstellt, in dem im Nachhinein eine Anpassung der Objekterkennung durchgeführt werden kann.



**Bild 10: Automatisierte Objekterkennung auf Basis von 2D-Perspektiven des 3D-Objekts**

## **AP4: Validierung**

### ***AP 4.1: Laborversuche***

#### ***Durchgeführte Arbeiten***

In AP 4.1 wurden Laborversuche durchgeführt und die Ergebnisse aus den AP 3.2 und 3.3 validiert. Dies betrifft die Genauigkeit der mittels Photogrammetrie berechneten Punktwolke, die automatisierte Verarbeitung der Punktwolke und das automatisierte Erkennen von Objekten. Für die Untersuchung der Genauigkeit wurden Referenzmessungen in der realen Halle durchgeführt und

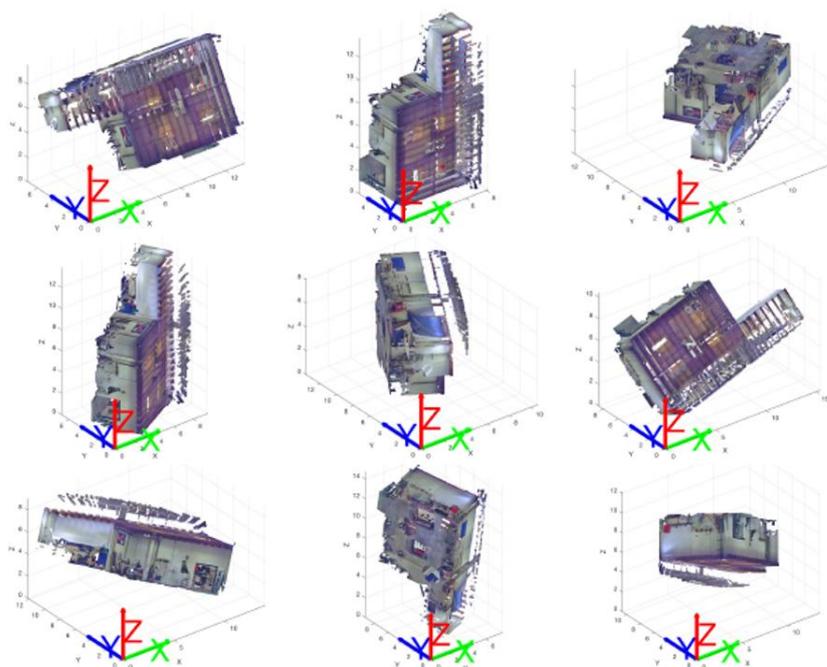
mit dem Modell verglichen. Die automatisierte Objekterkennung wurde am Beispiel der in AP 3.3 definierten Objekten durchgeführt.

Das Konzept des teilautomatisierten Drohnenflugs wurde im Rahmen einer Simulation und im Rahmen von experimentellen Versuchen im Laborumfeld getestet.

## **Erzielte Ergebnisse**

### ***Validierung Modell ausrichten***

Um die grundsätzliche Funktionalität der automatisierten Datenverarbeitung zu testen, wurde für die Untersuchung ein Referenzmodell genutzt. Das Referenzmodell wurde mittels terrestrischem Laser aufgenommen und stellt eine ideale dreidimensionale Abbildung einer Fabrikhalle dar. Zuerst wird das automatisierte Ausrichten des Modells getestet. Hierfür wird das Referenzmodell zufällig in neun verschiedenen Ausrichtungen in das Datenverarbeitungsprogramm geladen (siehe Bild 11). Das Ergebnis ist auf Bild 12 dargestellt für jede Ausrichtung zufriedenstellend. Bei jeder Ausrichtung wird der Boden des Modells korrekt erkannt und dementsprechend das Modell rotiert. Auch die Außenwände werden korrekt parallel zu den Ebenen des Referenzkoordinatensystems ausgerichtet. Der Ursprung des Referenzkoordinatensystems wird für jede Variante in eine Ecke des Modells gelegt. Welche Ecke hier gewählt wird, kann sich je nach Vorausrichtung ändern. Das bedeutet, um für jedes Grundmodell die gleiche Ausrichtung zu erhalten, ist es teilweise erforderlich das Modell um die vertikale Achse zu drehen.

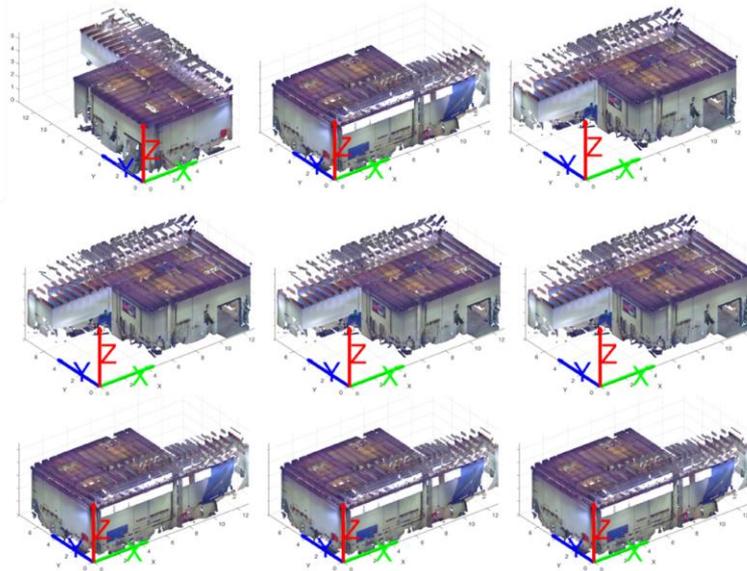


**Bild 11: Neun zufällige Ausrichtungen des Referenzmodells**

### ***Validierung Objektsegmentierung***

Im nächsten Schritt wurde das automatisierte Segmentieren der Halle in Einzelobjekte getestet. Hierfür wurde zuerst händisch die Punktwolke untersucht und die Einzelobjekte definiert. Anschließend wurde der Segmentierungsalgorithmus ausgeführt und die Ergebnisse verglichen. Durch die manuelle Segmentierung wurden in der Halle 23 Einzelobjekte definiert. Die automatische Segmentierung konnte 21 dieser Einzelobjekte richtig segmentieren. Die fehlenden Objekte

wurden als ein Objekt erkannt. Der Grund dafür war der zu geringe Abstand zwischen den Objekten.



**Bild 12: Ergebnis der automatischen Ausrichtung**

Durch die Tests konnte festgestellt werden, dass die automatisierte Datenverarbeitung funktioniert und in Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Je nach Ausgangslage ist jedoch noch ein geringer Grad an manueller Nacharbeit notwendig, wenn z. B. verschiedene Objekte zu nahe beieinander stehen. Aus der Diskussion mit dem Projektbegleitenden Ausschuss hat sich ergeben, dass die Segmentierung von Objekten in einem Fabriklayout teilweise subjektiv sein kann. Wenn z. B. nicht nach physischem Abstand, sondern nach Kostenstellen die Objekte unterteilt werden sollen. Für die Auswertung in diesem Projekt ist die Trennung von Objekten nach dem physischen Abstand ausreichend.

### ***Validierung Objekterkennung***

Zur Validierung der automatisierten Objekterkennung wurde eine Versuchsmessung des IPH-Versuchsfelds durchgeführt. Die zu betrachtenden Objekte bestanden aus den in AP 3.3 definierten Klassen Paletten und Gabelstapler. Für jede Klasse wurde jeweils ein Datensatz aus 600 zweidimensionalen Testbildern erzeugt, um das Neuronale Netz anzulernen. Anschließend wurde von den segmentierten Objekten in dem aufgenommenen Fabriklayout zweidimensionale Bilder erzeugt und mit dem Neuronalen Netz analysiert. Das Ergebnis hat folgende Erkennungsraten ergeben:

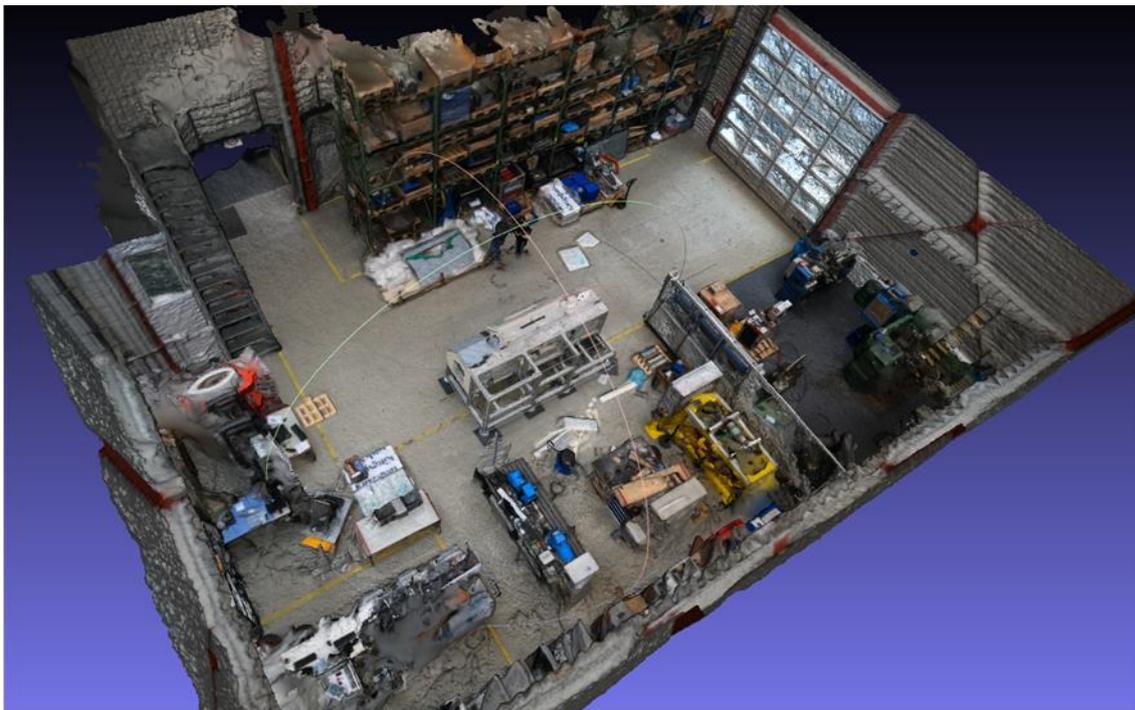
- 70 % bei Paletten
- 78 % bei Gabelstaplern

Das bedeutet, dass 70 % aller Paletten, die als Objekte in dem Fabriklayout vorhanden waren, als Paletten erkannt wurden. Alle anderen Paletten wurden entweder gar nicht erkannt oder falsch zugeordnet. Für eine automatisierte und zuverlässige Objekterkennung sind diese Werte allerdings nicht ausreichend. Es wäre bei jeder automatisierten Objekterkennung eine Überprüfung aller erkannten Objekte notwendig. Ein Grund für den niedrigen Erkennungsgrad ist bspw. das auf Paletten meist weitere Objekte stehen, die eine Erkennung erschweren.

Die Auswertung zeigt, dass eine automatisierte Erkennung von Objekten grundsätzlich möglich ist und bei ca. 2/3 der Objekte erfolgreich funktioniert. Für eine Verbesserung der Erkennung wäre es möglich die Anzahl der Testbilder zu erhöhen, die Qualität der aufgenommenen Punktwolke zu erhöhen oder für den Fabriklayoutscan alle nicht relevanten Objekte aus der Halle zu entfernen.

### ***Validierung Gesamtsystem***

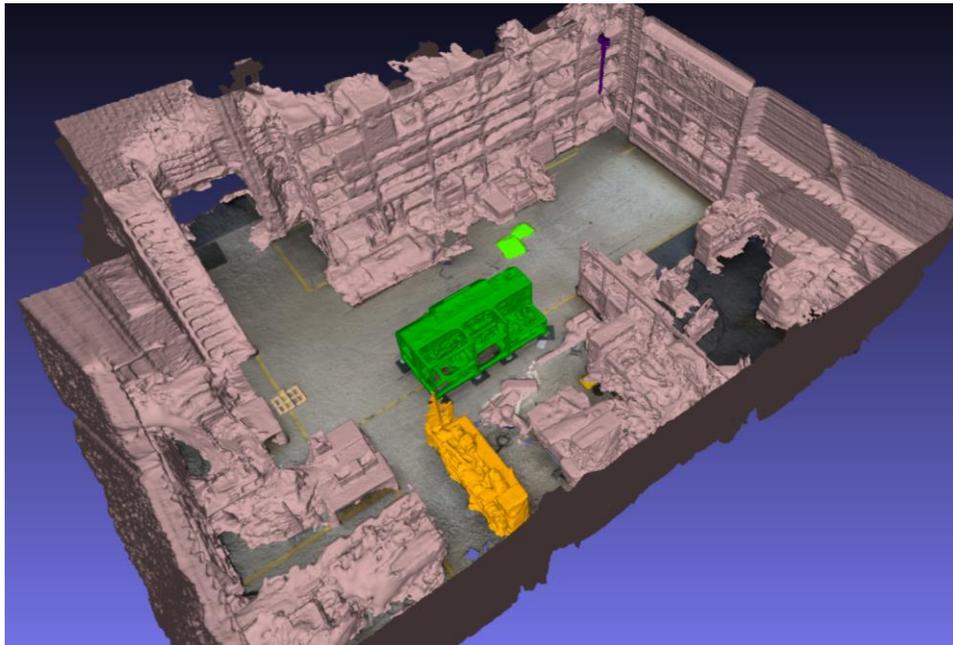
Für die Validierung des Gesamtsystems wurde ein manueller Drohnenflug im Versuchsfeld des IPH durchgeführt. Das Ergebnis des Flugs und der photogrammetrischen Berechnung ist auf Bild 13 dargestellt. Zu sehen ist das Versuchsfeld des IPH als dreidimensionale Punktwolke. Die Flugdauer für den Laborversuch lag bei ca. 10 Minuten. Da die Aufnahme von der Drohne aus nach unten und zur Seite geschehen ist, wird der Deckenbereich der Halle nicht abgebildet. Das Ergebnis zeigt vor allem im mittleren Bereich der Halle eine sehr detaillierte Darstellung der realen Halle. An den Randbereichen und am oberen Ende der Halle ist zu erkennen, dass die Punktwolkenqualität schlechter wird. Hier verschmelzen Objekte teilweise mit der Wand oder werden nur anteilig dargestellt. Der Grund hierfür kann der große Abstand zu diesen Aufnahmepunkten sein. Um die Drohne und die Objekte in der Halle nicht zu gefährden, wurde beim Flug ein Sicherheitsabstand von 2 m zu allen Hindernissen gehalten. Somit konnten Objekte teilweise nicht richtig von der Kamera erfasst werden, was zu einer fehlerhaften Berechnung führt. Weiterhin neigen Flächen mit großem Helligkeitsunterschied zu fehlerhaften Darstellungen. Zu sehen ist dies auf der rechten Seite von Bild 13 an dem Tor. Hier schien bei der Aufnahme die Sonne von außen herein. Im Ergebnis sind die Segmente im Tor sehr uneben abgebildet.



**Bild 13: Punktwolke Layoutscan IPH-Versuchsfeld**

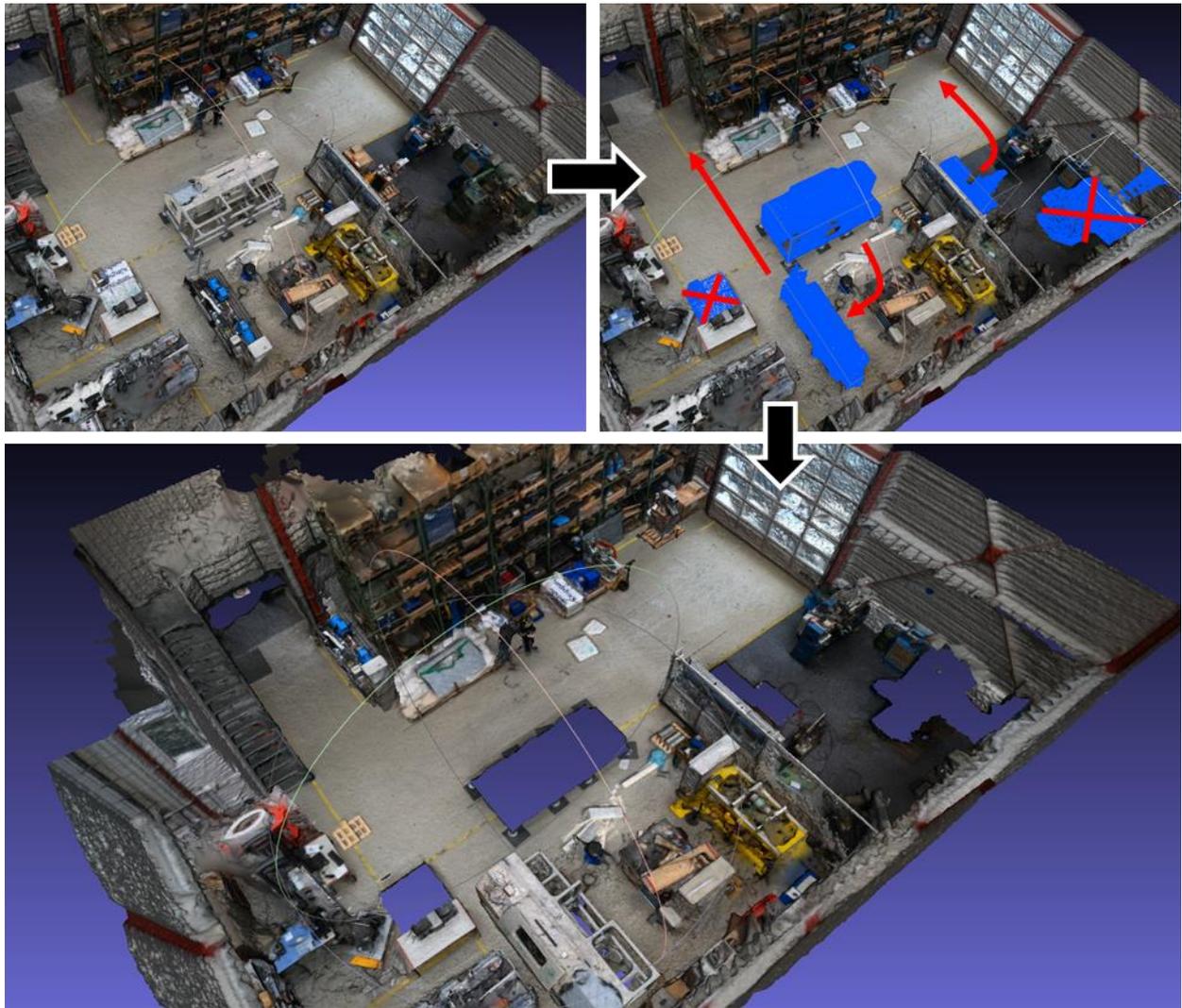
Das Ergebnis der automatisierten Datenverarbeitung ist auf Bild 14 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Segmentierung nur teilweise funktioniert hat. Dies liegt daran, dass viele Objekte direkt an einer Außenwand oder sehr nah daran stehen. Dadurch ist es nicht möglich, qualitativ

hochwertige Aufnahmen zwischen Objekt und Wand zu erzeugen, wodurch der Photogrammetriealgorithmus die Objekte miteinander verschmilzt.



**Bild 14: Segmentierung Punktwolke IPH-Versuchsfeld**

Für eine Planung des Fabriklayouts wurde die Segmentierung manuell erweitert. Um die Funktionsweise der Fabrikplanung in dem Modell zu testen, wurden fünf Objekte (siehe Bild 15 blaue Markierungen, oben rechts) ausgewählt, die in dem Layout verändert werden sollen (rote Pfeile). Über Rotations- und Translationsbefehle konnte die Position der Objekte auf dem Boden verändert werden. Weiterhin konnte ausgewählt werden, ob ein Objekt aus dem Modell entfernt oder kopiert werden soll. Das Ergebnis der Veränderung ist auf Bild 15 (unten) dargestellt. Durch die Veränderung des Layouts konnte in kurzer Zeit getestet werden, wie sich ein Verschieben von Objekten auf das Gesamtlayout auswirkt und ob die neue Position für die Objekte geeignet sind. Die Ergebnisse besitzen für die Planung eine hohe Belastbarkeit, da alle Objekte umfassend abgebildet sind.



**Bild 15: Veränderung Fabriklayout, Ursprungslayout oben links, ausgewählte und veränderte Objekte oben rechts, Resultat der Veränderungen unten**

Für die Validierung der Messgenauigkeit wurden insgesamt 28 händische Referenzmessungen durchgeführt und mit den Entfernungsdaten im berechneten Modell verglichen. Für die Validierung wurden nur Bereiche in der Punktwolke gewählt, die gut erkennbar sind. Ein Beispiel hierfür ist auf Bild 16 dargestellt, wo die Breiten des Hochregals im Modell gemessen wurden. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 1 dargestellt.



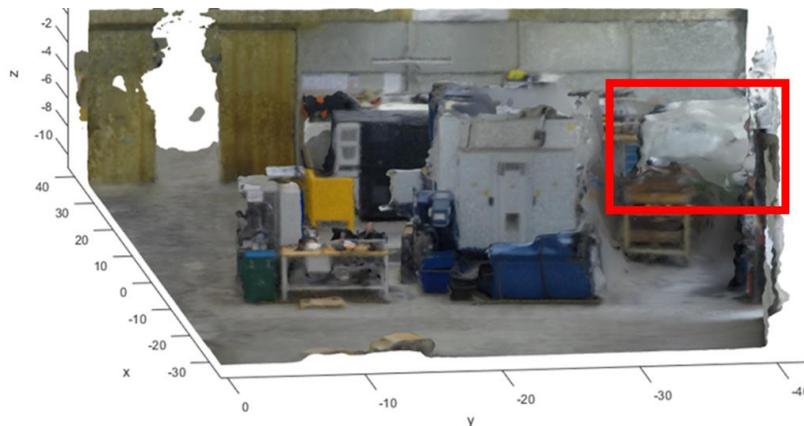
Bild 16: Auszug Referenzmessung für Validierung der Genauigkeit

Tabelle 1: Referenzmessungen Genauigkeit Punktwolkenmodell

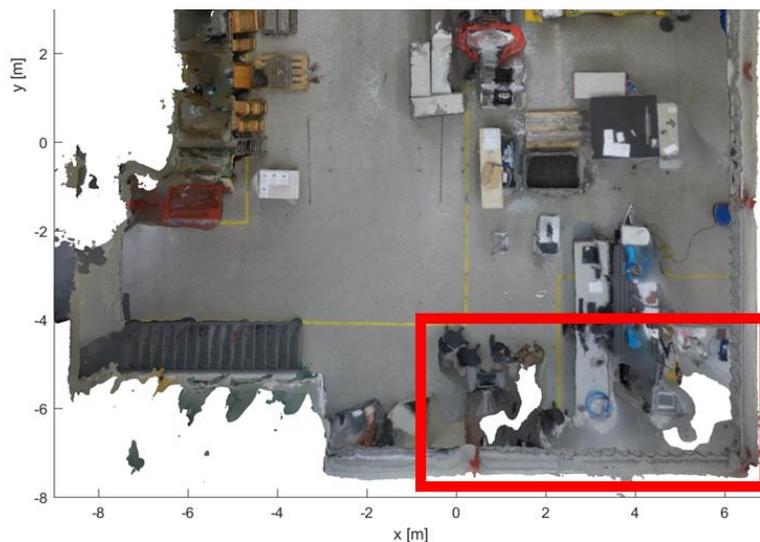
Objekt	Soll [m]	IST [m]	Abweichung [m]
Bodenmarkierungen	3,000	2,99314	0,00686
	2,000	2,01058	-0,01058
	2,000	2,00959	-0,00959
	2,000	2,00016	-0,00016
Regalbreiten 1	1,799	1,81167	-0,01267
	1,799	1,78571	0,01329
	1,799	1,77923	0,01977
	1,799	1,79802	0,00098
Regalbreiten 2	1,799	1,75301	0,04599
	1,799	1,77634	0,02266
	1,799	1,80853	-0,00953
	1,799	1,76358	0,03542
Regalhöhen	0,719	0,716236	0,00276
	0,719	0,702903	0,01610
	0,719	0,700687	0,01831
Bodenmatte	1,783	1,76155	0,02145
	1,133	1,08807	0,04493
Tisch	1,546	1,53178	0,01422
	1,149	1,12611	0,02289
Prüfstand	1,395	1,38204	0,01296
	3,746	3,72057	0,02543
	3,746	3,72747	0,01853
	3,746	3,72896	0,01704

	1,700	1,70971	-0,00971
	1,700	1,70658	-0,00658
	1,700	1,71231	-0,01231
	1,700	1,6771	0,02290

Die Abweichungen zwischen Modell und Realität liegen zwischen 0,7 cm und 4,6 cm. In Diskussionen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde diese Genauigkeit als ausreichend für die Planung eines Fabriklayouts angesehen. Jedoch ist zu beachten, dass es in der Punktwolke Bereiche geben kann, die fehlerhaft oder gar nicht berechnet worden sind. Eine fehlerhafte Berechnung zeigt sich bspw. in Form von starken Wölbungen in der Punktwolke, wie auf Bild 17 dargestellt. Für diese Bereiche muss eine gesonderte Betrachtung durchgeführt oder ggf. ein erneuter Layoutscan durchgeführt werden. Weiterhin kann es zu Löchern in dem Modell kommen (siehe Bild 18). Auch hier sind keine Rückschlüsse auf das Originallayout möglich, sodass bei Bedarf eine manuelle Überprüfung notwendig ist.



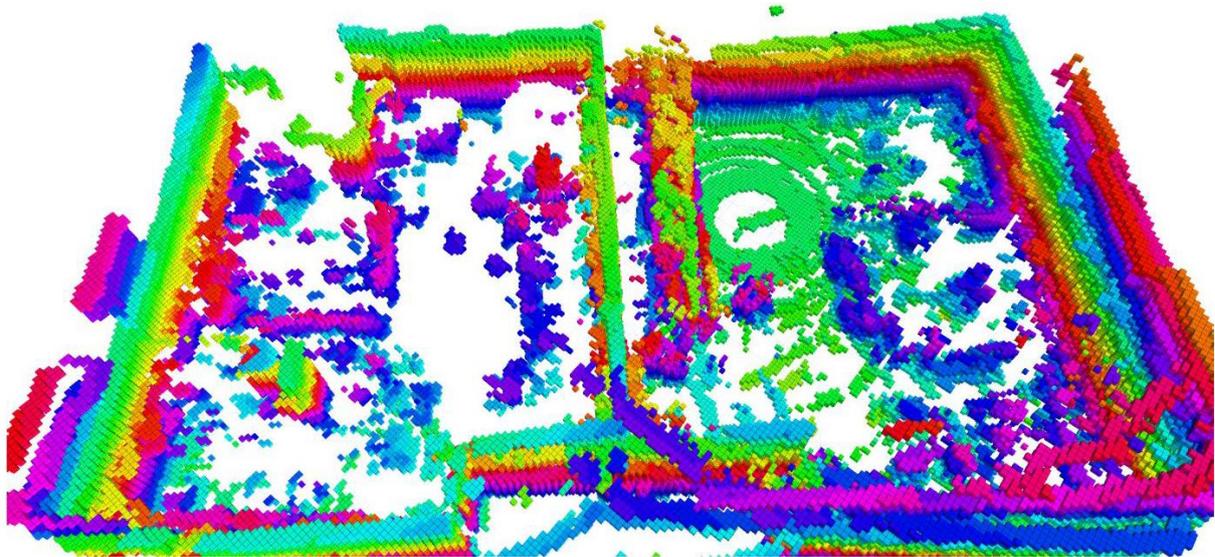
**Bild 17: Fehlerhafte Punktwolkenberechnung in Form einer Auswölbung**



**Bild 18: Löcher in Punktwolkenmodell**

### ***Validierung teilautomatisiertes Flugkonzept***

Die Umsetzung des teilautonomen Drohnenfluges konnte in ersten Versuchen getestet werden. Für den Versuch wurde die Drohne auf einem fahrbaren Tisch platziert und durch die Halle gefahren. Über eine direkte WLAN-Verbindung zu einem Remotecomputer konnte während des Versuchs der Berechnungsfortschritt der teilautonomen Steuerung betrachtet und darauf reagiert werden. Die Steuerung hat selbstständig die Umgebung der Drohne erkannt und eine Route für den theoretischen Flug berechnet. Die Informationen wurden am Remotecomputer ausgelesen und die Bewegungsbefehle durch manuelles Verschieben des Tisches ausgeführt. Für den Versuch wurde die Flughöhe exakt auf die Höhe der Drohne auf dem Tisch begrenzt. Die Steuerung war in der Lage selbstständig eine Route zur Erkundung der IPH-Testhalle zu erstellen und neu erkundete Bereiche in die Planung zu integrieren. Das Ergebnis der Erkundung ist auf Bild 19 dargestellt.



**Bild 19: Scanresultat der teilautonomen Drohnensteuerung**

Auf dem Ergebnis sind Hindernisse und Wände gut zu erkennen. Jedoch konnte der Boden an vielen Stellen nicht oder nur teilweise abgebildet werden. Zu begründen ist dies mit der Tischfläche unterhalb der Drohne, die die Laserstrahlen teilweise blockiert hat. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Auflösung der erstellten Karte noch vergleichsweise grob und für eine Interpretation durch den Menschen teilweise nicht ausreichend ist. Da das Verarbeitungssystem auf der Drohne nur über begrenzte Leistung verfügt, wurden für die ersten Versuche die Auflösung möglichst grob gewählt, um möglichst schnelle Berechnungszeiten zu erreichen. In Zukunft sind weitere Versuche angestrebt, die ein optimales Verhältnis zwischen Auflösung und notwendiger Berechnungsleistung ermitteln sollen.

### ***AP4.2: Versuche bei Anwendungspartnern***

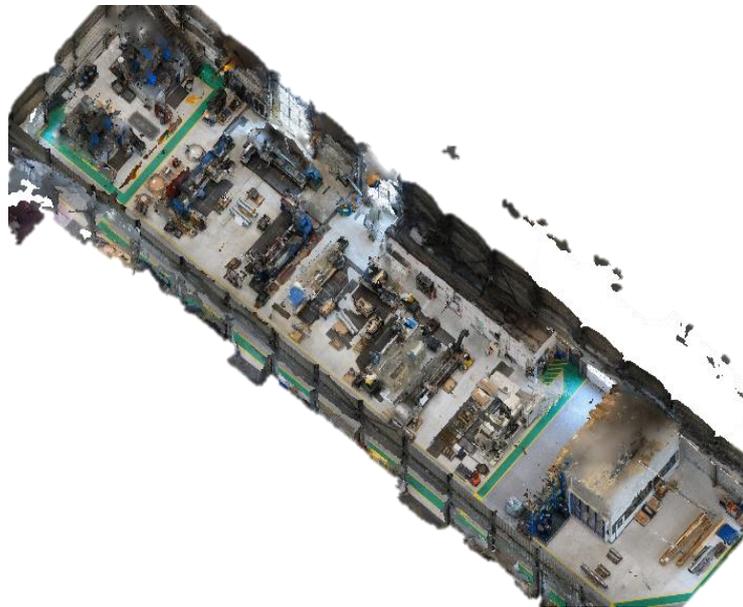
#### ***Durchgeführte Arbeiten***

In AP 4.2 wurden verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Use-Cases bei Projektpartnern durchgeführt. Die Durchführung der Versuche erfolgte jeweils an Wochenenden, da so sichergestellt werden konnte, dass sich während des Flugs keine Menschen innerhalb der Halle befinden. Die Ergebnisse des Scans und der Datenverarbeitung wurden den Unternehmen gezeigt und Stärken und Schwächen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert.

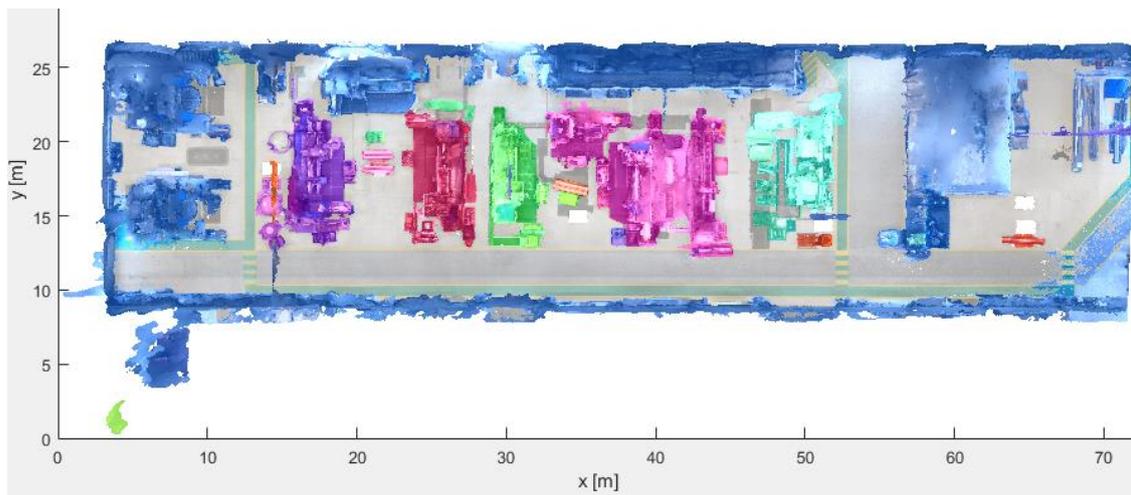
### ***Erzielte Ergebnisse***

Insgesamt konnten drei erfolgreiche Versuchsreihen in Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt werden. Die Flugzeiten mit der Drohne vor Ort betragen zwischen 30 und 60 Minuten, abhängig von der Hallengröße. Die Datenverarbeitungsdauer per Photogrammetrie betrug zwischen 4 Tagen und 14 Tage. Aufgrund der unterschiedlichen Umgebungsverhältnisse wurden teilweise mehrere Iterationsschritte und Parameteränderungen durchgeführt, um die Ergebnisqualität zu verbessern.

Der erste Versuch wurde bei einem Mitglied des Projektbegleitenden Ausschusses hatte das Ziel ein segmentiertes dreidimensionales Abbild der Halle zu erzeugen und die Bodenflächen hinsichtlich Wegbreiten zu untersuchen. Auf Bild 20 und Bild 21 sind die Ergebnisse der Punktwolkenberechnung und der Segmentierung dargestellt. Die Ergebnisqualität ist nach Diskussionen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss ausreichend für den Einsatzzweck und auch für eine mögliche Umplanung des Fabriklayouts.

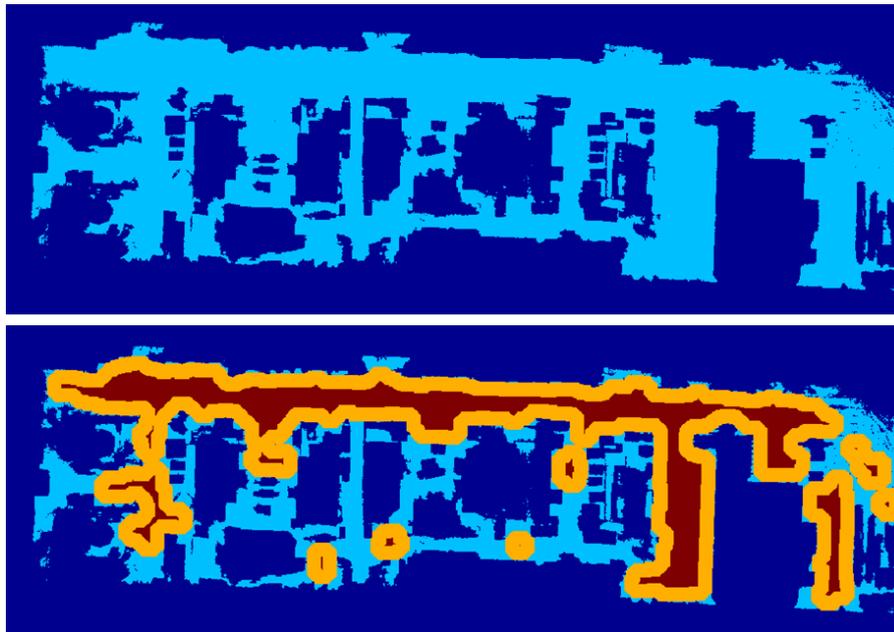


**Bild 20: Punktwolke vom Fabriklayout bei erster Versuchsdurchführung**



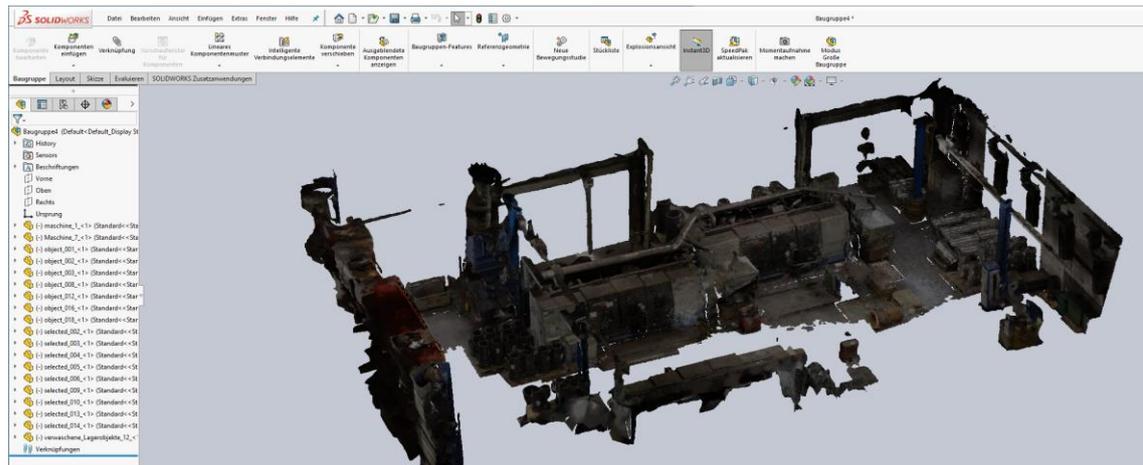
**Bild 21: Segmentierung Fabriklayout des ersten Versuchsdurchführung**

Aus dem Modell heraus wurde anschließend die Bodenfläche extrahiert und hiervon die freien Bodenflächen markiert. Für eine zukünftige Verwendung von neuen Flurfördergeräten sollte geprüft werden, welche Fabrikbereiche ein Fahrzeug mit einer Breite von 1,2 m erreichen kann. Hierfür wurden die Randbereiche der freien Bodenflächen markiert und von dort alle Flächen mit rot markiert, die einen Mindestabstand von 1,2 m zu allen Randbereichen einhalten. Das Ergebnis ist auf Bild 22 dargestellt. Mithilfe dieser Darstellung konnte das Unternehmen die Eignung eines neuen Flurförderfahrzeugs schnell und umfassend prüfen.



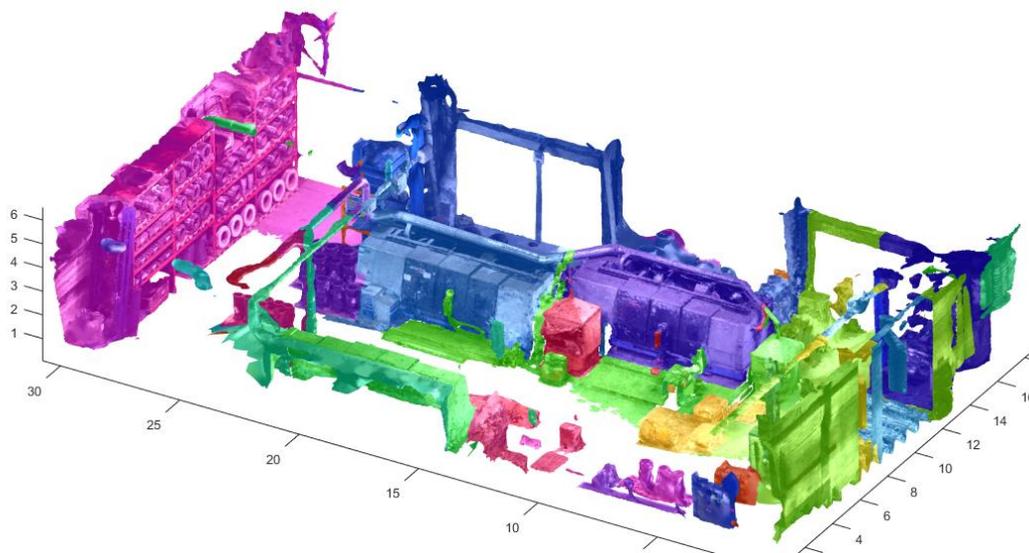
**Bild 22: Analyse Bodenflächen des Fabriklayouts, freie Bodenflächen (hell blau) oben, erreichbare Bodenflächen mit 1,2 m Fahrzeugbreite (rot) unten**

Der zweite Versuch wurde bei einem interessierten Industrieunternehmen durchgeführt. Hierbei sollte ein Teilbereich der Produktion dreidimensional aufgenommen und segmentiert werden, um den Austausch einer Maschine im Modell zu prüfen. Das Ergebnis der Punktwolkenberechnung wurde beim Projektpartner in der internen Bearbeitungssoftware Solid Works eingeladen (siehe Bild 23).



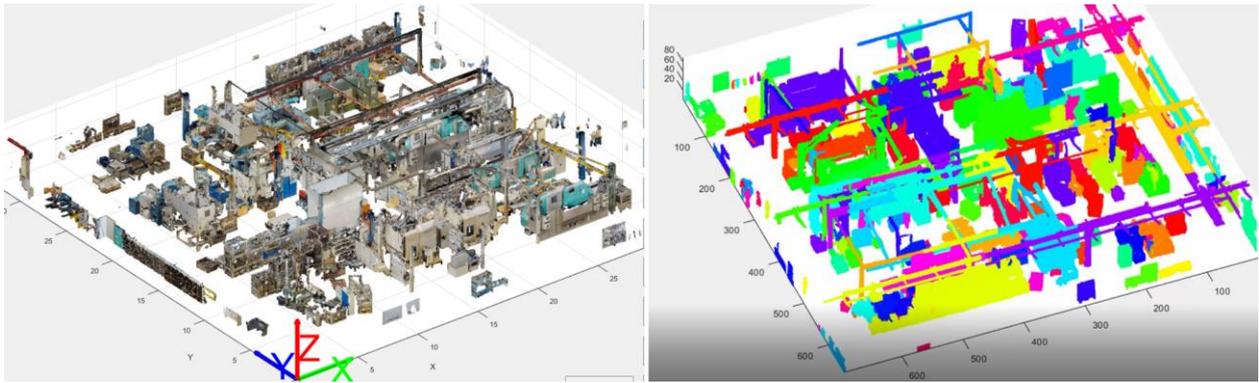
**Bild 23: Punktwolkenmodell Fabriklayout in Solid Works**

Die automatisierte Auswertung und Segmentierung waren in diesem Versuch nicht zufriedenstellen, da die Maschinen direkt aneinander standen und somit der Algorithmus keine Trennung vornehmen konnte. Aus diesem Grund wurde die Segmentierung manuell erweitert, wie auf Bild 24 zu sehen ist. Auf Basis der Verarbeitung konnte der Kunde selbstständig Objekte aus dem Layout entfernen und neue Objekte importieren.



**Bild 24: Segmentierung Fabriklayout der zweiten Versuchsdurchführung**

Der dritte Versuch wurde in Zusammenarbeit mit den Projektbegleitenden Ausschuss und einem interessierten Industrieunternehmen durchgeführt. Das Ziel war es, die entwickelte Datenverarbeitung in Kombination mit Laserscanneraufnahmen zu testen. Hierfür wurde bei dem Industrieunternehmen 25 Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner durchgeführt. Die Punktwolke wurde anschließend von der entwickelten Software verarbeitet und segmentiert. Die Verarbeitung und Segmentierung war bei diesem Versuch sehr erfolgreich und wurde automatisiert durchgeführt. Das Ergebnis ist auf Bild 25 dargestellt. Auf dieser Basis hat das Unternehmen das Fabriklayout in verschiedenen Konzepten verändert und miteinander verglichen. Über die dreidimensionale Darstellung und die Segmentierung konnten belastbare und zuverlässige Konzept erarbeitet und verglichen werden.



**Bild 25: Segmentierung des Layoutscans mit Punktwolke Layoutscan (links), segmentierter Layoutscan (rechts)**

Die gesamten Ergebnisse wurden dem Projektbegleitenden Ausschuss vorgestellt und ausführlich diskutiert. Es wurde festgestellt, dass sich die Aufnahme und die Datenverarbeitung insbesondere für die Planung von kurzfristigen Layoutveränderungen oder für eine kostenarme Aufnahme des Layouts eignen. Die Genauigkeiten in der Punktwolke wurden für eine konzeptionelle Layoutplanung als ausreichend angesehen, jedoch wären für eine Feinplanung teilweise noch händische Ergänzungsmessungen notwendig. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Anforderungen aus AP 1, die zusammen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss definiert wurden, erfüllt werden konnten. Insgesamt konnte festgestellt werden, dass je nach Komplexität und Aufbau eines Fabriklayouts die Aufnahme- und Verarbeitungszeit für die Fabriklayoutpunktwolke variiert, da manuelle Ergänzungen notwendig sein können.

### **AP5: Projektmanagement und Dokumentation**

Zu Projektbeginn wurde durch das IPH eine Web-Präsenz eingerichtet, die eine öffentliche Kurzvorstellung des Projekts sowie einen internen Bereich und eine Cloud zum Informationsaustausch mit den Mitgliedern des Projektbegleitender Ausschusses beinhaltet. Bei der GVB wurde ein gemeinsames Repository zur Verwaltung aller im Zusammenhang mit der Projektbearbeitung stehenden Dokumente eingerichtet. Die Projektinhalte wurden entsprechend dem Projektfortschritt in der Zeitschrift „Zeitschrift für wirtschaftliche Fabrikbetrieb“ sowie bei der „Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik“ publiziert. Weiterhin wurde ein Vortrag auf dem Forum „Produktion und Logistik“ gehalten.

In der gesamten Projektlaufzeit fanden mehrere Projekttreffen zwischen IPH und dem Projektbegleitender Ausschuss statt. Hierbei wurde der jeweilige Bearbeitungsstand vorgestellt und ein Abgleich mit den durch die Mitglieder des Projektbegleitender Ausschusses formulierten Anforderungen vorgenommen. Die Diskussionsergebnisse der Treffen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden unmittelbar in die weitere Projektbearbeitung einbezogen. Zum Ende der Projektlaufzeit fanden mehrere Treffen bei Projektpartnern statt, um das entwickelte System in unterschiedlichen Umgebungen zu testen.

## **4 Durchführende Forschungsstellen**

### **4.1 Forschungsstelle 1: IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH**

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH forscht und entwickelt auf dem Gebiet der Produktionstechnik, berät Industrieunternehmen und bildet den ingenieurwissenschaftlichen Nachwuchs aus. Gegründet wurde das IPH 1988 aus der Leibniz Universität Hannover heraus. Bis heute wird es als gemeinnützige GmbH von drei Professoren der Universität geleitet.

***Leiter der Forschungsstelle:***

Dr.-Ing. Malte Stonis

***Geschäftsführende Gesellschafter:***

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer  
Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens  
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

***Koordinierender Geschäftsführer:***

Dr.-Ing. Malte Stonis

***Projektleiter:***

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

***Anschrift:***

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Hollerithallee 6  
30419 Hannover  
Telefon: +49 511 27976-0  
Telefax: +49 511 27976-888  
E-Mail: [info@iph-hannover.de](mailto:info@iph-hannover.de)  
Internet: [www.iph-hannover.de](http://www.iph-hannover.de)

## **5 Förderhinweis**

Das IGF-Vorhaben 19170N der Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik (GVB) e.V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

## 6 Literatur

- [Eca20] eCalc – the most reliable RC Calculation on the Web, <https://www.ecalc.ch/xcopter-calc.php>, aufgerufen am 14.08.2020.
- [Gru15] Grundig, C.-G. (2015): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser.
- [Ham14] Hambach, J.; Albrecht, F. (2014): Methoden der Szenariotechnik in der Fabrikplanung. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (3), S. 117–120.
- [IPH18] Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH: Youtube - <https://www.youtube.com/watch?v=xfvpjlUNKKA>, aufgerufen am 14.08.2020.
- [Paw14] Pawellek, G. (2014): Ganzheitliche Fabrikplanung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [Wie14] Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Reichardt, J. (2014): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2., überarb. und erw. Aufl. München [u.a.]: Hanser.

## 7 Bilderverzeichnis

Bild 1: CAD-Modell Drohnenkonzept .....	6
Bild 2: Grobkonzept für die teilautonome Flugsteuerung .....	8
Bild 3: Vorgehensweise automatisierter Layoutscan mit Erkundung (links) und systematischer Scan des Layouts (rechts) .....	9
Bild 4: Umsetzung Drohnenkonzept .....	12
Bild 5: Drohnenmodell für Simulation des automatisierten Layoutscans .....	13
Bild 6: Umsetzung des teilautonomen Steuerungskonzepts .....	14
Bild 7: Teilautonomes Drohnensystem .....	15
Bild 8: Digitales Fabriklayout, Industrieunternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss links, Versuchsfeld IPH rechts .....	16
Bild 9: Import von CAD-Modell in Punktwolke .....	17
Bild 10: Automatisierte Objekterkennung auf Basis von 2D-Perspektiven des 3D-Objekts .....	18
Bild 11: Neun zufällige Ausrichtungen des Referenzmodells .....	19
Bild 12: Ergebnis der automatischen Ausrichtung .....	20
Bild 13: Punktwolke Layoutscan IPH-Versuchsfeld .....	21
Bild 14: Segmentierung Punktwolke IPH-Versuchsfeld .....	22
Bild 15: Veränderung Fabriklayout, Ursprungslayout oben links, ausgewählte und veränderte Objekte oben rechts, Resultat der Veränderungen unten .....	23
Bild 16: Auszug Referenzmessung für Validierung der Genauigkeit .....	24
Bild 17: Fehlerhafte Punktwolkenberechnung in Form einer Auswölbung .....	25
Bild 18: Löcher in Punktwolkenmodell .....	25
Bild 19: Scanresultat der teilautonomen Drohnensteuerung .....	26
Bild 20: Punktwolke vom Fabriklayout bei erster Versuchsdurchführung .....	27
Bild 21: Segmentierung Fabriklayout des ersten Versuchsdurchführung .....	28
Bild 22: Analyse Bodenflächen des Fabriklayouts, freie Bodenflächen (hell blau) oben, erreichbare Bodenflächen mit 1,2 m Fahrzeugbreite (rot) unten .....	28

Bild 23: Punktwolkenmodell Fabriklayout in Solid Works .....	29
Bild 24: Segmentierung Fabriklayout der zweiten Versuchsdurchführung.....	29
Bild 25: Segmentierung des Layoutscans mit Punktwolke Layoutscan (links), segmentierter Layoutscan (rechts).....	30

## **8 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Referenzmessungen Genauigkeit Punktwolkenmodell.....	24
---	----