Systematische Analyse und Optimierung der Zukunftsfabrik

Projektarbeit T3_3101

Fakultät Technik

Studiengang Maschinenbau - Produktionstechnik TMP23

Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg

Campus Friedrichshafen

von

Alessio Castiglione, Dominik Scheuermann, Gabriel Schmid

Abgabedatum: 13.07.2026

Jahrgang 2023

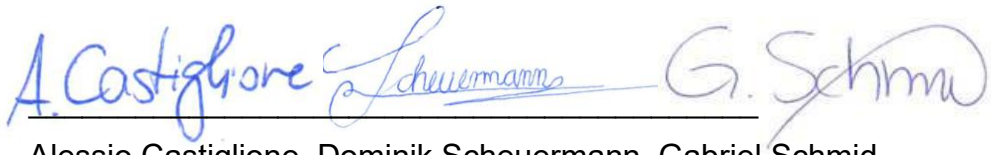
Bearbeitungszeitraum	24 Wochen
Matrikelnummer, Kurs	4026549, 6171536, 1861442; TMP23
Dualer Partner	Henke-Sass, Wolf GmbH, Tuttlingen
	Diehl AKO Stiftung & Co.KG
	Texmo Blank, Riedlingen
Gutachter*in der Dualen Hochschule	Prof. Dr.-Ing. Thomas Dietmüller

Sperrvermerk

gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017:

„Der Inhalt dieser Arbeit darf weder als Ganzes noch in Auszügen Personen außerhalb des Prüfungsprozesses und des Evaluationsverfahrens zugänglich gemacht werden, sofern keine anders lautende Genehmigung vom Dualen Partner vorliegt."

Tuttlingen, Wangen, Riedlingen den 07.07.2026



Alessio Castiglione, Dominik Scheuermann, Gabriel Schmid

Erklärung

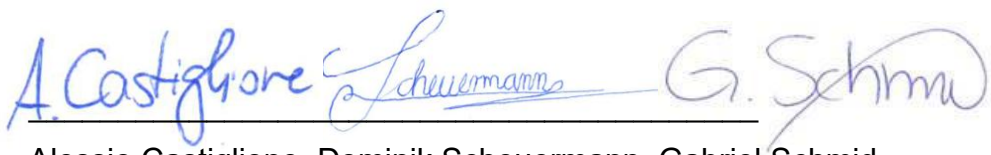
gemäß Ziffer 1.1.13 der Anlage 1 zu §§ 3, 4 und 5 der Studien- und Prüfungsordnung für die Bachelorstudiengänge im Studienbereich Technik der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vom 29.09.2017.

Ich versichere hiermit, dass ich meine Projektarbeit mit dem Thema:

Systematische Analyse und Optimierung der Zukunftsfabrik

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt.

Tuttlingen, Wangen, Riedlingen den 07.07.2026



Alessio Castiglione, Dominik Scheuermann, Gabriel Schmid

Inhaltsverzeichnis

Sperrvermerk I

Erklärung II

Inhaltsverzeichnis III

Abkürzungsverzeichnis V

Abbildungsverzeichnis VI

1. Einleitung 1

2. Analyse des IST-Zustands 3

2.1 Anlagenaufbau 3

2.2 Materialfluss des Montageprozesses 4

2.3 Analyse des Ausgangszustands 6

3. Stand der Technik 8

3.1 ifm Vision Assistant 8

3.2 Universal Robots 8

3.3 Bin-Picking 11

3.3.1 Mikado 12

4. Methodisches Vorgehen 13

5. Lageerkennung Husky 15

5.1 Ausgangssituation und Problemstellung 15

5.1.1 Ausgangssituation 15

5.1.2 Problemstellung 16

5.2 Zieldefinition 17

5.3 Umsetzung 18

5.3.1 Auswahl 2D-Sensors 18

5.3.2 Implementierung ins System 20

5.3.3 Hand-Eye-Kalibrierung 21

5.3.4 Definition der Ankerpunkte und Bilderkennung 24

5.3.5 Datenkommunikation 28
5.3.6 Roboterprogrammierung 30
5.4 Ergebnis & Bewertung 32
5.4.1 Erreichte Ergebnisse 32
5.4.2 Bewertung gegenüber der Zieldefinition 33
5.4.3 Alternative Lösung als Rückfallebene 34
5.4.4 Grenzen der Lösung 34
6. Bin-Picking 35
6.1 Ausgangssituation und Problemstellung 35
6.2 Zieldefinition 38
6.3 Ursachenanalyse 38
6.3.1 Mitwelt und Maschine 38
6.3.2 Material 39
6.3.3 Methode 39
6.3.4 Zusammenfassung 40
6.4 Optimierungsmaßnahmen 41
6.5 Ergebnis und Bewertung 43
6.6 Ausblick 44
7. Ergebnisse und Diskussion 45
7.1 Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen 45
7.2 Vergleich der Zykluszeiten 45
7.3 Bewertung der Zielerreichung 48
7.4 Grenzen der Optimierung 51
8. Fazit und Ausblick 52
8.1 Fazit 52
8.2 Ausblick 53
9. Literaturverzeichnis VII
10. Anhang ..... A

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
DHBW	Duale Hochschule Baden-Württemberg
FTS	Fahrerloses Transportsystem
IP	Internet Protocol
MES	Manufacturing Execution System
PCIC	Process Interface Communication
PDCA	Plan – Do – Check – Act
QM	Qualitätsmanagement
ROI	Region of Interest
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point
ZDP	Zentrum für Digitalisierung in Produktion und Produktentwicklung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht der Montageanlage mit den einzelnen Stationen 4
Abbildung 2 Schematischer Materialfluss des Montageprozesses .....
Abbildung 3 Mittelwert der Stationsdauer 6
Abbildung 4 Polyscope Programmierebene.....
Abbildung 5 6 Lagerplätze 15
Abbildung 6: O2D522-Sensor..... 18
Abbildung 7 9 Lagerplätze .....
Abbildung 8 ifm Kamera .....
Abbildung 9 Kalibrierung Spitze des Markers .....
Abbildung 10 Kalibrierung unterschiedliche Ausrichtung .....
Abbildung 11 Marker-Blatt 24
Abbildung 12 Referenzpunkte 25
Abbildung 13 Referenzierung Ankerpunkte Assistant 26
Abbildung 14 Zeichenkette 27
Abbildung 15 PuTTY Konfiguration 28
Abbildung 16 Testlauf Vision Assistant 29
Abbildung 17 Programmablauf Lageerkennung Husky 30
Abbildung 18 Bin-Picking Station..... 35
Abbildung 19 Produkt: Bin 36
Abbildung 20 Zeitmessung Ist-Zustand Bin-Picking 37
Abbildung 21 Unerkannte Bins 39
Abbildung 22 Schlechte Griffsuche..... 40
Abbildung 23 Durchschnittliche Zykluszeit Bin-Picking.....
Abbildung 24 Vergleich 6 zu 9 Lagerplätzen..... 49

1. Einleitung

Moderne Produktionssysteme stehen vor der Herausforderung, eine hohe Produktivität mit Flexibilität und Prozessstabilität zu verbinden. Insbesondere automatisierte Montageanlagen müssen unterschiedliche Produktvarianten zuverlässig verarbeiten und gleichzeitig kurze Zykluszeiten erreichen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, ist eine kontinuierliche Analyse und Optimierung der Produktionsprozesse erforderlich. Durch die systematische Identifikation von Schwachstellen können bestehende Abläufe verbessert, Ressourcen effizienter genutzt und die Leistungsfähigkeit der Anlage nachhaltig gesteigert werden.[1]

Um Studierenden und Industriepartnern eine praxisnahe Forschungs- und Entwicklungsumgebung für diese Fragestellungen bereitzustellen, wurde am Campus Friedrichshafen der DHBW Ravensburg das Zentrum für Digitalisierung in Produktion und Produktentwicklung (ZDP) eingerichtet. Einen zentralen Bestandteil bildet dabei die Zukunftsfabrik Bodensee. Sie stellt eine reale Wertschöpfungskette dar, in der verschiedene Fertigungs- und Montageprozesse miteinander vernetzt sind. Die Zukunftsfabrik dient sowohl der praxisnahen Lehre als auch der anwendungsorientierten Forschung und bietet die Möglichkeit, moderne Produktions- und Automatisierungskonzepte unter realitätsnahen Bedingungen zu entwickeln, zu erproben und kontinuierlich weiterzuentwickeln.[2]

Die im Rahmen dieser Studienarbeit betrachtete Montageanlage ist Bestandteil der Zukunftsfabrik Bodensee. Sie dient der automatisierten Montage und dem späteren Rückführungsprozess eines Raspberry-Pi-Gehäuses und bildet einen Teil der übergeordneten Wertschöpfungskette innerhalb der Zukunftsfabrik. Eine detaillierte Beschreibung des Anlagenaufbaus, der einzelnen Stationen und des Materialflusses erfolgt in Kapitel 2.

Die Aufgabenstellung der Studienarbeit **„Systematische Analyse und Optimierung der Zukunftsfabrik“** bestand darin, die bestehende Montageanlage hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit systematisch zu analysieren und gezielt zu optimieren. Im Mittelpunkt stand dabei die Reduzierung der Zykluszeit einzelner Prozessschritte sowie die

[1] Vgl. „Was ist Industrie 4.0?“
[2] Vgl. „Zentrum für Digitalisierung in Produktion und Produktentwicklung | DHBW Ravensburg“.

Verbesserung des Materialflusses und der Prozessstabilität. Als übergeordnetes Ziel wurde vorgegeben, eine Produktionsleistung von **50 Teilen pro Stunde bei drei unterschiedlichen Produktvarianten** zu erreichen. Um dieses Ziel zu unterstützen, wurde zunächst der Ausgangszustand der Anlage analysiert und die einzelnen Prozessschritte hinsichtlich ihrer Zykluszeiten untersucht. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden Engpässe identifiziert, geeignete Optimierungsmaßnahmen entwickelt, umgesetzt und abschließend hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet.

Da es sich bei der betrachteten Anlage um eine Demonstrations- und Forschungsanlage handelt, unterscheidet sich ihre Zielsetzung grundlegend von einer industriellen Serienfertigung. Der Fokus der Studienarbeit liegt daher nicht auf einer dauerhaften Produktion großer Stückzahlen, sondern auf der systematischen Verbesserung bestehender Prozesse sowie der Weiterentwicklung einzelner Anlagenkomponenten. Die Anlage verfügt sowohl über einen Montage- als auch über einen Demontageprozess. Im Rahmen dieser Studienarbeit liegt der Schwerpunkt der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen auf dem Montageprozess, da dieser den wesentlichen Einfluss auf die angestrebte Reduzierung der Zykluszeit besitzt.

2. Analyse des IST-Zustands

2.1 Anlagenaufbau

Die im Rahmen dieser Studienarbeit betrachtete Montageanlage ist Bestandteil der Zukunftsfabrik Bodensee und dient der praxisnahen Abbildung eines automatisierten Montageprozesses. Sie wurde als Demonstrations- und Forschungsanlage konzipiert, um unterschiedliche Produktions- und Automatisierungskonzepte unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen und weiterzuentwickeln.

Der Aufbau der Anlage besteht aus drei Industrierobotern, einem manuellen Montagearbeitsplatz, einem Fördersystem mit Werkstückträgern, einem autonomen mobilen Roboter (Husky) sowie den dazugehörigen Kamera- und Steuerungssystemen. Die einzelnen Stationen sind über zwei parallel angeordnete Förderbänder miteinander verbunden, auf denen die Werkstückträger kontinuierlich im Umlauf geführt werden.

Am Ende der beiden Förderbänder befindet sich jeweils eine pneumatisch betriebene Umsetzstation. Dort werden die Werkstückträger angehoben, auf das gegenüberliegende Förderband umgesetzt und anschließend wieder abgesenkt. Durch dieses Konzept entsteht ein geschlossener Materialkreislauf, in dem die Werkstückträger den Montageprozess kontinuierlich durchlaufen.

Auf der Anlage können insgesamt fünf unterschiedliche Varianten eines Raspberry-Pi-Gehäuses montiert werden. Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl und Position der zu montierenden Metall-Bins sowie einer Ausführung mit zusätzlicher Halterung. Je nach Variante werden keine, eine oder zwei Metall-Bins auf dem Werkstückträger bereitgestellt und anschließend am manuellen Montagearbeitsplatz montiert. Dadurch eignet sich die Anlage insbesondere zur Untersuchung variantenreicher Montageprozesse und deren Auswirkungen auf den Materialfluss und die Prozesszeiten.

Die einzelnen Stationen der Montageanlage sind in Abbildung 1 dargestellt.

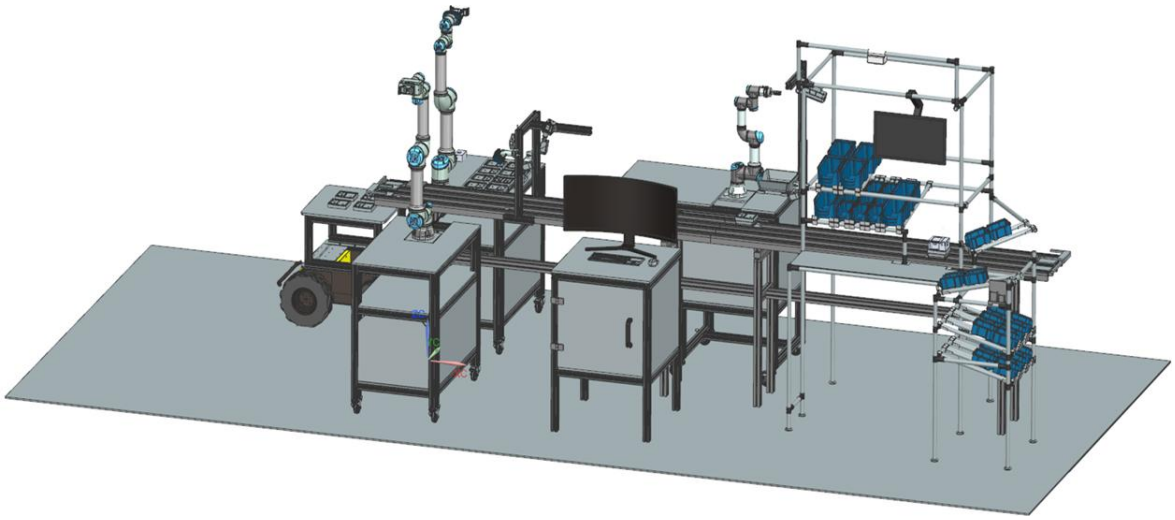


Abbildung 1 Übersicht der Montageanlage mit den einzelnen Stationen

2.2 Materialfluss des Montageprozesses

Der Montageprozess beginnt an der Beladestation. Dort entnimmt ein Industrieroboter die Rückseite des Raspberry-Pi-Gehäuses aus einem Bereitstellungsmagazin und positioniert diese auf einem Werkstückträger des Fördersystems.

Anschließend wird der Werkstückträger zur Bin-Picking-Station transportiert. Dort erkennt ein kameragestütztes Bildverarbeitungssystem die Lage der in einem Schüttgutbehälter befindlichen Metall-Bins. Auf Grundlage der ermittelten Positionen entnimmt der Roboter die für die jeweilige Produktvariante erforderliche Anzahl an Bins und legt diese auf dem Werkstückträger ab.

Nach dem Bin-Picking gelangt der Werkstückträger über die pneumatische Umsetzstation auf das gegenüberliegende Förderband und wird dem manuellen Montagearbeitsplatz zugeführt. Dort entnimmt der Werker die bereitgestellten Komponenten vom Werkstückträger, fügt die Vorder- und Rückseite des Raspberry-Pi-Gehäuses zusammen und montiert die entsprechenden Metall-Bins. Anschließend wird das vollständig montierte Gehäuse wieder auf dem Werkstückträger abgelegt.

Im weiteren Prozessverlauf ist eine End-of-Line-Prüfung (EoL) vorgesehen. Diese dient der Qualitätskontrolle der montierten Werkstücke und soll perspektivisch mithilfe eines kameragestützten Prüfsystems eine automatisierte Bewertung der Bauteile ermöglichen.

Abschließend transportiert das Fördersystem das montierte Werkstück zurück zur Beladestation. Dort entnimmt der Industrieroboter das fertige Produkt vom Werkstückträger und legt es auf einer definierten Ablageposition des autonomen mobilen Roboters Husky ab. Der Husky übernimmt den automatisierten Transport der montierten Werkstücke und dient perspektivisch als Bindeglied zwischen der betrachteten Montageanlage und einem zweiten Montageplatz innerhalb der Zukunftsfabrik Bodensee. Dadurch soll ein standortübergreifender Materialfluss zwischen mehreren Fertigungsstationen realisiert werden.

Der Materialfluss des Montageprozesses ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

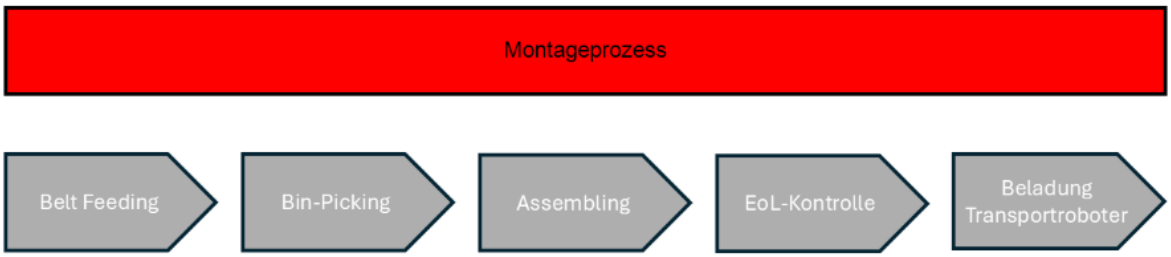


Abbildung 2 Schematischer Materialfluss des Montageprozesses

Neben dem Montageprozess verfügt die Anlage über einen Demontageprozess. Dieser dient der Rückführung bereits montierter Werkstücke, um diese in ihre Einzelkomponenten zu zerlegen und für weitere Versuche erneut bereitzustellen. Da die Optimierungsmaßnahmen dieser Studienarbeit auf die Reduzierung der Zykluszeit des Montageprozesses abzielen, wird der Demontageprozess im weiteren Verlauf nicht näher betrachtet.

2.3 Analyse des Ausgangszustands

Nach der Einarbeitung in die Montageanlage wurden zunächst mehrere Testläufe durchgeführt, um den Ausgangszustand des Systems zu analysieren. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Materialfluss nachzuvollziehen sowie die Bearbeitungszeiten der einzelnen Prozessschritte zu erfassen. Auf Grundlage dieser Messungen sollten mögliche Engpässe identifiziert und die anschließenden Optimierungsmaßnahmen gezielt ausgewählt werden.

Zur Ermittlung der Bearbeitungszeiten wurden mehrere Durchläufe der Anlage mit der Produktvariante 4 durchgeführt. Diese Variante wurde gewählt, da sie mit zwei Metall-Bins den größten Montageaufwand innerhalb der betrachteten Produktvarianten aufweist und somit den ungünstigsten Anwendungsfall darstellt. Die Zeitmessungen erfolgten manuell mithilfe einer Stoppuhr. Für jeden Prozessschritt wurden mehrere Messungen durchgeführt und anschließend gemittelt.

Die ermittelten durchschnittlichen Bearbeitungszeiten der einzelnen Prozessschritte sind in Tabelle 1 & Abbildung 3 dargestellt.

Tabelle 1 Durchschnittliche Bearbeitungszeiten der einzelnen Prozessschritte im Ausgangszustand.

Prozessschritt	Durchschnittliche Bearbeitungszeit
Belt Feeding	19 s
Bin-Picking	80 s
Handarbeitsplatz	12 s
Husky-Beladung	19 s

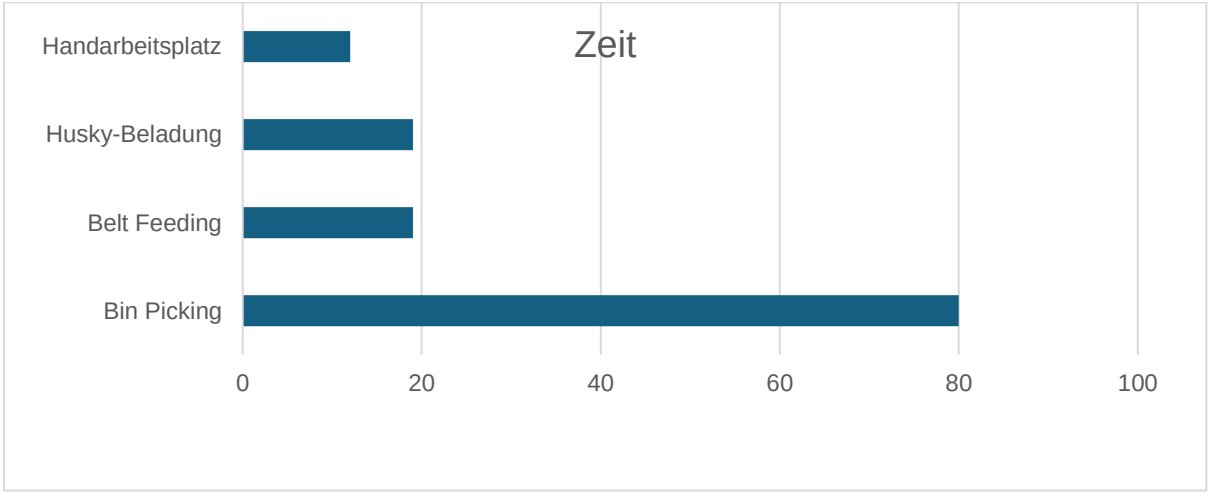


Abbildung 3 Mittelwert der Stationsdauer

Die Auswertung der Messungen zeigt, dass sich die Bearbeitungszeiten der einzelnen Stationen deutlich unterscheiden. Während Belt Feeding, Handarbeitsplatz und Husky-Beladung weitgehend konstante Bearbeitungszeiten aufweisen, treten beim Bin-Picking erhebliche Schwankungen auf. Die gemessenen Bearbeitungszeiten lagen hierbei zwischen etwa einer und zwei Minuten pro Werkstück.

Ursache für diese Schwankungen war die kamerabasierte Erkennung der Metall-Bins im Schüttgutbehälter. Konnten geeignete Greifpositionen nicht unmittelbar erkannt werden oder schlug ein Greifversuch fehl, musste der Roboter den Behälter zunächst durchmischen und anschließend eine erneute Bildaufnahme durchführen. Dadurch verlängerte sich die Bearbeitungszeit des Bin-Pickings teilweise erheblich.

Aufgrund der deutlich höheren Bearbeitungszeit sowie der starken zeitlichen Schwankungen wurde das Bin-Picking als Engpass des Montageprozesses identifiziert. Die Ergebnisse der Analyse bildeten die Grundlage für das methodische Vorgehen sowie die Auswahl der im weiteren Verlauf der Studienarbeit beschriebenen Optimierungsmaßnahmen.

3. Stand der Technik

3.1 ifm Vision Assistant

Die ifm-Unternehmensgruppe wurde 1969 von drei Gründern in Essen gegründet, wobei einer der Gründer die Produktion und Entwicklung des Unternehmens in Tettnang am Bodensee verantwortete. Das Unternehmen produziert Sensoren, Steuerungen und Systeme für die industrielle Automatisierung. Für die Sensoren stellt ifm eine eigene Konfigurationssoftware mit dem Namen ifm Vision Assistant bereit, welche für die Einrichtung und Steuerung der Sensorik zuständig ist. Die Software wird auf einem Windows-PC installiert und kommuniziert per Feldbusanbindung mit dem angeschlossenen Sensor.

Die Aufgabe des Vision Assistants besteht darin sicherzustellen, dass die vom Sensor erfassten Bildinformationen verarbeitet und anschließend in Form von Positionsdaten an ein weiteres Gerät übertragen werden können – im vorliegenden Anwendungsfall an den UR-Roboter. Die Verbindung zwischen Software und Sensor erfolgt über die IP-Adresse; Voraussetzung dafür ist, dass sich beide Komponenten im selben Subnetz befinden und derselben IP-Adressgruppe angehören.

Die Software bietet eine Vielzahl an Funktionen, deren Umfang von der Ausgabe einfacher Statussignale bis hin zur Bereitstellung präziser Positionskoordinaten reicht. Darüber hinaus ermöglicht der Vision Assistant die Durchführung einer Sensor-Aktor-Kalibrierung. Im Kontext der Verbindung zwischen Kamera und Roboter wird diese als Hand-Eye-Kalibrierung bezeichnet. Über ein integriertes Live-Bild und definierte Schnittstellen werden die aufbereiteten Signale schließlich in Form eines PCIC-Signals an den Aktor übermittelt.[3]

3.2 Universal Robots

Universal Robots wurde im Jahr 2005 gegründet und stellt kollaborative Roboter, sogenannte Cobots, her. Diese Roboter zeichnen sich dadurch aus, dass sie mithilfe der zugehörigen Softwareumgebung Polyscope eine Vielzahl unterschiedlicher Befehle und Bewegungsabläufe ausführen können. Polyscope gilt als marktführende Software im Bereich kollaborativer Robotik und wird über ein Touch Pendant bedient, das eine

[3]ifm electronic gmbh, „ifm“.

intuitive Programmierung und Steuerung ermöglicht. Neben der grafischen Programmierung ermöglicht Polyscope auch die direkte Verwendung von URScript, einer textbasierten Programmiersprache, mit der individuelle Skript-Blöcke innerhalb eines Programms erstellt oder importiert werden können.[4]

Bewegungen können auf verschiedene Weise ausgelöst werden: manuell über das Touch Pendant, über einen einzelnen Basisbefehl oder durch ein Skript, welches über ein definiertes Startsignal ausgeführt wird. Innerhalb von Polyscope lassen sich vollständige Programme erstellen, die auf Grundlage der eingelernten Koordinaten und der Konfiguration des Werkzeugmittelpunkts (Tool Center Point, TCP) die gewünschten Zielpositionen anfahren. Der TCP bildet dabei den Referenzpunkt des Cobots und definiert die exakte Position der Werkzeugspitze.[5]

Ergänzend zur allgemeinen Vorstellung des Cobots und seiner Bedienung soll an dieser Stelle näher auf die Programmierung mit Polyscope eingegangen werden, da diese für die spätere Umsetzung der Lageerkennung eine zentrale Rolle spielt. Polyscope bietet dem Nutzer grundsätzlich zwei unterschiedliche Programmierebenen, die je nach Komplexität der Aufgabe eingesetzt werden können (siehe Abbildung 4).

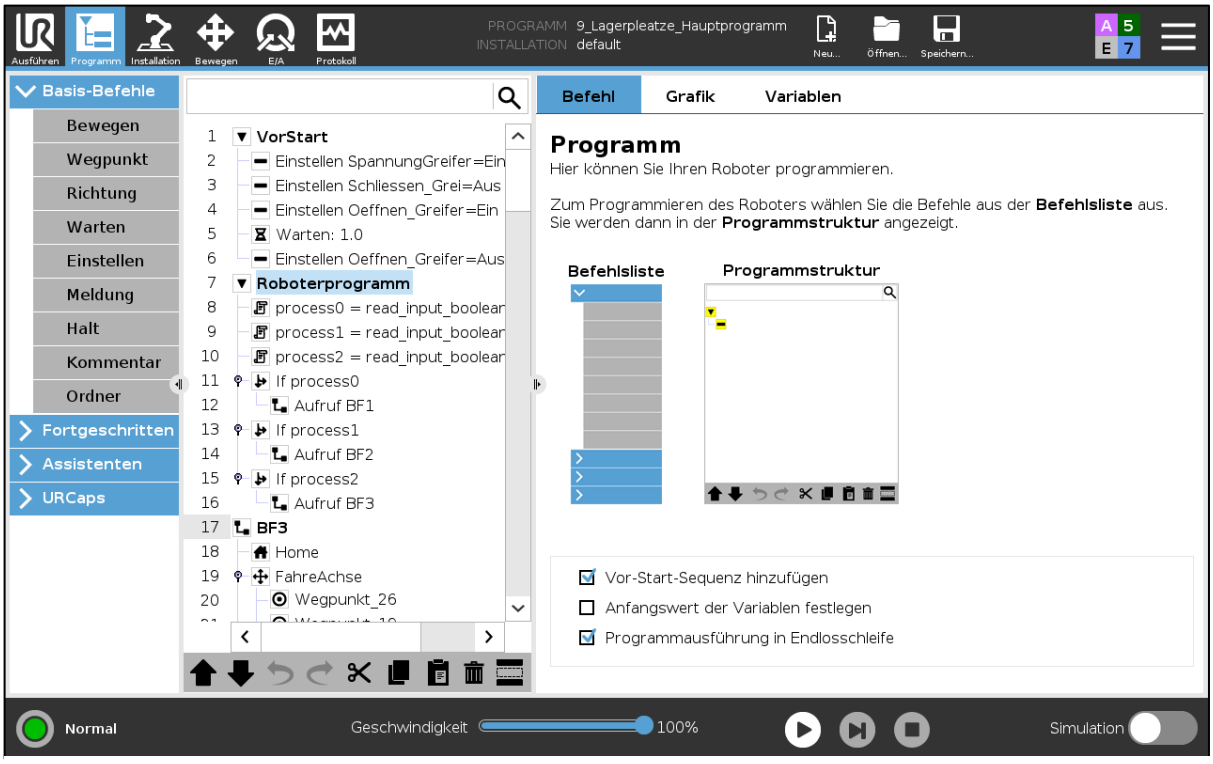


Abbildung 4 Polyscope Programmierebene

[4]Universal Robots A/S, „PolyScope“.
[5]Universal Robots A/S, „UR TCP“.

Auf der ersten Ebene stehen die sogenannten Basis-Befehle zur Verfügung. Dabei handelt es sich um vordefinierte, grafisch auswählbare Bausteine, mit denen sich einfache Handlungen des Roboters – etwa das Anfahren einer Position, das Warten für eine definierte Zeit oder das Setzen eines Ausgangssignals – ohne Programmierkenntnisse zusammenstellen lassen. Diese Bausteine werden über die grafische Oberfläche in einem Programmbaum angeordnet und schrittweise abgearbeitet.

Für anspruchsvollere oder anwendungsspezifische Abläufe steht auf der zweiten Ebene der Bereich der fortgeschrittenen Befehle bereit. Über diesen können eigene Skripte in Form von URScript-Blöcken eingebunden werden, in denen der Ablauf textbasiert und mit einem deutlich größeren Funktionsumfang programmiert wird. Dies ermöglicht beispielsweise mathematische Berechnungen, Schleifenkonstrukte oder die Kommunikation mit externen Geräten wie Sensoren.

Der besondere Vorteil von Polyscope liegt darin, dass beide Ebenen innerhalb desselben Programms miteinander kombiniert werden können. So lassen sich Basis-Befehle und Skript-Blöcke zu einer einzigen, zusammenhängenden Ablaufsequenz zusammenfügen, in der einfache Standardaktionen und komplexe programmierte Berechnungen gleichermaßen ausgeführt werden. Diese Verknüpfbarkeit macht Polyscope zu einer flexiblen Umgebung, die sowohl für einfache Automatisierungsaufgaben als auch für komplexere Anwendungen wie die in dieser Arbeit umgesetzte kamerabasierte Lageerkennung geeignet ist.

An den Roboterarm können unterschiedliche Greifer und Werkzeuge montiert werden, wodurch der Cobot für vielfältige Aufgaben eingesetzt werden kann. Für die Handhabung der Bauteile im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Pneumatikgreifer verwendet.[6]

[6]Universal Robots A/S, „Über uns UR“.

3.3 Bin-Picking

Unter dem Begriff Bin-Picking, im deutschen auch „Griff in die Kiste“, versteht man die automatisierte Entnahme von ungeordneten oder chaotisch zugeführten Werkstücken aus einem Behälter mittels eines Robotersystems. [7] Ziel ist es, die Bauteile sicher zu greifen und sie in einer definierten Ausrichtung dem nächsten Prozessschritt zuzuführen.[8]

Um ein leistungsfähiges Gesamtsystem herzustellen, benötigt es folgende Kernkomponenten:

- Industrieroboter: Dient als zentrales Werkzeug und muss hinsichtlich Traglast, Reichweite und Präzision auf die Aufgabe abgestimmt sein.
- 3D-Sensortechnik: Betrachtet das System, um räumliche Informationen der Umgebung zu erfassen.
- Greifersystem: Ist die Schnittstelle zwischen Roboter und Werkstück. Greifer muss für die Bauteile optimiert sein.
- Softwaregestützte Robotersteuerung: Verarbeitet die Bilddaten zur Objekterkennung und berechnet die kollisionsfreie Bahnplanung.

Im Gegensatz zu klassischen Systemen, welche fest programmierte Punkte anfahren, benötigt das Bin-Picking eine dynamische Anpassung an jedes Bauteil. Die Flexibilität des Systems hat dabei drei zentrale Problemstellungen: die Szeneninterpretation, die Objekterkennung und die Lageschätzung.

Der Prozess beginnt mit der Erzeugung einer Punktewolke durch den 3D-Sensor.[9] Mittels sogenannten „Matchings“ wird ein hinterlegtes CAD-Modell des Werkstücks mit dieser Punktewolke verglichen, um die exakte Position und Ausrichtung im Raum zu bestimmen. Auf dieser Grundlage berechnet die Steuerung die inverse Kinematik für den Greifer und plant die Bewegungsbahn, die Kollisionen mit dem Behälter oder anderen Anlagenkomponenten vermeidet.[10]

---

[7] „Alles Wissenswerte zum Thema Bin Picking“.
[8] Vgl. Hayat u. a., *Vision Based Identification and Force Control of Industrial Robots*, S.1.
[9] Vgl. Rusu, *Semantic 3d object maps for everyday manipulation*, S.197 ff.
[10] Vgl. „Alles Wissenswerte zum Thema Bin Picking“.

Die Einführung von Bin-Picking-Systemen bietet starke Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren. Die hohe Flexibilität, Kostenreduktion durch weniger Werkstückträger und Entlastung der Mitarbeiter sind nur einige davon. Das Bin-Picking ist eine Schlüsseltechnologie der modernen Fertigungsautomatisierung, die durch die Kombination von leistungsfähiger Sensorik und intelligenter Bahnplanung die Effizienz- und Wandlungsfähigkeit von Produktionsprozessen steigert.[11]

3.3.1 Mikado

Die Software-Lösung Mikado von Optonic ist ein einfaches zentrales Steuerungselement für Bin-Picking-Systeme und fungiert als Bindeglied zwischen der 3D-Sensorik und dem Industrieroboter.

Der Prozess in Mikado wird mit einem dynamischen Workflow abgebildet.

1. 3D-Datenerfassung: Aufnahme Punktewolke
2. Teile-Identifikation (Matching): Abgleich mit CAD-Modell des Werkstücks
3. Lageschätzung: Mikado erkennt die exakte Position und Orientierung
4. Greifplanung: Basierend auf die Teilelage berechnet das System die optimale Greiferposition.
5. Kollisionsfreie Bahnplanung: Intelligente Bahnplanung, kollisionsfreie Bewegungsbahn durch die gesamte Roboterumgebung
6. Orientierte Ablage: Es wird sichergestellt das die Teile für den nächsten Prozessschritt richtig ausgerichtet abgelegt werden.

Besonderheiten im Mikado-System ist das Visuelle Workflow-Programmierung. Das ist eine vereinfachte Programmierumgebung, mit der Funktionsblöcke per Drag & Drop verkettet werden. Dies ermöglicht auch eine einfache Definition von Fehlerbehandlungen. Zusätzlich verfügt Mikado über eine leistungsstarke Physik-Engine, diese ermöglicht das Abbilden der gesamten Anlage als digitalen Zwilling. Dies macht das Arbeiten an dem Programm dem Bedienenden sehr angenehm.[12]

[11] Vgl. Buxbaum und Daimler und Benz Stiftung, *Mensch-Roboter-Kollaboration*, S. VII.
[12] Vgl. „Alles Wissenswerte zum Thema Bin Picking“.

4. Methodisches Vorgehen

Bereits durch die vorangegangenen Arbeiten an diesem Projekt zeichnete sich ab, dass eine Verbesserung am Bin-Picking sowie an der Lageerkennung am fahrerlosen Transportsystem „Husky" erforderlich ist. Um diese Verbesserung nicht ausschließlich intuitiv, sondern methodisch fundiert zu bearbeiten, wurde eine strukturierte Vorgehensweise gewählt. Als Werkzeug hierfür kommt der **A3-Report** zum Einsatz.

Der A3-Report ist ein strukturiertes Problemlösungswerkzeug aus dem Lean Management, das seinen Namen vom verwendeten Papierformat DIN A3 ableitet. Das gesamte Vorgehen – von der Problemidentifikation bis zur Standardisierung der Lösung – wird auf einem einzigen A3-Bogen dokumentiert. Der Aufbau folgt dabei dem PDCA-Zyklus (Plan – Do – Check – Act) und gliedert sich in mehrere aufeinander aufbauende Abschnitte, die im Folgenden erläutert werden.

Im Bereich der **Hintergrundinformationen** wird das Problem präzise beschrieben. Hier werden festgehalten, worin die Abweichung besteht, wo sie auftritt, wann und von wem sie entdeckt wurde und wie sie erkannt werden konnte. Ziel dieses Abschnitts ist es, ein gemeinsames Verständnis des Problems zu schaffen, das frei von möglichen Lösungsansätzen ist.

Der **Zielzustand** beschreibt anschließend, wie die Situation nach erfolgreicher Umsetzung der Verbesserung aussehen soll. Neben der qualitativen Beschreibung des Idealzustands werden konkrete Messgrößen und deren angestrebte Ausprägungen definiert, sodass die spätere Zielerreichung überprüfbar ist.

In der Rubrik **5x Warum** erfolgt die eigentliche Ursachenanalyse. Ausgehend von den identifizierten Einflussgrößen wird durch mehrfaches Nachfragen die tatsächliche Grundursache des Problems freigelegt. Die Methode zwingt dazu, nicht bei den Symptomen stehen zu bleiben, sondern die zugrundeliegenden strukturellen Ursachen zu betrachten.

Die **Gegenmaßnahmen** bilden den Übergang von der Analyse zur Umsetzung. In diesem Abschnitt wird festgehalten, welche konkreten Maßnahmen zur nachhaltigen Beseitigung der Ursache eingeleitet werden, wer für die jeweilige Umsetzung verantwortlich ist, bis wann sie abgeschlossen sein muss und in welchem Bearbeitungsstatus sie sich befindet.

Die **Erfolgswirkung** überprüft anschließend, ob das gesetzte Ziel tatsächlich erreicht wurde. Über einen Vergleich von Ist- und Zielwert bezogen auf die zuvor definierten Messgrößen wird die Wirksamkeit der Maßnahmen bewertet. Werden die Ziele nicht erreicht, ist ein weiteres Vorgehen zu definieren.

Abschließend wird im Bereich der **Standardisierung** dokumentiert, wie die erreichte Verbesserung dauerhaft im Prozess verankert wird. Hierzu gehören die Anpassung bestehender Dokumente, die Erstellung neuer Standards sowie die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf vergleichbare Anwendungsfälle im Sinne einer Lessons-Learned-Betrachtung.

Zusätzlich ist ein Ishikawa-Diagramm sehr nützlich. Das verbindet mögliche Ursachen und ihre Wirkung und stellt diese graphisch dar. Die Herangehensweise ist in 5 Schritte aufgeteilt. Als erstes muss die Wirkung oder das Problem definiert werden. Im Anschluss werden die Hauptgruppen (5M - Material, Mensch, Maschine, Mitwelt, Methode) benannt. Das Brainstorming bildet dann den wichtigen Teil des Ishikawa-Diagramms. Hier werden Ursachen zusammengeschrieben und den jeweiligen Hauptgruppen zugeteilt. Diese können ineinander auch zu weiteren Ursachen führen. Zum Schluss werden die Einflussgrößen gewichtet. [13]

Entlang dieser Struktur wurde der Problemlösungsbericht für die Verbesserung der Lageerkennung des Huskys sowie dem Bin-Picking erstellt. Das vollständig ausgefüllte A3-Blatt findet sich in Anhang 3 und Anhang 4.

[13] Dr.-Ing. Thomas Dietmüller, „Skript QM“.

5. Lageerkennung Husky

5.1 Ausgangssituation und Problemstellung

5.1.1 Ausgangssituation

In der bestehenden Produktionslinie erfolgt der Materialtransport für Montage- und Demontageprozesse über ein fahrerloses Transportsystem (FTS) mit dem Namen „Husky". Auf der Ladefläche des Huskys befindet sich eine Auflagefläche mit einem 2×3-Muster, auf der bis zu sechs Bauteile abgestellt und transportiert werden können (siehe Abbildung 5). Zur Automatisierung der Be- und Entladevorgänge wurde im Rahmen vorheriger Projektphasen eine 3D-Kamera implementiert, welche die Bauteilpositionen auf der Ladefläche vom Husky erfasst. Die Koordinatenübermittlung erfolgte via PROFINET an eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), welche die Daten aggregierte und für die Bewegungsplanung des Greifroboters bereitstellte.



Abbildung 5 6 Lagerplätze

Die mechanische Halterung der Kamera ist oberhalb der Ladefläche montiert und vollständig in das bestehende Gestell integriert. Die zugehörige Verkabelung – sowohl für die Stromversorgung als auch für die Netzwerkanbindung – ist bereits vorhanden und betriebsbereit. Damit bleiben diese Infrastruktur-Komponenten für eine nachfolgende Lösung weiterhin nutzbar und müssen nicht neu errichtet werden.

5.1.2 Problemstellung

Im praktischen Betrieb zeigten sich signifikante technische und methodische Defizite bei der Verwendung der eingesetzten 3D-Kamera, welche eine prozesssichere Automatisierung verhinderten. Die nachfolgend aufgeführten Schwachstellen und Fehlerquellen basieren auf der Analyse der vorangegangenen Projektphasen, insbesondere auf den Studienarbeiten „Kamerabasierte Lageerkennung von Bauteilen für ein automatisiertes Fließbandsystem"[14] und „Automatisierung eines Roboterarms mit kamerabasierter Steuerung durch SPS"[15] von Kübler (2025) und Kähm (2025). Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich alle genannten Defizite auf diese Arbeiten.

Ein erstes Defizit liegt in der **optischen Auflösung** und im **Mindestabstand der eingesetzten Kamera**. Trotz der Überkopf-Montage zeigt sich bereits bei einem Objektabstand von unter 0,5 Metern eine signifikante Unschärfe, was die Präzision der Objekterkennung erheblich mindert. Hinzu kommt eine **Redundanz der Tiefeninformation**: Die Kamera liefert dreidimensionale Bilddaten, obwohl die Anwendung lediglich zweidimensionale Koordinaten benötigt. Da die Produkte auf einer definierten Ebene auf dem Husky positioniert werden, weist die Z-Koordinate keine Varianz auf. Die Verarbeitung der Tiefendaten verursacht somit eine unnötige Rechenlast ohne funktionalen Mehrwert. Ein weiteres Problem stellt die **Störanfälligkeit durch Reflexionen** dar. Die systeminterne Beleuchtung der Kamera verursacht auf den Bauteiloberflächen Reflexionen, welche die Bildauswertung verfälschen und zu Fehlmessungen führen. Schließlich tritt eine **fehlerhafte Referenzebenenbildung** auf: Bei der automatischen Ermittlung der Ablageebene werden Teile des Husky-Rahmens fälschlicherweise in die Berechnung einbezogen, was eine exakte Bestimmung der Arbeitsebene erheblich erschwert.

Aufgrund dieser Instabilitäten konnte eine kamerabasierte Steuerung bislang nicht produktiv eingesetzt werden. Als Übergangslösung wurde ein statisches Palettierungsprogramm implementiert. Dieses ist jedoch unzureichend, da es eine hochpräzise Positionierung des Huskys voraussetzt und weder die tatsächliche Anzahl der Produkte noch unvorhergesehene Hindernisse im Greifraum erfassen kann. Aus der Anlieferung über den Husky ergeben sich darüber hinaus systembedingte Positionsabweichungen,

[14]Kübler und Kähm, „Kamerabasierte Lagererkennung“.
[15]Kübler und Kähm, „Kalibrierung zwischen eines kamerabasierten System und einem Roboterarm“.

da mechanische Toleranzen dazu führen, dass die Palette nicht immer exakt an derselben Stelle abgestellt wird. Zusätzlich sind leichte Verdrehungen der Palette möglich. Das bestehende Palettierungsprogramm kann auf diese Abweichungen nicht reagieren, wodurch es zu Fehlgriffen und einer erhöhten Variabilität der Taktzeit am Arbeitsplatz kommt.

5.2 Zieldefinition

Die Integration eines optimierten Kamerasystems ist essenziell, um eine robuste, flexible und kollisionsfreie Automatisierung dieses Prozessschrittes zu gewährleisten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden hierzu mehrere Ziele verfolgt. Zunächst soll die Lagerkapazität von bisher sechs auf **neun Lagerplätze** erhöht werden, indem die Auflagefläche auf ein 3×3-Muster umgestellt wird. Darüber hinaus ist eine **dynamische Lageerkennung** zu implementieren, welche die Palettenposition zuverlässig bestimmt und damit unabhängig von kleinen Abweichungen bei der Husky-Anlieferung arbeitet. Das System soll dabei eine ausreichende Robustheit gegenüber Positionsabweichungen und leichten Verdrehungen der Palette aufweisen, um die in der Problemstellung beschriebenen Fehlgriffe zu vermeiden.

Ein weiteres Ziel ist die **direkte Anbindung der Kamera an das Roboterprogramm**. Die Kameradaten sollen unmittelbar im UR-Programm verarbeitet werden können, um den Datenfluss zu vereinfachen und die Reaktionszeit zu verkürzen. Voraussetzung hierfür ist eine sorgfältige Hand-Eye-Kalibrierung des neuen Kamerasystems mit dem Roboter, sodass eine korrekte Übertragung der Bildkoordinaten in das Roboter-Koordinatensystem gewährleistet werden kann.

Die zu entwickelnde Lösung soll eine zuverlässige Erkennung aller neun Lagerplätze unter realistischen Anlieferungsbedingungen ermöglichen und sich mit möglichst geringen Änderungen in das bestehende Hauptprogramm einbinden lassen. Die bereits vorhandene mechanische Halterung und Verkabelung sollen weiterverwendet werden. Zugleich sind die bekannten Schwächen der bisherigen 3D-Lösung – insbesondere fehlerhafte Ebenenbildung und die unnötige Verarbeitung von Tiefendaten – durch die Wahl eines geeigneten Sensors und einer angepassten Verarbeitungslogik zu vermeiden.

5.3 Umsetzung

Die nachfolgend beschriebenen Schritte zur Inbetriebnahme und Kalibrierung des Sensors mit dem Universal Robot orientieren sich an der offiziellen Anleitung „Programmierhandbuch IFM_O2D5xx_UR_Pick_Place_Program" von ifm.[16] Abweichungen von der Anleitung, die sich aus den spezifischen Randbedingungen dieses Anwendungsfalls ergeben, sind entsprechend gekennzeichnet.

5.3.1 Auswahl 2D-Sensors

Auf Grundlage der aus der Ausgangssituation abgeleiteten Anforderungen sowie der in den Studienarbeiten von Kübler und Kähm identifizierten Defizite der bisherigen 3D-Kamera wurde nach einem geeigneten Ersatzsensor gesucht.[17] Durch die Unterstützung von Sponsoren der Zukunftsfabrik am Bodensee konnte die Auswahl auf einen überschaubaren Anbieterkreis eingegrenzt werden. Als geeignetes Modell wurde der Objekterkennungssensor ifm O2D522 identifiziert (siehe Abbildung 6). Die endgültige Entscheidung erfolgte anhand einer Gegenüberstellung derjenigen technischen Daten, die im Vergleich zur bisherigen 3D-Kamera verbessert werden sollten.



Abbildung 6: O2D522-Sensor[18]

Die nachfolgende Tabelle stellt die relevanten technischen Grunddaten beider Sensoren gegenüber (siehe Tabelle 2). Aus den Vergleichsdaten wird ersichtlich, dass die zentralen technischen Merkmale so weiterentwickelt wurden, dass die formulierten Anforderungen in der Theorie vollständig abgedeckt werden können.

[16] ifm electronic gmbh, „Programmierhandbuch“.
[17] Kübler und Kähm, „Kamerabasierte Lagererkennung“; Kübler und Kähm, „Kalibrierung zwischen eines kamerabasierten System und einem Roboterarm“.
[18] ifm electronic gmbh, „O2D522-Sensor“.

Tabelle 2: Vergleich technische Daten[19]

Merkmal	Alter Sensor – ifm O3D304	Neuer Sensor – ifm O2D522
Kameratyp	3D-Sensor (Time-of-Flight, Tiefenbild)	2D-Vision-Sensor (Bildauswertung)
Auflösung	176 × 132 px	1280 × 960 px (≈ 1,2 MP)
Sichtfeld (bei 1 m)	ca. 800 × 1100 mm	ca. 604 × 453 mm
Arbeitsabstand	300 mm – 8 m	35 mm – 2,5 m
Z-Achse (Höhe)	misst Tiefe (Z-Information)	keine Höhenmessung (nur XY + φ)
Kommunikation	Ethernet TCP/IP	Ethernet TCP/IP, Profinet
Signalverhalten	liefert 3D-Punktewolke	liefert Koordinaten (x, y, φ) + Erkennungssignal
Beleuchtung	keine interne (benötigt Fremdlicht)	integrierte weiße LED mit Polfilter
Typische Toleranz	± 5–10 mm	± 1–2 mm

Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Art der Datenerfassung. Während die 3D-Kamera eine vollständige Punktwolke einschließlich Höheninformationen bereitstellt, liefert die O2D522 ausschließlich die für die Anwendung tatsächlich benötigten Messdaten – die **x- und y-Koordinaten** sowie die **Drehlage** des erkannten Objekts. Dadurch entfällt die unnötige Verarbeitung redundanter Tiefeninformationen. Die Kommunikation erfolgt weiterhin über eine **Feldbusverbindung auf Ethernet-Basis**, wodurch das bestehende Montage- und Netzwerklayout beibehalten und die vorhandene Infrastruktur weiterverwendet werden kann.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der **integrierten Beleuchtung** des neuen Sensors. Diese lässt sich in ihrer Intensität variabel einstellen und kann somit an die jeweiligen Umgebungsbedingungen angepasst werden. Damit wird eine der zentralen Schwachstellen der Vorgängerkamera – die hohe Anfälligkeit gegenüber Reflexionen – gezielt adressiert. Darüber hinaus liegt die Bildauflösung des O2D522 mit 1280 × 960 Pixeln deutlich über der des alten Sensors, was eine **schnellere und präzisere Konturerkennung** und damit eine zuverlässigere Ermittlung der Zielkoordinaten ermöglicht. Die

[19] ifm electronic gmbh, „Datenblatt O2D522“; ifm electronic gmbh, „Datenblatt O3D304“.

typische Positionstoleranz des neuen Sensors ist ebenfalls geringer, wodurch **genauere Greifaktionen** des Roboters realisiert werden können.

Durch die Kombination dieser technischen Merkmale sind die zuvor definierten Anforderungen an eine dynamische, robuste und störunempfindliche Lageerkennung in der Theorie vollständig abgedeckt.

5.3.2 Implementierung ins System

Zur Umsetzung der Maßnahme wurden die Lagerplätze vollständig neu konstruiert (siehe Abbildung 7). Anstelle einzelner Ablageflächen wurden drei identische Module entworfen, die jeweils drei Lagerplätze enthalten. Die Module sind steckbar ausgeführt und wurden auf der Ladefläche des Huskys fest positioniert und verschraubt. Durch die symmetrische und geradlinige Anordnung der Lagerplätze wird eine verbesserte Anfahrbarkeit durch den Roboter ermöglicht. Die Herstellung erfolgte im Produktionstechnischen Zentrum der DHBW mittels additiver Fertigung, wodurch eine schnelle Umsetzung der selbst erstellten Konstruktion sowie kurzfristige Anpassungen während der Entwicklungsphase möglich waren.



Abbildung 7 9 Lagerplätze



Abbildung 8 ifm Kamera

Der neue 2D-Sensor wurde an der bereits bestehenden Halterung des alten 3D-Sensors montiert (siehe Abbildung 8). Um sicherzustellen, dass das Sichtfeld die gesamte

Ladefläche des Huskys ausreichend erfasst, musste die Halterung um einige Zentimeter nach oben versetzt werden. An einem der beiden Anschlüsse der Kamera erfolgt die Datenübertragung: Über eine PROFINET-Verbindung ist der Sensor zunächst mit der SPS verbunden, welche wiederum die Verbindung zum PC am End-of-Line-Arbeitsplatz herstellt. Der zweite Anschluss dient der Stromversorgung.

Am End-of-Line-PC wurde die aktuelle Version des ifm Vision Assistant (v. 2.11.10) installiert. Nach dem Starten der Software wird über die Funktion „Gerät finden" nach dem Sensor gesucht. Damit die Verbindung überhaupt zustande kommt, müssen sich PC und Kamera im selben Subnetz und im gleichen IP-Adressbereich befinden. Diese Voraussetzung ist notwendig, da der Vision Assistant grundsätzlich alle Geräte findet, die im gleichen Subnetz und Adressbereich erreichbar sind, und ohne diese Netzwerk-Übereinstimmung keine Kommunikation möglich ist. Zusätzlich muss die SPS eingeschaltet sein, da die Verknüpfung zwischen Kamera und PC über die SPS läuft. Für die vorliegende Anwendung ist der Kameratyp „O2Dxx" auszuwählen. Konnte die Verbindung erfolgreich hergestellt werden, öffnet sich das Hauptmenü des Vision Assistants und zeigt das Live-Bild des Sensors an.

Nach dem erfolgreichen Verbindungsaufbau zwischen Kamera und PC ist im nächsten Schritt zu prüfen, ob der Sensor und der Universal Robot physikalisch miteinander vernetzt sind. Hierzu werden in den Netzwerkeinstellungen des Polyscope am Cobot die IP-Adresse und das Subnetz kontrolliert. Auch hier gilt die Voraussetzung, dass Kamera und Roboter im selben Subnetz und im gleichen IP-Adressbereich liegen müssen. Nach erfolgreicher Konfiguration können die vom Sensor bereitgestellten Daten grundsätzlich am Roboter empfangen werden. Die konkrete Überprüfung dieser Datenverbindung erfolgt im nachfolgenden Abschnitt „Datenkommunikation" mithilfe eines dedizierten Testprogramms.

5.3.3 Hand-Eye-Kalibrierung

Die Hand-Eye-Kalibrierung stellt einen der zentralen Arbeitsschritte bei der Integration eines optischen Sensors in ein Robotersystem dar. Sie sorgt dafür, dass die vom Sensor erfassten Bildkoordinaten korrekt in das Koordinatensystem des Roboters überführt werden können. Ohne eine sorgfältig durchgeführte Kalibrierung liefert die Kamera zwar Positionsdaten, diese können vom Roboter jedoch nicht in reale Anfahrpunkte übersetzt werden. Die Kalibrierung ist damit die Grundlage für jede spätere dynamische Bewegung des Roboters auf Basis der Kameradaten.

Für den Kalibrierungsassistenten des ifm Vision Assistant wird eine definierte Werkzeugspitze am Roboter benötigt, mit der die vier Markierungspunkte des Marker-Blatts präzise angefahren werden können. Da eine dedizierte Werkzeugspitze zum Zeitpunkt der Durchführung nicht verfügbar war, wurde als Notlösung ein Marker verwendet, der mittig in den Greifbacken des pneumatischen Greifers eingespannt wurde. Die Spitze des Markers dient in diesem Aufbau als Referenzpunkt für die Kalibrierung (siehe Abbildung 9).

Um die Position dieser Referenzspitze im Roboter-Koordinatensystem exakt zu definieren, wurde im Polyscope des UR-Roboters ein entsprechender Werkzeug-Mittelpunkt (TCP) für den Marker konfiguriert. Hierzu wurde ein festgelegter Eckpunkt der Lagerplätze mit der Markerspitze aus mehreren unterschiedlichen Ausrichtungen des Roboterarms angefahren (siehe Abbildung 10). Aus diesen mehrfachen Anfahrpositionen berechnet der Polyscope die Lage der Werkzeugspitze relativ zum Flansch des



Abbildung 9 Kalibrierung Spitze des Markers



Abbildung 10 Kalibrierung unterschiedliche Ausrichtung

Roboters. Damit ist sichergestellt, dass die Spitze des Markers den Mittelpunkt aller nachfolgenden Gelenkbewegungen bildet und die im Rahmen der Kalibrierung erfassten Punkte auf den tatsächlichen physischen Anfahrpositionen basieren.

Nach dem Anlegen des Marker-TCPs wurde die eigentliche Roboter-Sensor-Kalibrierung im Vision Assistant durchgeführt. Der Assistent führte dabei Schritt für Schritt durch die Kalibrierungsroutine.

Im ersten Schritt gibt der Kalibrierungsassistent auf Grundlage des gemessenen Arbeitsabstands zwischen Sensor und Arbeitsebene ein passendes Marker-Blatt vor, welches anschließend ausgedruckt und im Sichtfeld des Sensors platziert wird. Das Marker-Blatt besteht aus einem regelmäßigen Raster aus schwarzen Punkten, von denen einige zusätzlich einen kleinen weißen Punkt in ihrer Mitte aufweisen. Diese speziell markierten Punkte dienen dem Sensor als eindeutige Orientierungspunkte: Da sich das Punktemuster ansonsten symmetrisch wiederholt, könnte der Sensor Verschiebungen oder Drehungen des Marker-Blatts sonst nicht eindeutig zuordnen. Durch die weißen Innenpunkte kann der Algorithmus die Lage und Orientierung des Blatts jederzeit zweifelsfrei bestimmen. Um eine möglichst plane und gleichmäßige Aufnahme zu ermöglichen, wurde das ausgedruckte Marker-Blatt zusätzlich auf einer starren Platte aufgeklebt, sodass eine ebene Oberfläche ohne Wellen oder Verzerrungen sichergestellt war.

Bereits bei den anschließenden Bildeinstellungen zur Anpassung von Fokus und Belichtung zeigten sich die aus der Problemstellung bekannten Reflexionen erneut. Unabhängig davon, wie die interne Beleuchtung des Sensors konfiguriert wurde, ließen sich die Reflexionen nicht vollständig beseitigen. Dieses Verhalten bestätigt die Vermutung, dass die Ausleuchtung der Arbeitsebene mit einer zusätzlichen externen Beleuchtung deutlich verbessert werden könnte.

Im nächsten Schritt erfolgte die Erfassung der Roboterkoordinaten. Hierzu wurden die vier Markierungspunkte A bis D auf dem Marker-Blatt nacheinander mit der Markerspitze angefahren (siehe Abbildung 11). Die dabei ermittelten Positionswerte aus Polyscope wurden manuell in den Vision Assistant übertragen, wobei auf die unterschiedlichen Einheiten zwischen Polyscope (mm) und Vision Assistant (m) geachtet wurde.



Abbildung 11 Marker-Blatt

Bei der anschließenden Sensorkalibrierung wird das Marker-Blatt in verschiedenen Positionen und Rotationen innerhalb des Sichtfelds des Sensors aufgenommen. Laut Herstellerangabe sollte für ein gutes Kalibrierergebnis eine Qualität von mindestens 85 % erreicht werden. Trotz mehrerer Wiederholungsversuche konnte dieser Zielwert im vorliegenden Aufbau nicht erreicht werden – der maximal erzielte Wert lag bei rund 79 %. Als Hauptursachen hierfür wurden die bereits beschriebenen Reflexionen sowie ein ungünstiger Kontrast zwischen den grauen Lagerplätzen und der braunen Auflagefläche identifiziert. Beide Faktoren mindern die Kontrastauswertung des Sensors und wirken sich unmittelbar auf die Genauigkeit der Sensorkalibrierung aus.

Zur Berücksichtigung der Höhendifferenz zwischen dem Marker-Blatt und der tatsächlichen Arbeitsebene wurde im Anschluss der Z-Offset kalibriert. Da das Marker-Blatt bereits auf der Arbeitsebene (Lagerplätze) lag, war der Z-Offset zu vernachlässigen.

Im abschließenden Test-Schritt wurde die Genauigkeit der Kalibrierung anhand der aufgedruckten Längenangaben des Marker-Blatts überprüft. Dabei zeigten sich leichte Abweichungen gegenüber den Referenzwerten. Diese Abweichungen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die nicht erreichte Qualitätsschwelle bei der Sensorkalibrierung sowie auf die verwendete Marker-Ersatzspitze zurückzuführen.

5.3.4 Definition der Ankerpunkte und Bilderkennung

Nach erfolgreichem Abschluss der Hand-Eye-Kalibrierung kann die eigentliche Bilderkennung im Vision Assistant konfiguriert werden. Am Roboterarbeitsplatz sind zwei

Prozesse zu unterstützen, bei denen jeweils eine eigene Bilderkennung erforderlich ist: das Beladen des Huskys mit Bauteilen im Montageprozess und das anschließende Entladen der Palette im Demontageprozess. Im Folgenden wird zunächst der Beladem-odus beschrieben.

Um die Anzahl der zu übertragenden Positionsdaten möglichst gering zu halten und den Datenfluss zum Roboter übersichtlich zu gestalten, wurde entschieden, nicht sämtliche neun Lagerplätze einzeln über die Kamera zu erfassen, sondern lediglich zwei Eckpunkte der Auflagefläche zu erkennen. Aus diesen beiden Punkten kann der Roboter das komplette 3×3-Muster mathematisch rekonstruieren und die dazugehörigen Greifpunkte selbstständig berechnen. Als Referenzpunkte wurden die Ecken oben links und unten rechts der Auflagefläche gewählt (siehe Abbildung 12). Diese diagonale Anordnung stellt sicher, dass sowohl die Position als auch die Drehlage der Palette eindeutig bestimmt werden können.



Abbildung 12 Referenzpunkte

Zur Erkennung dieser beiden Eckpunkte wurden im Vision Assistant zwei separate Modelle angelegt – jeweils eines für die obere linke und für die untere rechte Ecke. Bei der Konfiguration dieser Modelle wurde das Team durch einen Servicemitarbeiter der Firma ifm unterstützt, der Erfahrung mit der O2D5xx-Baureihe und der zugehörigen Bildverarbeitungslogik einbringen konnte. In der Modellbearbeitung wurde für jede der

beiden Ecken eine Region of Interest (ROI) definiert, in der das jeweilige Kontur-Modell gesucht wird. Innerhalb dieser ROI wurden die Kanten und markanten Konturen der Eckstruktur eingelernt, sodass der Sensor die Eckpunkte drehlageunabhängig wiedererkennen kann. Zusätzlich wurden die Schwellwerte für die Modellerkennung so angepasst, dass eine zuverlässige Erkennung trotz der vorhandenen Reflexionen und Kontrastunterschiede erreicht werden konnte. Diese Modellkonfiguration sieht man bei Abbildung 13 in den zwei ROI-Bereichen.

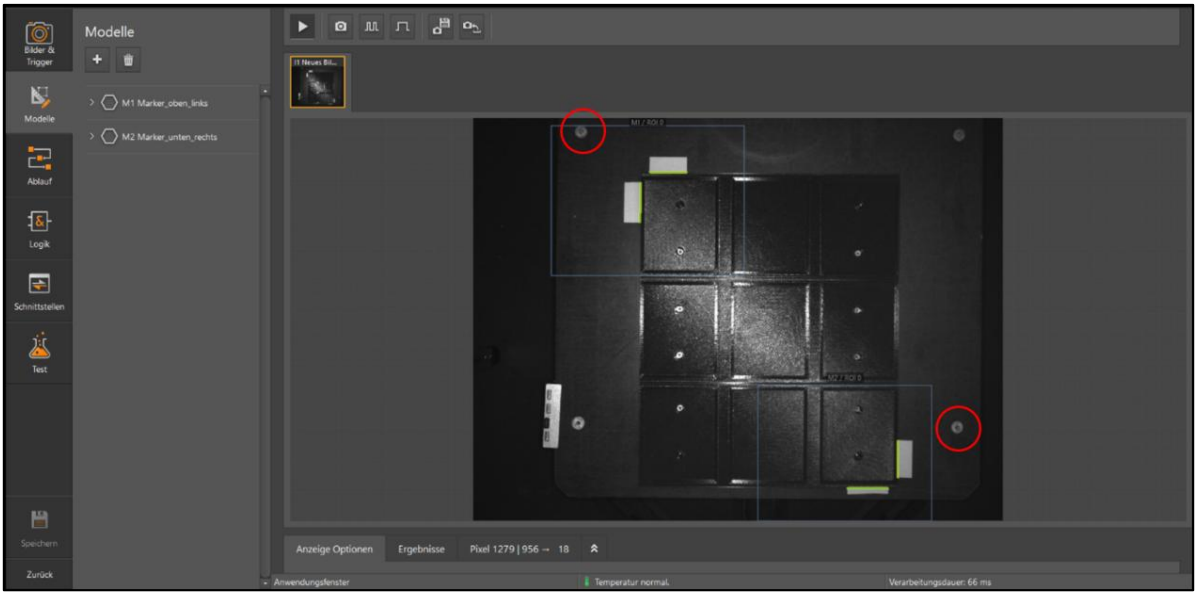


Abbildung 13 Referenzierung Ankerpunkte Assistant

Für den Entladevorgang gestaltet sich die Bilderkennung geringfügig komplexer. Da beim Entladen die Bauteile bereits entnommen wurden und die zuvor genutzten Merkmale des Belademodus nicht mehr verfügbar sind, mussten alternative Referenzpunkte gefunden werden. Als geeignete Merkmale konnten die Befestigungsschrauben auf der Auflagefläche identifiziert werden, welche in Abbildung 13 rot markiert sind. Diese Schrauben sind fester Bestandteil der Konstruktion, in ihrer Position eindeutig und liegen an klar definierten Stellen der Auflagefläche. Analog zum Belademodus wurden auch hier zwei diagonal gegenüberliegende Ankerpunkte bestimmt, die im Vision Assistant als Modelle eingelernt und für die Positionsbestimmung der Lagerplätze verwendet werden.

Für beide Anwendungen lässt sich das Ergebnis der Bilderkennung im Reiter „Schnittstellen" des Vision Assistant nachvollziehen. Dort wird die tatsächlich ausgegebene Zeichenkette angezeigt, die vom Sensor an den Roboter übermittelt wird (siehe Abbildung 14).

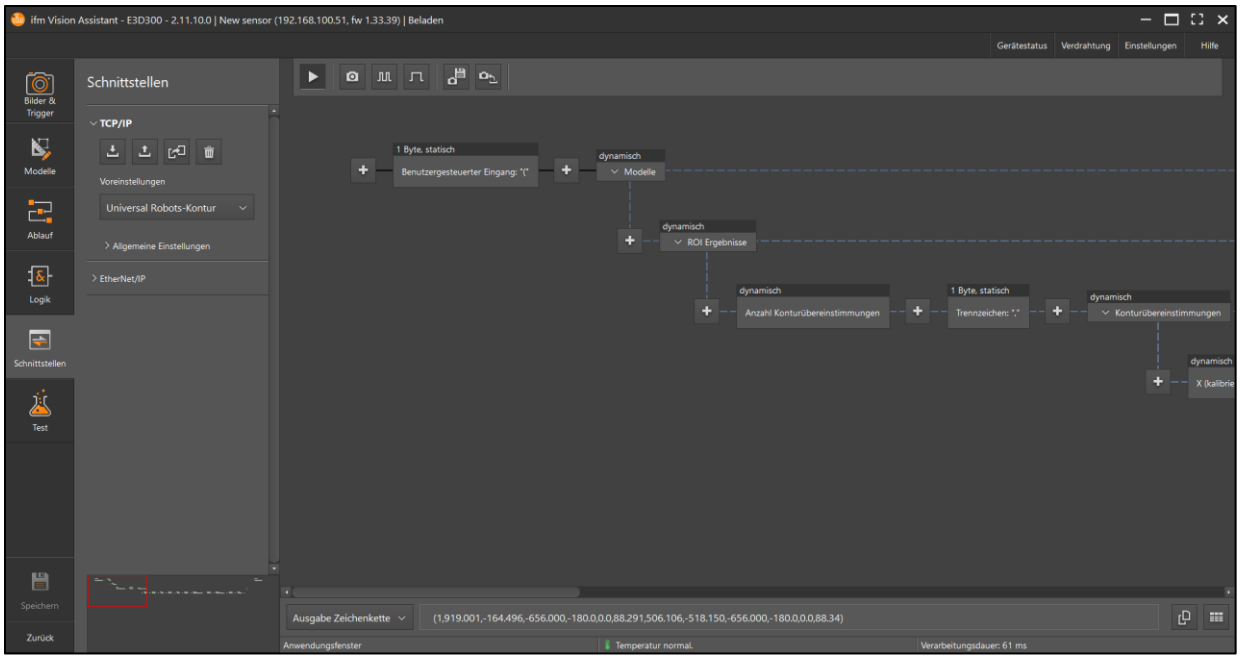


Abbildung 14 Zeichenkette

Ein konkretes Beispiel einer solchen Ausgabe ist:

(1, 919.001, -164.496, -656.000, -180.0, 0.0, 88.291, 506.106, -518.150, -656.000, -180.0, 0.0, 88.34)

Die Zeichenkette enthält insgesamt 13 Werte. An erster Stelle steht ein Flag, das den Erfolg der Erkennung angibt – der Wert 1 signalisiert die erfolgreiche Erkennung beider Ankerpunkte. Anschließend folgen für jeden der beiden Ankerpunkte jeweils sechs Werte in Form einer vollständigen Pose. Diese Pose setzt sich zusammen aus den translatorischen Werten X, Y und Z sowie den rotatorischen Werten Rx, Ry und Rz. Die X- und Y-Werte beschreiben die Position des jeweiligen Ankerpunkts in der Ebene, während der Z-Wert die vom Sensor ermittelte Höhe relativ zum Roboter-Koordinatensystem angibt. Bei der vorliegenden Anwendung liegt Z konstant bei -656 mm, da alle Ankerpunkte auf derselben, während der Kalibrierung definierten Arbeitsebene liegen. Die rotatorischen Werte Rx und Ry bleiben ebenfalls konstant bei -180° beziehungsweise 0°, was der senkrechten Ausrichtung des Greifers zur Arbeitsfläche entspricht. Lediglich der Rz-Wert variiert und beschreibt die tatsächliche Drehlage des jeweiligen Ankerpunkts – im gezeigten Beispiel etwa 88,29° für den ersten und 88,34° für den zweiten Ankerpunkt, was auf eine nahezu identische Ausrichtung beider Ecken schließen lässt.

Die Übertragung dieser Zeichenkette vom Sensor an den Roboter erfolgt über das PCIC-Protokoll (Process Interface Communication). PCIC ist eine von ifm entwickelte

Schnittstelle, die die Ausgabe von Messergebnissen, Pixelinformationen oder Logik-Ergebnissen über eine TCP/IP-Socket-Verbindung steuert. Sie ermöglicht eine strukturierte und maschinenlesbare Übermittlung der Sensordaten an übergeordnete Systeme wie den UR-Roboter und bildet damit die technische Grundlage für die spätere Verarbeitung der Positionsdaten im Roboterprogramm.

5.3.5 Datenkommunikation

Nach erfolgreicher Konfiguration der Bilderkennung im Vision Assistant ist im nächsten Schritt sicherzustellen, dass die vom Sensor bereitgestellten Positionsdaten den Roboter tatsächlich erreichen. Die Übertragung erfolgt über das PCIC-Protokoll auf Port 50010 als klassische TCP/IP-Socket-Verbindung. Bevor die Daten im UR-Programm verarbeitet werden können, ist die grundsätzliche Datenübertragung zunächst getrennt vom Roboter zu verifizieren, um eine mögliche Fehlerquelle im späteren URScript ausschließen zu können.

Als Werkzeug für diese Verifikation kommt das Programm PuTTY zum Einsatz. PuTTY ist ein frei verfügbares Netzwerktool, das unter anderem eine Rohdatenverbindung (Raw-Modus) zu beliebigen TCP-Sockets aufbauen kann. Damit lässt sich die vom Sensor ausgegebene Zeichenkette direkt auf dem PC anzeigen, ohne dass ein weiteres System dazwischengeschaltet werden muss. Für die Konfiguration wird in der PuTTY-Oberfläche die IP-Adresse des Sensors – im vorliegenden Aufbau 192.168.0.69 – eingetragen sowie der Port 50010, über den das PCIC-Protokoll bereitgestellt wird. Als Verbindungstyp ist der Modus „Raw" auszuwählen (siehe Abbildung 15).

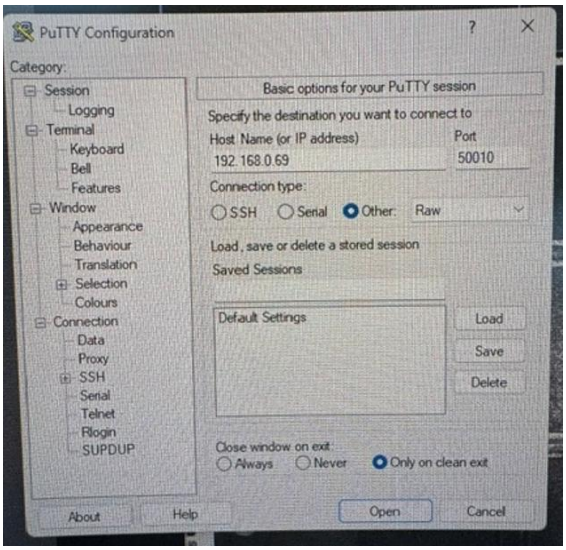


Abbildung 15 PuTTY Konfiguration

Nach dem Aufbau der Verbindung öffnet PuTTY ein Terminalfenster, in dem zunächst keine Daten angezeigt werden. Der Sensor sendet Ergebnisse nicht kontinuierlich, sondern erst nach einem entsprechenden Trigger. Um diese Funktion zu gewährleisten, wird während der Ausführung des PuTTYs im Assistant der Test ausgewählt, welcher kontinuierlich ein Signal abgibt (siehe Abbildung 16). Dadurch konnte eine Ausgabe der PCIC-Protokolle auf der Netzwerkverbindung gewährleistet werden. Damit ist der Nachweis erbracht, dass die physikalische Verbindung, die Netzwerkkonfiguration und die PCIC-Ausgabe im Vision Assistant korrekt eingerichtet sind und der Sensor die Ergebnisdaten bereitstellt.

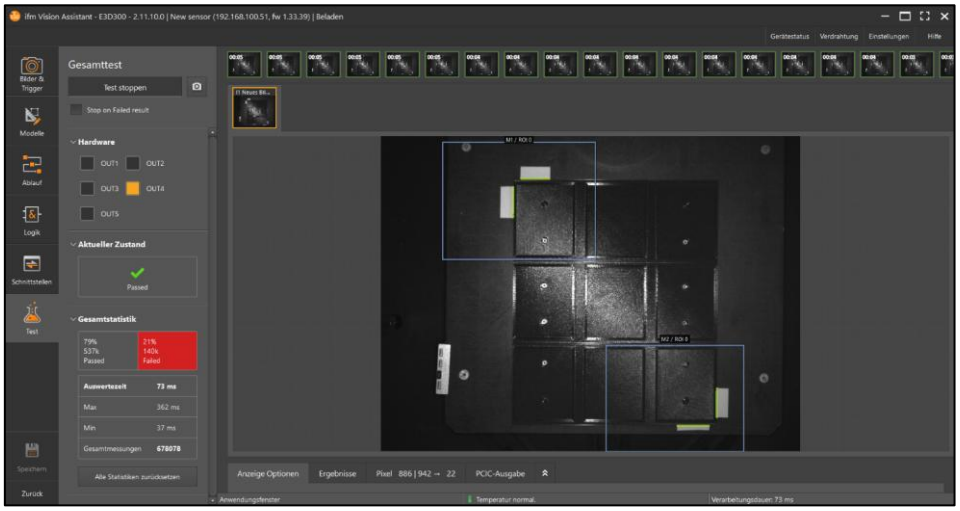


Abbildung 16 Testlauf Vision Assistant

Im Anschluss an diese Grundverifikation kann die Anbindung an den Universal Robot erfolgen. Hierzu wird im Polyscope-Programm ein fortgeschrittener Skript-Block erstellt, dessen Aufgabe es ist, die vom Sensor gesendeten Daten zu empfangen und in Roboter-Variablen abzulegen. Das Skript baut zunächst eine Socket-Verbindung zum Sensor auf, liest anschließend die vom Sensor bereitgestellten 13 Fließkommawerte ein und schließt die Verbindung wieder, sobald die Daten übertragen wurden. Die empfangenen Werte entsprechen genau jener Zeichenkette, die zuvor im PuTTY-Test überprüft wurde – bestehend aus einem Erkennungs-Flag und den zwei Ankerpunkten mit jeweils sechs Werten.

Als Ergebnis dieses Skript-Blocks stehen die beiden erkannten Ankerpunkte im Polyscope als vollständige Pose-Variablen zur Verfügung: Ecke_OL für die obere linke Ecke und Ecke_UR für die untere rechte Ecke der Auflagefläche. Diese beiden Variablen bilden die Grundlage für die im nachfolgenden Abschnitt „Roboterprogrammierung" beschriebene Berechnung der neun Greifpunkte.

5.3.6 Roboterprogrammierung

Zur Umsetzung des Ablaufs im Polyscope wurde zunächst analysiert, welche Schritte der Roboter durchlaufen muss, um von den Kameradaten bis zum tatsächlichen Anfahren eines Greifpunkts zu gelangen. Aus dieser Analyse ergibt sich die in Abbildung 17 dargestellte Programmierungskette. Der geplante Programmablauf beginnt in einer definierten Bereitschaftsposition, in der der Roboter auf ein Startsignal der übergeordneten Steuerung wartet. Trifft dieses Signal ein, triggert der Roboter die Kamera und empfängt anschließend die vom Sensor bereitgestellten Positionsdaten. Diese werden als Ankerpunkte in den vorgesehenen Variablen abgelegt, aus denen im nächsten Schritt die neun Greifpositionen berechnet werden. Auf Basis dieser Berechnung wird der eigentliche Pick-and-Place-Vorgang ausgeführt, bei dem der Roboter die neun Lagerplätze nacheinander anfährt, das jeweilige Bauteil greift und an der Zielposition wieder ablegt. Nach Abschluss aller Zyklen kehrt der Roboter in die Bereitschaftsposition zurück und wartet auf das nächste Startsignal.

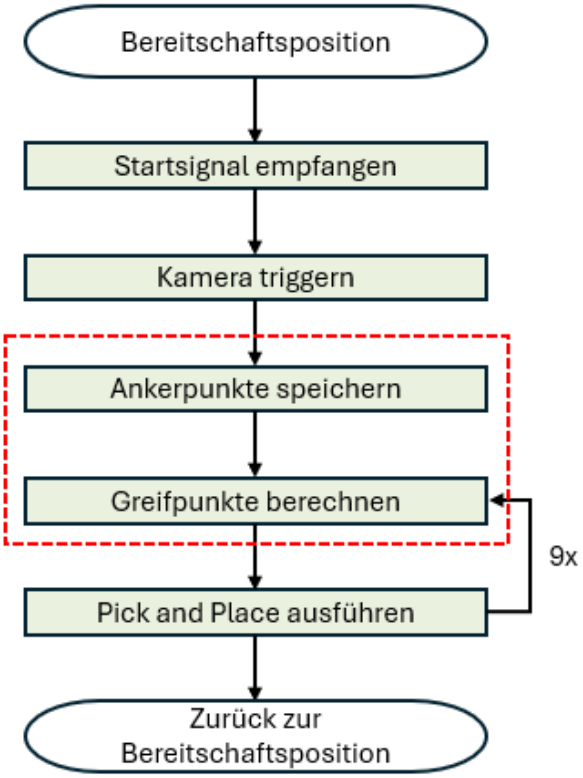


Abbildung 17 Programmablauf Lageerkennung Husky

Da dieser Gesamtablauf im Rahmen des vorliegenden Praktikums nicht vollständig umgesetzt werden konnte, wurde eine bewusste Priorisierung vorgenommen. Im Fokus der Bearbeitung standen die beiden Teilschritte, die in Abbildung 17 durch den rot

gestrichelten Rahmen hervorgehoben sind: das Speichern der Ankerpunkte und die anschließende Berechnung der neun Greifpunkte. Diese beiden Schritte bilden das inhaltliche Kernstück der neuen Lageerkennung, da ohne eine zuverlässige Übernahme der Kameradaten und eine korrekte geometrische Berechnung der Zielkoordinaten alle nachfolgenden Schritte des Pick-and-Place-Zyklus wirkungslos wären. Aus diesem Grund wurde entschieden, zunächst die Funktionsfähigkeit dieses Kernbereichs abzusichern, bevor die Umsetzung der weiteren Schritte in Angriff genommen wird.

Zur Realisierung dieses Kernbereichs wurde als erstes eine geeignete Variablen-Architektur im Polyscope definiert. In der Installation wurden dazu die Pose-Variablen Ecke_OL und Ecke_UR für die von der Kamera erkannten Ankerpunkte angelegt, ergänzt um die berechneten Ecken Ecke_OR und Ecke_UL. Für die Greifebene wurde eine Variable z_greif eingerichtet, welche die konstante Z-Höhe der Bauteile enthält. Die letztlich anzufahrenden neun Greifpositionen werden in den Variablen Greif_1 bis Greif_9 gespeichert, wobei die Nummerierung dem Muster des 3×3-Rasters folgt.

Auf Grundlage dieser Variablen-Architektur wurde ein erstes Skript entwickelt. Das Skript nimmt die von der Kamera gelieferten Ankerpunkte als Grundlage und errechnet daraus zunächst die beiden fehlenden Ecken der Auflagefläche. Aus den vier Ecken werden anschließend die neun einzelnen Greifpositionen ermittelt und in den zugehörigen Variablen abgelegt. Da die Berechnung immer auf den aktuellen Kameradaten basiert, werden Verschiebungen oder leichte Verdrehungen der Palette automatisch berücksichtigt. Der vollständige Code des Skripts ist in Anhang 1 hinterlegt.

Nachdem die Berechnung erfolgreich durchgeführt wurde und die Variablen Greif_1 bis Greif_9 plausible Positionswerte enthielten, wurde in einem zweiten Schritt ein weiteres Skript entwickelt. Ziel dieses Skripts war es, den Roboter kontrolliert auf den mittleren Greifpunkt (Greif_5) fahren zu lassen und damit zu prüfen, ob die berechneten Positionen tatsächlich mit den realen Positionen auf der Auflagefläche übereinstimmen. Die Wahl fiel bewusst auf den Mittelpunkt der Palette, da dieser den größten Abstand zu den Rändern und damit das geringste Kollisionsrisiko beim ersten Testlauf aufweist. Zur weiteren Absicherung wurde das Skript mit einer Sicherheitshöhe von 10 cm über der eigentlichen Greifebene programmiert. Zusätzlich wurden Sicherheitsabfragen eingebaut, die die Bewegung erst nach ausdrücklicher Bestätigung starten. Der vollständige Code des Bewegungstest-Skripts befindet sich in Anhang 1.

Bei der Durchführung des Bewegungstests zeigte sich jedoch ein unerwartetes Verhalten: Anstatt in der Sicherheitshöhe über der Palettenmitte anzuhalten, fuhr der Greifer bis auf die Auflagefläche herunter. Die Ursache konnte im Rahmen dieser Arbeit trotz mehrerer Überprüfungen nicht abschließend geklärt werden. Ausgeschlossen werden konnte, dass die Berechnung der Greifpunkte oder die Auswahl des aktiven TCPs ursächlich für das Fehlverhalten waren. Da die Fortsetzung der Tests ohne Verständnis der Fehlerursache ein Sicherheits- und Kollisionsrisiko dargestellt hätte, wurde der Bewegungstest an dieser Stelle beendet. Eine detaillierte Bewertung dieses Befunds sowie Empfehlungen für die weitere Untersuchung erfolgen in Kapitel 5.4.

Im Zuge der Programmierung wurde deutlich, dass sich die vorliegende Anwendung nicht ausschließlich mit den grafischen Basis-Befehlen des Polyscope umsetzen lässt. Zu Beginn des Projekts war die Erwartung, dass die reine Nutzung von Basis-Befehlen ausreichen würde, um die Kameradaten zu verarbeiten und die neun Greifpunkte anzufahren. Die tatsächliche Umsetzung erforderte jedoch die Verwendung von URScript, da sowohl die mathematische Berechnung der Greifpunkte als auch die kontrollierte Bewegungsausführung über die grafischen Basis-Befehle nicht abbildbar sind. Dies führte zu einem deutlich höheren Programmieraufwand als ursprünglich eingeplant und erforderte eine tiefere Einarbeitung in die textbasierte Programmierung des Universal Robots.

5.4 Ergebnis & Bewertung

5.4.1 Erreichte Ergebnisse

Im Rahmen der Bearbeitung konnten mehrere wesentliche Ergebnisse erzielt werden, die die Grundlage für die weitere Entwicklung der kamerabasierten Lageerkennung bilden. Auf der Hardware-Seite wurde ein geeigneter 2D-Sensor beschafft und ohne größere Anpassungen in das bestehende System integriert. Die vorhandene Halterung sowie die Verkabelung der Vorgängerkamera konnten weiterverwendet werden, wodurch der Installationsaufwand deutlich reduziert wurde.

Durch die neue Auslegung der Lagerplätze konnte die Anzahl der Ablagepositionen von sechs auf neun erhöht werden. Die Losgröße der Anlage ist somit nicht mehr durch die ursprüngliche Lagerplatzanordnung limitiert.

Die symmetrische Gestaltung der Module verbessert die Wiederholgenauigkeit bei der Roboteransteuerung und reduziert potenzielle Greif- und Positionierungsfehler. Insgesamt trägt die Maßnahme zu einer erhöhten Prozessstabilität der Anlage bei.

Auf der Software-Seite ist die gesamte Kamera-Pipeline vollständig funktionsfähig. Dies umfasst die zuverlässige Erkennung der beiden Ankerpunkte durch den Sensor, die Übertragung der Positionsdaten über das PCIC-Protokoll und die Verarbeitung der empfangenen Daten im URScript des Roboterprogramms. Darüber hinaus wurde die Hand-Eye-Kalibrierung zwischen Sensor und Roboter erfolgreich durchgeführt und verifiziert. Auch die geometrische Berechnung der neun Greifpunkte auf Basis der zwei Ankerpunkte konnte sowohl mathematisch als auch anhand konkreter Positionswerte bestätigt werden – die berechneten Mittelpunkte und Schrittweiten stimmen mit den erwarteten Werten überein.

5.4.2 Bewertung gegenüber der Zieldefinition

Die zu Beginn definierten Ziele wurden im Verlauf der Bearbeitung nur teilweise erreicht. Zusammenfassend ergibt sich folgendes Bild:

Erreichte Ziele:

- Dynamische Erkennung der Eckpunkte durch die Kamera
- Korrekte mathematische Berechnung aller neun Greifpunkte

Nicht erreichte Ziele:

- Korrektes Anfahren der berechneten Greifpunkte durch den Roboter
- Umsetzung von Greifen und Ablegen der Bauteile
- Integration der neuen Lageerkennung in das bestehende Hauptprogramm

Die erreichten Ziele bilden das Fundament für die weiteren Schritte, da ohne eine zuverlässige Erkennung und Berechnung keine sinnvolle Bewegungssteuerung möglich wäre. Die nicht erreichten Ziele betreffen den Übergang von der berechneten Position in die tatsächliche Roboterbewegung. Ursächlich hierfür ist das in Kapitel 5.3.6 beschriebene Fehlverhalten beim Bewegungstest, das trotz mehrerer Untersuchungsansätze nicht abschließend geklärt werden konnte. Solange die Ursache nicht bekannt ist, wäre eine Umsetzung von Greifen, Ablegen und Hauptprogramm-Integration aus Sicherheitsgründen nicht vertretbar.

5.4.3 Alternative Lösung als Rückfallebene

Um trotz der genannten Einschränkungen den grundsätzlichen Betrieb des Roboterarbeitsplatzes sicherzustellen, wurde parallel zur kamerabasierten Lösung eine Rückfallebene mit fest hinterlegten Koordinaten entwickelt. Diese Alternative baut auf dem bestehenden Programm *9_Lagerpleatze_Hauptprogramm* auf, welches mit einem festen 3×3-Grid-Pattern und eingelernten Corneritems arbeitet. In der Übergangslösung werden die Koordinaten der neun Lagerplätze fest im Programm hinterlegt und ohne Rückgriff auf die Kamera angefahren.

Diese Variante ist funktionsfähig, solange der Husky immer exakt an derselben Stelle zum Halten kommt, und sichert damit die grundlegende Handhabungsfunktion des Roboters auch ohne dynamische Erkennung. Sie ist damit als Zwischenlösung geeignet, ersetzt jedoch nicht die im Zielbild angestrebte, robuste kamerabasierte Erkennung, da sie weder Positionsabweichungen noch Verdrehungen der Palette kompensieren kann.

5.4.4 Grenzen der Lösung

Die entwickelte Lösung stößt in ihrem aktuellen Umsetzungsstand an mehrere Grenzen. Die zentrale Einschränkung besteht darin, dass die Validierung des tatsächlichen Anfahrens der berechneten Greifpunkte noch aussteht. Ohne diesen Nachweis kann die kamerabasierte Lageerkennung nicht produktiv genutzt werden, sodass der Roboterarbeitsplatz aktuell weiterhin auf die Rückfallebene mit fest hinterlegten Koordinaten angewiesen ist. Darüber hinaus konnte die Robustheit des Systems gegenüber größeren Verdrehungen der Palette bislang nicht getestet werden, da hierfür zunächst die grundsätzliche Bewegungsfähigkeit auf die berechneten Punkte sichergestellt sein muss.

Zusätzlich zeigten sich bereits während der Kalibrierung und der ersten Testläufe systemimmanente Störfaktoren an der Anlage selbst. Insbesondere die Reflexionen auf der Auflagefläche und den Bauteilen sowie der geringe Kontrast zwischen den grauen Lagerplätzen und der braunen Auflagefläche wirken sich negativ auf die Erkennungsqualität des Sensors aus. Diese Faktoren konnten im Rahmen der Arbeit weder vollständig kompensiert noch baulich verändert werden und stellen damit eine anlagenseitige Grenze dar, die auch mit der optimierten Sensorik nicht vollständig beseitigt werden kann.

6. Bin-Picking

6.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt, wurde das Bin-Picking auf Basis der Zeitaufnahmen als Engpass des Montageprozesses identifiziert. Um eine geeignete Optimierungsstrategie ableiten zu können, muss die Station im Folgenden hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise ganzheitlich betrachtet werden. Die Station befindet sich zwischen dem Belt Feeding und dem Handmontageprozess. Ihre Aufgabe besteht darin, je nach Produktvariante keine, eine oder zwei Metall-Bins in den Werkstückträger einzulegen. Als Robotersystem kommt ein UR3e des Herstellers Universal Robots zum Einsatz[20], welcher über das System Mikado Control angesteuert wird[21]. Zur Erfassung der Bin-Positionen wird eine Kamera der Firma Optonic verwendet.[22]

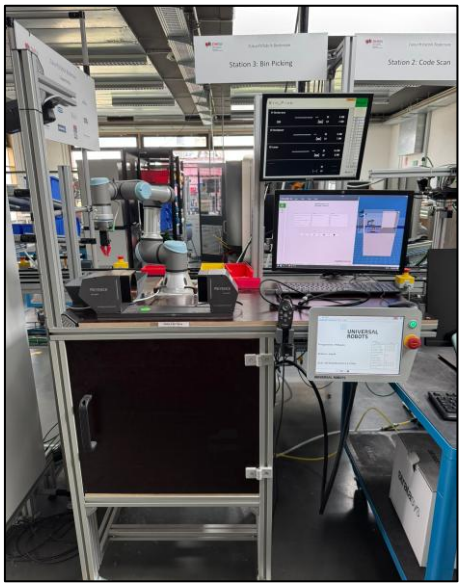


Abbildung 18 Bin-Picking Station

In der Abbildung 18 sieht man die komplette Station des Bin-Pickings. Der Roboter sowie die Kamera und das Steuerungssystem sind auf dem Wagen fest montiert. Zusätzlich befindet sich unter der Kamera und neben dem Roboter eine Schale, welche die Bins beinhaltet. Vor dieser Schale befindet sich ein 2D-Mikrometer des Herstellers Keyence, welche derzeitig jedoch nicht in der Produktion eingebunden ist. Die Anlage

[20] „Kollaborative Roboterautomatisierung | Universal Robots Cobots“.
[21] „Mikado Control“.
[22] „Ensenso N40, N41, N45, N46“.

steht direkt an dem Förderband, welches die zu bearbeitenden Teile transportiert. Sobald sich ein Träger in der Aufnahme des Förderbands befindet, wird der Bin-Picking-Prozess gestartet. Der Roboter verfährt zunächst in eine definierte Aufnahmeposition, um der Kamera eine uneingeschränkte Sicht auf das Bauteil zu ermöglichen. In dieser Position wird eine Punktewolke erfasst und ausgewertet, anhand derer die im Behälter befindlichen Bins erkannt werden.

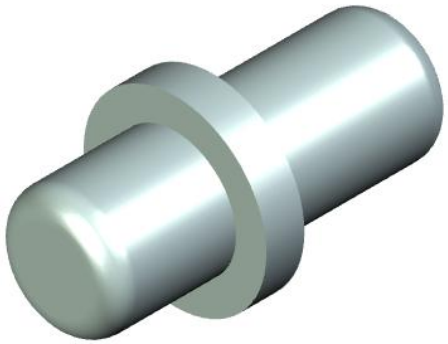


Abbildung 19 Produkt: Bin

Die Abbildung 19 zeigt die für die Produktion benötigten Bins. Diese sind Zylinderförmig und haben einen Steg, welcher das Bauteil in einen langen und kurzen Bereich unterteilt.

Nach erfolgreicher Identifikation greift der Roboter einen Bin und verfährt anschließend zu einer der vorgesehenen Setzpositionen. Abhängig von der gewählten Betriebsvariante werden die Bins entweder nicht abgelegt, ausschließlich an der linken Setzposition, ausschließlich an der rechten Setzposition oder an beiden Setzpositionen abgelegt. Sobald die vorgegebene Anzahl an Bins abgelegt wurde, wird der Werkstückträger zur Weiterförderung freigegeben. Im letzten Prozessschritt greift der Roboter unmittelbar nach dem Ablegen des final benötigten Bins einen weiteren Bin, um bei Ankunft eines neuen Werkstückträgers ohne Zeitverzug mit dem nächsten Bestückungsvorgang beginnen zu können.

Um nun die Ursachen der zu langen Zykluszeit des Bin-Pickings herauszufinden, werden mehrere Produktionsdurchläufe gestartet. Während des Durchlaufs werden Auffälligkeiten notiert und Zeiten gemessen.

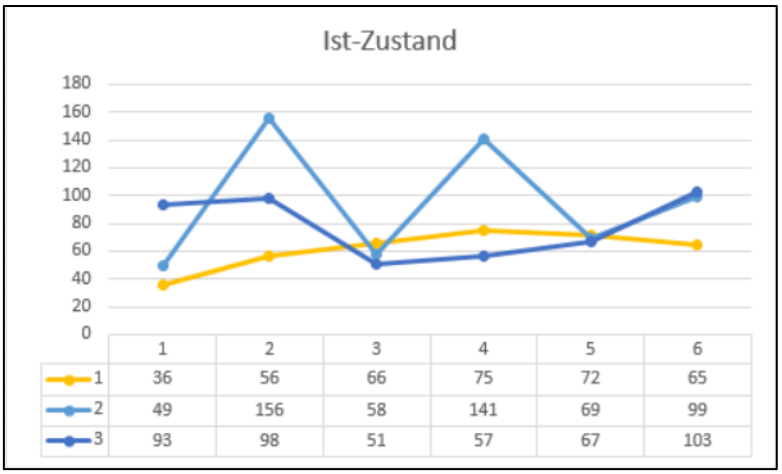


Abbildung 20 Zeitmessung Ist-Zustand Bin-Picking

Als Vergleich und Referenzwert werde die Zeiten in der Abbildung 20 dargestellt. Man erkennt einen schwankenden Verlauf, welcher sich durch alle Durchläufe hindurch zieht. Nicht nur die inkonstanten Prozesszeiten sind auffällig geworden, sondern auch Fehler und Ungenauigkeiten im Bearbeitungsprozess. Der zeit intensivste Fehler sind die Suchzeiten. Die Grifferkennung des Mikado-Programms kann hier keine greifbaren Bins erkennen. Im Programm ist eine Funktion zum Umrühren in der Schale vorhanden. Dieses bewegt den Greifer durch die Schale und nimmt anschließend eine erneute Punktewolke auf. Auch wenn dieser Schritt eine gute Absicherung für das System darstellt, nimmt er viel Zeit in Anspruch. Durch beheben dieses Fehlers könnten die derzeitigen Schwankungen verringert werden.

Ein weiteres Problem ist das falsche einlegen des Bins. Darunter fallen zwei verschiedene Auffälligkeiten. Teilweise werden die Bins falschherum in den Werkstückträger eingelegt. Dies passiert, wenn der Greifer die Bins an der kurzen statt der langen Seite greift. Dieser Fehler führt zu der zweiten Auffälligkeit, dort werden die Bins nicht richtig in den Werkstückträger eingelegt, das passiert, wenn der Greifer die Bins an der falschen Seite greift, dadurch hält der Roboter den Bin zu weit über dem Werkstückträger, dabei ist es Zufall ob dieser dann in das Loch fällt oder nicht.

Durch die durchgeführte Prozessaufnahme wurde festgestellt, dass die Station Bin-Picking der Engpass der Produktion ist. Das bedeutet das die restlichen Stationen warten müssen bis die Station Bin-Picking den Bearbeitungsvorgang abgeschlossen hat.

6.2 Zieldefinition

Das Ziel der Optimierung bestand darin, die Zykluszeit des Bin-Pickings zu reduzieren und die starken Schwankungen der Bearbeitungszeiten, die im Ausgangszustand beobachtet wurden, zu minimieren. Da das Bin-Picking als Engpass der Anlage identifiziert wurde (vgl. Abschnitt 2.3), sollte sich diese Verbesserung unmittelbar auf die Gesamtleistung der Montageanlage auswirken und zur Erreichung des übergeordneten Ziels von 50 Bauteilen pro Stunde bei drei Produktvarianten beitragen.

Neben der reinen Zeitersparnis wurden vor allem eine höhere Prozesssicherheit sowie eine gleichmäßigere Taktung der nachfolgenden Prozessschritte erwartet. Als messbare Zielgröße diente die durchschnittliche Bin-Picking-Zykluszeit der Produktvariante 4 (Ausgangswert: 80 s, vgl. Abschnitt 2.3).

6.3 Ursachenanalyse

Zur systematischen Einordnung der identifizierten Fehlerursachen wurde die Analyse in Anlehnung an das Ishikawa-Prinzip strukturiert, welches mögliche Einflussgrößen eines Problems den fünf Kategorien Mensch, Maschine, Methode, Material und Mitwelt zuordnet. Da es sich beim Bin-Picking um einen vollautomatisierten Prozessschritt handelt, entfällt die Kategorie Mensch als unmittelbarer Einflussfaktor. Die Untersuchung konzentrierte sich entsprechend auf die verbleibenden vier Kategorien.

6.3.1 Mitwelt und Maschine

Als möglicher Einflussfaktor wurden zunächst die Umgebungsbedingungen betrachtet, insbesondere Lichtreflexionen im Bereich der Schale, welche die kamerabasierte Erfassung der Punktwolke stören könnten. Hierzu wurden die Belichtungseinstellungen der Kamera systematisch überprüft. Im Ergebnis konnte dieser Einflussfaktor jedoch ausgeschlossen werden, da eine Anpassung der Belichtung zu keiner nennenswerten Verbesserung der Erkennung führte. Die Ursache der Erkennungsfehler war folglich nicht primär in den Umgebungsbedingungen oder der Kamera-Hardware, sondern in der Auswertelogik der Software zu suchen.

6.3.2 Material

Als Einflussfaktor im Bereich Material wurde die Geometrie der Bins betrachtet. Da sich die lange und kurze Seite der zylinderförmigen Bauteile nur gering unterscheiden, kann bereits die Bauteilgestalt eine eindeutige Unterscheidung der Seiten erschweren und somit zur Fehlorientierung bei der Objekterkennung beitragen.

6.3.3 Methode

Der überwiegende Teil der identifizierten Fehlerursachen ließ sich der Kategorie Methode zuordnen, das heißt der Auswerte- und Berechnungslogik des Mikado-Programms. Innerhalb dieser Kategorie wurden drei unterschiedliche Fehlerbilder identifiziert, welche jeweils einem anderen Teilschritt der Bildverarbeitungs- und Greifplanungs-Pipeline zuzuordnen sind:

Nicht erkannte Bins

Beim Abgleich der ausgewerteten Punktwolke mit dem realen Inhalt der Schale zeigte sich, dass ein Teil der physisch vorhandenen Bins von der Software nicht erfasst wurde. Wie in der Abbildung 21 zu sehen, erfasst die Punktewolke gewisse punkte welche ein Bauteil darstellen können. Da trotzdem die Konturen nicht klar von dem System erkannt werden können, kann der Bin nicht richtig berechnet und eingesetzt werden.

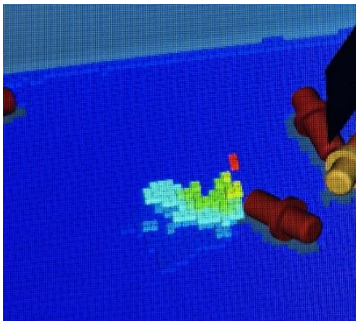


Abbildung 21 Unerkannte Bins

Fälschlich als nicht greifbar bewertete Bins

Über die Griffvisualisierung des Mikado-Programms, welche berechnete Griffpositionen farblich als greifbar (grün) oder kollisionsbehaftet (rot) kennzeichnet, wurde festgestellt, dass ein Teil der tatsächlich greifbaren Bins fälschlich als rot bewertet wurde. Eine visuelle Kontrolle bestätigte, dass an den betroffenen Positionen kein reales Hindernis vorlag. Die Ursache liegt somit in einer zu konservativ ausgelegten Kollisionsprüfung der Software, welche potenzielle Griffe unnötig ausschloss und dadurch

wiederholte Umrühr- und Neuaufnahmevorgänge auslöste. Wie in der Abbildung 22 deutlich sichtbar, ist die berechnung der Griffe zum Teil nicht zufriedenstellend. Es werden Griffe berechnet, welche nicht in die betrachtung einbezogen werden sollten.

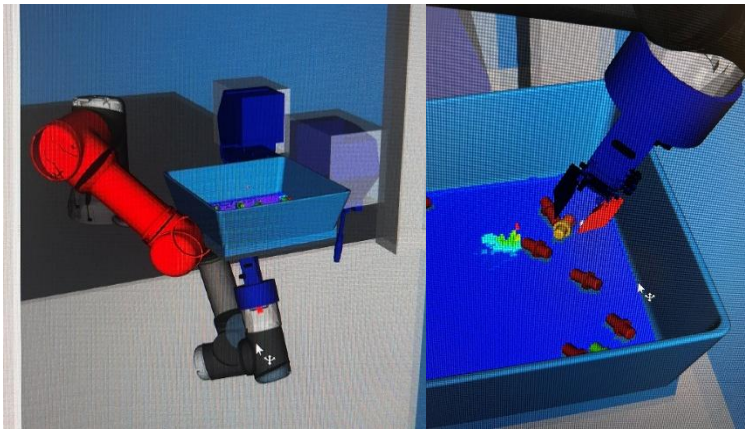


Abbildung 22 Schlechte Griffsuche

Vertauschung von langer und kurzer Seite

Bei direkter Beobachtung des Greifvorgangs zeigte sich, dass der Roboter vereinzelt an der kurzen statt der langen Seite griff. Da die Orientierung der Bins ausschließlich über die Auswertung der Punktwolke bestimmt wird, ist die Ursache in einer unzureichenden Unterscheidung der beiden Seiten innerhalb der Objekterkennung zu verorten – begünstigt durch die unter Material beschriebene geometrische Ähnlichkeit beider Seiten.

6.3.4 Zusammenfassung

Die Ursachenanalyse zeigt, dass die identifizierten Fehlerbilder nicht auf äußere Einflussfaktoren wie Beleuchtung zurückzuführen sind, sondern überwiegend in der Auswerte- und Berechnungslogik der eingesetzten Software begründet liegen, unterstützt durch geometrische Eigenschaften des Bauteils selbst. Diese Erkenntnis bildet die Grundlage für die im folgenden Abschnitt beschriebenen Optimierungsmaßnahmen, welche gezielt an der Software (Erkennungsparameter, Suchalgorithmen) sowie an der Handhabung des Bauteils (Greifpositionen, Greifergeometrie) ansetzen.

6.4 Optimierungsmaßnahmen

Auf Grundlage der in Abschnitt 6.3 identifizierten Ursachen wurden mehrere Maßnahmen entwickelt und umgesetzt, die gezielt an den betroffenen Ursachenkategorien ansetzen. Da die Maßnahmen in enger zeitlicher Abfolge realisiert wurden, werden sie im Folgenden thematisch geordnet dargestellt.

Anpassung der Greifpositionen

Ein erster Ansatzpunkt war die Anpassung der im Mikado-Programm hinterlegten Griffpositionen. Ziel war es, ein konstanteres Greifen an der langen Seite der Bins zu erreichen, um die Seitenvertauschung zu reduzieren. Zusätzlich wurden die Greifbacken in ihrer Position leicht nach oben versetzt, wodurch ein Anschlagen des Greifers am Boden der Schale vermieden werden konnte. Über die vom Mikado-Programm bereitgestellte Möglichkeit, mehrere Griffvarianten für ein und dieselbe Bauteilposition zu definieren, wurden zudem verschiedene Greifpunkte rund um das Bauteil herum getestet, um eine möglichst robuste Griffauswahl zu erzielen.

Überprüfung der Kameraeinstellungen

Da Lichtreflexionen im Bereich der Schale als möglicher Einflussfaktor auf die Erkennungsgenauigkeit vermutet wurden, wurden die Belichtungseinstellungen der Kamera systematisch überprüft. Im Ergebnis führte eine Anpassung der Belichtung jedoch zu keiner nennenswerten Verbesserung der Erkennung, sodass dieser Einflussfaktor als Ursache ausgeschlossen werden konnte.

Systematisches Testen der Erkennungsparameter

Im weiteren Verlauf wurden die verschiedenen Einstellmöglichkeiten der Erkennungssoftware systematisch getestet. Von den jeweils eingestellten Parameterkombinationen wurden Aufnahmen erstellt, um deren Auswirkung auf die Erkennungsgenauigkeit vergleichen zu können. Als Bewertungsgrundlage diente dabei die im Mikado-Programm integrierte Griffvisualisierung, welche berechnete Griffpositionen als greifbar (grün) oder kollisionsbehaftet (rot) kennzeichnet. Auf diese Weise konnte unmittelbar überprüft werden, ob eine Parameteränderung den Anteil greifbarer Positionen erhöhte.

Software-Update des Steuerungssystems

Eine wirkungsvolle Einzelmaßnahme stellte die Aktualisierung der eingesetzten Software dar. Sowohl das Mikado-Programm als auch das zugrunde liegende Betriebssystem Ubuntu wurden auf einen aktuellen Stand gebracht. Durch dieses Update standen neue Such- und Erkennungsalgorithmen sowie zusätzliche Einstellmöglichkeiten zur Verfügung, welche insbesondere die beschriebenen Erkennungs- und Bewertungsfehler adressierten.

Im Zuge dieser Aktualisierung zeigte sich, dass die Robotersteuerung des UR3e nach dem Update von Betriebssystem und Mikado-Programm nicht mehr vollständig mit den übrigen Systemkomponenten kommunizieren konnte. Um die Kompatibilität wiederherzustellen, musste daher zusätzlich die Software der Robotersteuerung um zwei Versionsstufen aktualisiert werden. Dieses Vorgehen verdeutlicht die enge Abhängigkeit der einzelnen Systemkomponenten der Station: Eine Anpassung an einer Stelle der Steuerungsarchitektur kann Folgeanpassungen an anderer Stelle erforderlich machen, was bei zukünftigen Updates entsprechend zu berücksichtigen ist.

Einsatz neuer Greifer

Zur Verbesserung der Zugänglichkeit innerhalb der Schale wurden neue Greifer mit dünneren Greifbacken eingesetzt. Die schlankere Bauform ermöglicht ein leichteres Eindringen in enge Zwischenräume zwischen den Bins und reduziert damit die Anzahl der fälschlich als nicht greifbar bewerteten Positionen.

Optimierung der Verfahrwege

Abschließend wurden die Bewegungsbahnen des Roboters angepasst. Durch die Definition neuer Wegvariablen konnten die Verfahrwege zwischen Aufnahme- und Setzposition verkürzt sowie unnötige Verdrehungen des Roboterarms vermieden werden. Diese Maßnahme zielt, im Unterschied zu den übrigen Maßnahmen, nicht auf die Fehlerursachen der Erkennung, sondern unmittelbar auf die reine Prozesszeit des Bin-Pickings ab.

6.5 Ergebnis und Bewertung

Zur Bewertung der Wirksamkeit der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen wurde die Bin-Picking-Zykluszeit im Anschluss an die Umsetzung erneut gemessen und mit dem Ausgangszustand verglichen. Da die beschriebenen Maßnahmen in kurzer zeitlicher Abfolge umgesetzt wurden, lässt sich die erzielte Verbesserung nicht trennscharf einzelnen Maßnahmen zuordnen. Das Gesamtergebnis zeigt jedoch die kombinierte Wirkung aller Anpassungen. Eine detaillierte quantitative Auswertung der Zykluszeiten sowie deren Einfluss auf die Gesamtleistung der Anlage erfolgt in Abschnitt 7.2.

Bei der erneuten Prozessbeobachtung nach Umsetzung der Maßnahmen konnten zudem alle drei in Abschnitt 6.3 identifizierten Fehlerursachen deutlich verbessert werden. Bins, die zuvor von der Bildverarbeitung nicht erkannt wurden, werden durch die aktualisierten Such- und Erkennungsalgorithmen des Software-Updates nun zuverlässig erfasst. Die fälschliche Bewertung greifbarer Bins als nicht greifbar trat durch das Zusammenwirken der überarbeiteten Kollisionsprüfung und der neuen, dünneren Greifergeometrie nicht mehr auf, wodurch die zuvor erforderlichen Umrühr- und Neuaufnahmevorgänge entfielen. Auch die Vertauschung von langer und kurzer Seite und das damit einhergehende fehlerhafte Einlegen der Bins in den Werkstückträger konnte durch die angepassten Griffpositionen und der besseren Bin-Erkennung verbessert werden, sodass die Bins seither nahezu konstant an der langen Seite gegriffen und korrekt ausgerichtet abgelegt werden. Da diese drei Fehlerbilder im Ausgangszustand für den überwiegenden Teil der beobachteten Suchzeiten und Fehlgriffe verantwortlich waren, erklärt ihre Behebung sowohl die deutliche Reduzierung der mittleren Zykluszeit als auch die spürbar geringere Schwankungsbreite der Bearbeitungszeiten.

Die deutliche Reduzierung der Bin-Picking-Zykluszeit bestätigt somit, dass die identifizierten Ursachen durch die umgesetzten Maßnahmen wirksam behoben werden konnten. Da das Bin-Picking im Ausgangszustand den Engpass der Anlage darstellte, wirkt sich dessen Optimierung unmittelbar auf die Gesamtleistung der Anlage aus.

6.6 Ausblick

Auch wenn die Zykluszeit des Bin-Pickings durch die beschriebenen Maßnahmen deutlich reduziert und die identifizierten Fehlerursachen behoben werden konnten, verbleibt hinsichtlich der Prozesssicherheit und der Streuung weiteres Optimierungspotenzial. Im Vordergrund steht dabei die Frage, wie zuverlässig der Roboter auch unter realitätsnäheren Bedingungen greift und ablegt.

Ein zentraler Punkt betrifft die Befüllung der Schale. Im aktuellen Zustand liegen die Bins vereinzelt auf dem Boden der Schale verteilt, während beim klassischen Bin-Picking typischerweise eine vollständig gefüllte, randvolle Schale vorliegt. Insbesondere bei Bins, die sehr nah am Rand der Schale oder eng aneinander liegen, kommt es weiterhin zu Einschränkungen: Da der Greifer beim Greifvorgang keine benachbarten Bins berühren darf, werden solche Bins von der Software als nicht greifbar bewertet, obwohl sie physisch vorhanden sind. Eine mögliche Maßnahme wäre der Einsatz einer anderen Schalengeometrie, welche ein zu dichtes Aneinander liegen der Bins von vornherein reduziert.

Ergänzend dazu erscheint der Einsatz einer Vibrationsplatte unterhalb der Schale sinnvoll. Diese könnte die Bins in der Schale gezielt in Bewegung versetzen. Diese Vibration könnte nach dem greifen, also während dem setzen des vorherigen Bins erfolgen. Vor dem nächsten Griff wird dann wie momentan auch, eine neue Punktewolke aufgenommen. Durch diese Bewegung könnten sich zuvor zu eng aneinander liegende oder am Rand befindliche Bins vor der nächsten Bildaufnahme neu anordnen, wodurch sich die Anzahl der als nicht greifbar bewerteten Bins weiter reduzieren ließe, ohne dass hierfür ein separater Umrühr-Vorgang durch den Roboter selbst notwendig wäre.

Darüber hinaus sind die im Rahmen dieser Studienarbeit ermittelten Parameter der Erkennungs- und Greifsoftware zwar bereits deutlich verbessert, jedoch nicht als endgültig optimal zu betrachten. Eine weiterführende, systematische Untersuchung der verbleibenden Einstellmöglichkeiten könnte die Prozesssicherheit sowie die Konstanz der Zykluszeit zusätzlich erhöhen.

7. Ergebnisse und Diskussion

7.1 Ergebnisse der Optimierungsmaßnahmen

Die in Kapitel 5 und 6 beschriebenen Optimierungsmaßnahmen wurden mit dem Ziel umgesetzt, die Leistungsfähigkeit der Anlage zu steigern und die angestrebte Produktionsleistung von 50 Teilen pro Stunde zu erreichen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Optimierung des Bin-Picking-Prozesses, da dieser bereits in der Ausgangssituation den Engpass der Anlage darstellte und somit die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems maßgeblich beeinflusste.

Zur Bewertung der Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen wurden die relevanten Prozesszeiten vor und nach der Optimierung experimentell erfasst und miteinander verglichen. Neben der Zykluszeit des Bin-Picking-Prozesses wurde auch die Gesamtzeit eines vollständigen Produktionsdurchlaufs betrachtet, um sowohl die Auswirkungen auf die Engpassstation als auch auf die Gesamtleistung der Anlage bewerten zu können.

Die nachfolgenden Abschnitte stellen die ermittelten Messergebnisse gegenüber und bewerten die erzielten Verbesserungen hinsichtlich der Zykluszeiten sowie der Erreichung der definierten Projektziele.

7.2 Vergleich der Zykluszeiten

Zur Bewertung der Wirksamkeit der umgesetzten Optimierungsmaßnahmen wurden die Zykluszeiten des Bin-Picking-Prozesses sowie die Gesamtzeiten eines vollständigen Produktionsdurchlaufs vor und nach der Optimierung miteinander verglichen. Da das Bin-Picking bereits in der Ausgangssituation den Engpass der Demonstrationsanlage darstellte, lag der Schwerpunkt der zeitlichen Analyse auf dieser Station. Durch den Vergleich der Messwerte kann beurteilt werden, in welchem Umfang die umgesetzten Maßnahmen zu einer Verkürzung der Prozesszeiten sowie zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage beigetragen haben.

Für die Auswertung wurden jeweils mehrere Messungen durchgeführt und anschließend gemittelt. Dadurch konnten zufällige Schwankungen einzelner Messungen reduziert und eine belastbare Grundlage für den Vorher-Nachher-Vergleich geschaffen

werden. Im Folgenden werden zunächst die Zykluszeiten des Bin-Picking-Prozesses gegenübergestellt. Anschließend erfolgt die Betrachtung der Gesamtzeiten des Produktionsdurchlaufs sowie der daraus resultierenden Anlagenleistung.

Tabelle 3 Durchschnittliche Zykluszeit Bin-Picking

Kennzahl	Vorher	Nachher	Verbesserung
Durchschnittliche Zykluszeit [s]	80	46	42,50%

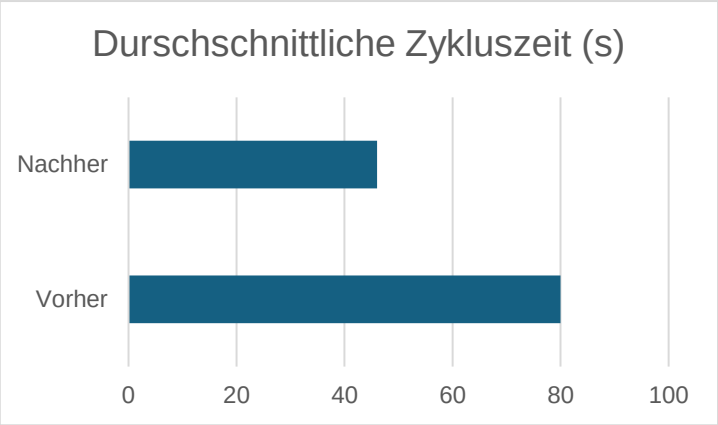


Abbildung 23 Durchschnittliche Zykluszeit Bin-Picking

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass die durchschnittliche Zykluszeit des Bin-Picking-Prozesses von 80 s auf 46 s pro Teil reduziert werden konnte. Dies entspricht einer Verringerung der Bearbeitungszeit um 42,5 %. Die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen führten somit zu einer deutlichen Steigerung der Leistungsfähigkeit der Engpassstation.

Die Ergebnisse bestätigen die Wirksamkeit der in Kapitel 6 beschriebenen Optimierungsmaßnahmen. Insbesondere die Anpassungen der Bildverarbeitung sowie die Optimierung des Greifers ermöglichten eine schnellere und zugleich prozesssichere Handhabung der Bauteile. Dadurch konnte die Bearbeitungszeit je Werkstück deutlich reduziert werden.

Trotz der erheblichen Zeitersparnis stellt das Bin-Picking weiterhin den Engpass der Demonstrationsanlage dar. Die Station weist auch nach der Optimierung die längste Zykluszeit innerhalb des Gesamtprozesses auf und bestimmt somit weiterhin maßgeblich die Leistungsfähigkeit der Anlage. Dennoch bildet die Verringerung der Zykluszeit die Grundlage für die im weiteren Verlauf dargestellte Steigerung der Anlagenleistung.

Tabelle 4 Durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Teil

Kennzahl	Vorher	Nachher	Verbesse-rung
Durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Teil [s]	101	65	35,60%
Theoretische Leistung [Teile/h]	35,6	55,4	55,60%

Die Gegenüberstellung der Messergebnisse verdeutlicht den Einfluss der umgesetzten Optimierungsmaßnahmen auf die Leistungsfähigkeit der Demonstrationsanlage. Während die durchschnittliche Bearbeitungszeit pro Werkstück von 101 s auf 65 s reduziert werden konnte, erhöhte sich die theoretische Anlagenleistung von 35,6 auf 55,4 Teile pro Stunde.

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Optimierung des Bin-Picking-Prozesses zu einer deutlichen Verringerung der Bearbeitungszeit führte. Da das Bin-Picking bereits in der Analyse des Ausgangszustands als Engpass identifiziert wurde, wirkte sich die Verkürzung dieses Prozessschrittes unmittelbar auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems aus. Die Bearbeitungszeiten der übrigen Stationen blieben hingegen nahezu unverändert, sodass die erzielte Leistungssteigerung im Wesentlichen auf die Optimierung der Engpassstation zurückzuführen ist.

Neben der Verkürzung der durchschnittlichen Bearbeitungszeit konnte auch die Prozessstabilität verbessert werden. Während im Ausgangszustand starke Schwankungen der Zykluszeiten auftraten, führten die Optimierungen zu einem deutlich gleichmäßigeren Prozessablauf. Insbesondere die Reduzierung fehlerhafter Greifversuche sowie die verbesserte Erkennung der Metall-Bins trugen dazu bei, ungeplante Verzögerungen zu minimieren und den Materialfluss innerhalb der Anlage zu stabilisieren.

Die Ergebnisse bestätigen damit, dass eine systematische Analyse der Engpassstation und die gezielte Umsetzung technischer Verbesserungsmaßnahmen einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Leistungsfähigkeit automatisierter Montagesysteme leisten können. Gleichzeitig zeigen sie, dass bereits die Optimierung einer einzelnen Station einen spürbaren Einfluss auf die Gesamtperformance der Anlage besitzt.

7.3 Bewertung der Zielerreichung

Das übergeordnete Ziel der Studienarbeit bestand darin, die Leistungsfähigkeit der Demonstrationsanlage durch geeignete Optimierungsmaßnahmen zu steigern und eine theoretische Produktionsleistung von 50 Teilen pro Stunde bei drei unterschiedlichen Produktvarianten zu erreichen. Zur Bewertung der Zielerreichung wurden nach Abschluss der Optimierungsmaßnahmen erneute Testläufe durchgeführt. Der Nachweis der Anlagenleistung erfolgte zunächst mit der aufwendigsten betrachteten Produktvariante (Variante 4), bei der zwei Metall-Bins montiert werden. Trotz des höheren Montageaufwands konnte hierbei eine durchschnittliche Bearbeitungszeit von 65 s pro Werkstück und damit eine theoretische Anlagenleistung von 55,4 Teilen pro Stunde erreicht werden. Die vorgegebene Zielsetzung wurde somit bereits für die anspruchsvollste der betrachteten Produktvarianten erfüllt.

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit wurden zusätzlich Testläufe mit den Varianten 1 (ohne Metall-Bins) und 2 (mit einem Metall-Bin) durchgeführt. Aufgrund des geringeren Montageaufwands konnten hierbei durchschnittliche Bearbeitungszeiten von 52 s beziehungsweise 55 s pro Werkstück erzielt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Anlage bei weniger komplexen Produktvarianten eine nochmals höhere theoretische Produktionsleistung erreicht und somit zusätzliche Leistungsreserven vorhanden sind.

Den größten Einfluss auf die Zielerreichung hatte die Optimierung des Bin-Picking-Prozesses. Bereits die Analyse des Ausgangszustands zeigte, dass diese Station den Engpass des Montageprozesses darstellte und somit die maximale Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage begrenzte. Durch die Optimierung der kamerabasierten Bauteilerkennung sowie der Greifstrategie konnte die Bearbeitungszeit dieser Station deutlich reduziert werden. Da die übrigen Prozessschritte bereits im Ausgangszustand vergleichsweise kurze und konstante Bearbeitungszeiten aufwiesen, bot insbesondere das Bin-Picking das größte Potenzial zur Steigerung der Anlagenleistung. Die erzielte Reduzierung der Bearbeitungszeit bestätigte, dass die Auswahl der Optimierungsmaßnahme auf Grundlage der zuvor durchgeführten Engpassanalyse zielführend war und sich unmittelbar auf die Gesamtperformance der Anlage auswirkte.

Neben der Optimierung des Bin-Picking-Prozesses wurde mit der Integration eines kamerabasierten Systems zur Positionserkennung des autonomen mobilen Roboters

Husky eine wesentliche Grundlage für den zukünftigen automatisierten Materialtransport innerhalb der Zukunftsfabrik geschaffen. Ziel dieser Maßnahme ist es, Positionsabweichungen des Huskys automatisch zu erkennen und die Greifpositionen des Industrieroboters entsprechend anzupassen. Dadurch wird perspektivisch ein automatisierter Materialtransport zwischen mehreren Montageplätzen ermöglicht. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Studienarbeit konnte die Kameraintegration erfolgreich umgesetzt werden. Die Umsetzung des tatsächlichen Anfahrens sowie die Integration ins Hauptprogramm stellen weiterführende Aufgaben dar.

Ebenfalls wurde die Lagerfläche des Huskys grundlegend überarbeitet. Durch die Neukonstruktion modularer Lagerplatzmodule konnte die Anzahl der verfügbaren Lagerplätze, wie in Abbildung 24 dargestellt, von sechs auf neun erhöht werden. Gleichzeitig wurde durch die symmetrische Anordnung der Lagerplätze die Voraussetzung geschaffen, diese zukünftig mithilfe einer Rasterfunktion reproduzierbar durch den Industrieroboter anzufahren. Neben der Erhöhung der Lagerkapazität wirkt sich diese Optimierung auch positiv auf den Anlagenbetrieb aus, da pro Produktionsdurchlauf mehr Werkstücke auf dem Husky abgelegt und transportiert werden können. Dadurch werden sowohl die Anlauf- als auch die Auslaufphase der Anlage effizienter gestaltet und die Flexibilität des Gesamtsystems erhöht.

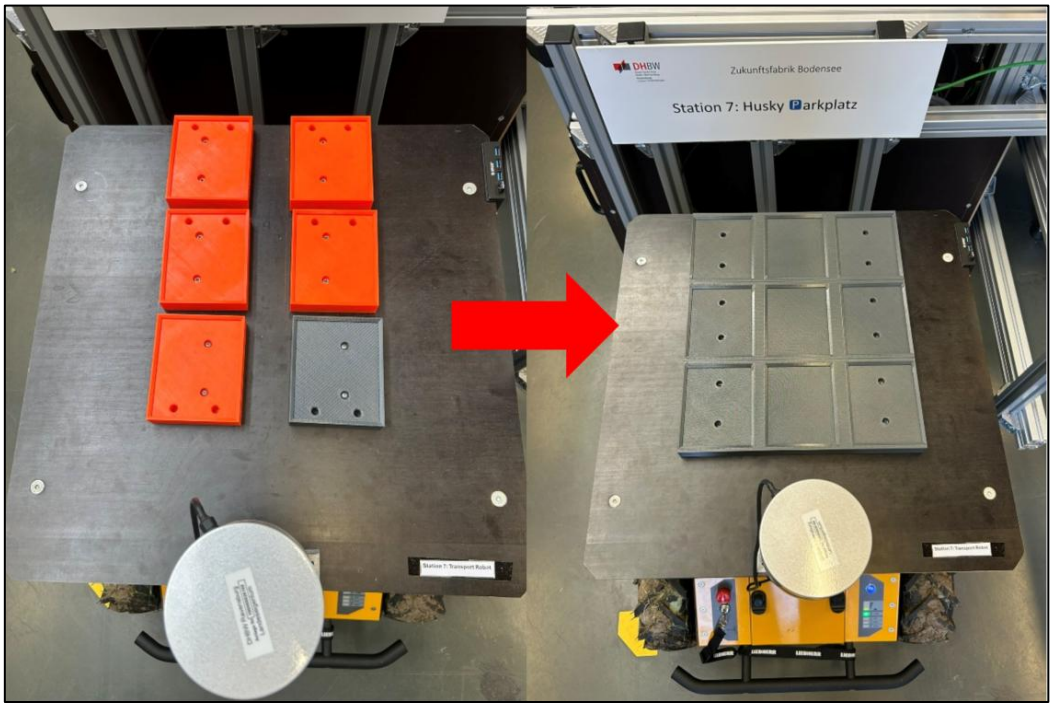


Abbildung 24 Vergleich 6 zu 9 Lagerplätzen

Neben den technischen Optimierungen wurden im Rahmen der Studienarbeit auch organisatorische Verbesserungen umgesetzt. Hierzu zählt insbesondere die Überarbeitung der bestehenden Klickanleitung zur Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage. Zwar lag bereits eine Anleitung vor, diese enthielt jedoch teilweise unvollständige sowie missverständliche Informationen, wodurch insbesondere neue Nutzer Schwierigkeiten beim Start der Anlage hatten. Durch die Überarbeitung der Dokumentation, die Aktualisierung der Abbildungen sowie eine eindeutigere Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte konnte die Bedienbarkeit der Anlage verbessert und der Einarbeitungsaufwand für nachfolgende Studierendengruppen reduziert werden. Auch wenn diese Maßnahme keinen direkten Einfluss auf die Zykluszeit besitzt, trägt sie zur Standardisierung der Anlagenbedienung sowie zur langfristigen Sicherung des aufgebauten Wissens bei.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die im Rahmen der Studienarbeit umgesetzten Maßnahmen sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Zukunftsfähigkeit der Demonstrationsanlage verbessert haben. Während die Optimierung des Bin-Pickings unmittelbar zur Steigerung der Anlagenleistung beitrug, schaffen die Erweiterung der Husky-Lagerplätze sowie die kamerabasierte Positionserkennung die Voraussetzungen für zukünftige Ausbaustufen der Zukunftsfabrik. Gleichzeitig verdeutlichen die organisatorischen Verbesserungen, dass neben technischen Optimierungen auch eine nachvollziehbare Dokumentation und standardisierte Abläufe einen wichtigen Beitrag zum nachhaltigen Betrieb komplexer Demonstrationsanlagen leisten können.

7.4 Grenzen der Optimierung

Trotz der im Rahmen der Studienarbeit erzielten Verbesserungen sind die Ergebnisse im Kontext der betrachteten Demonstrationsanlage zu bewerten. Im Gegensatz zu einer industriellen Serienfertigung dient die Anlage innerhalb der Zukunftsfabrik Bodensee in erster Linie der Lehre, Forschung und Erprobung neuer Automatisierungskonzepte. Die ermittelten Ergebnisse zeigen daher das vorhandene Optimierungspotenzial auf, können jedoch nicht uneingeschränkt auf industrielle Produktionsanlagen übertragen werden.

Darüber hinaus befand sich die Demonstrationsanlage während der Bearbeitung der Studienarbeit in einer kontinuierlichen Weiterentwicklung. Mehrere Systeme, wie beispielsweise die kamerabasierte Positionserkennung des autonomen mobilen Roboters Husky oder die geplante End-of-Line-Prüfung, konnten innerhalb des Bearbeitungszeitraums nur teilweise umgesetzt werden. Dadurch konnten einzelne Optimierungsmaßnahmen lediglich bis zu einem bestimmten Entwicklungsstand betrachtet werden.

Auch nach Abschluss der Optimierungsmaßnahmen bestehen weiterhin technische Grenzen innerhalb der Anlage. Trotz der deutlichen Verbesserung stellt das Bin-Picking nach wie vor den zeitkritischsten Prozessschritt dar und bestimmt somit weiterhin die maximale Leistungsfähigkeit des Montageprozesses. Darüber hinaus ist die Prozessstabilität weiterhin von der zuverlässigen kamerabasierten Bauteilerkennung sowie der Lage der Metall-Bins im Schüttgutbehälter abhängig.

Die Bewertung der Anlagenleistung basiert zudem auf den im Rahmen der Testläufe aufgenommenen Messwerten sowie auf einer theoretischen Berechnung der erreichbaren Produktionsleistung. Einflüsse, wie sie in einem dauerhaften industriellen Betrieb auftreten können, beispielsweise ungeplante Anlagenstillstände oder weitere Störgrößen, wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Insgesamt stellen die erzielten Ergebnisse jedoch eine belastbare Grundlage für die weitere Entwicklung der Demonstrationsanlage dar. Die umgesetzten Optimierungsmaßnahmen zeigen das Potenzial einer systematischen Analyse bestehender Prozesse und bilden gleichzeitig eine geeignete Basis für zukünftige Studienarbeiten sowie den weiteren Ausbau der Zukunftsfabrik Bodensee.

8. Fazit und Ausblick

8.1 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Studienarbeit wurde die Montageanlage der Zukunftsfabrik Bodensee systematisch analysiert und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit gezielt optimiert. Ausgangspunkt der Arbeit war die Aufgabenstellung, eine Produktionsleistung von 50 Teilen pro Stunde bei drei unterschiedlichen Produktvarianten zu erreichen. Zur Erreichung dieses übergeordneten Ziels wurde zunächst der Ausgangszustand der Anlage aufgenommen, um die zeitkritischen Prozessschritte identifizieren zu können. Auf Grundlage der durchgeführten Zeitmessungen und der anschließenden Analyse konnten das Bin-Picking sowie die Lageerkennung des autonomen mobilen Roboters Husky als zentrale Handlungsfelder identifiziert werden.

Der Schwerpunkt der umgesetzten Optimierungen lag auf dem Bin-Picking, welches sich bereits in der Ist-Analyse als Engpass des Montageprozesses herausgestellt hatte. Durch die systematische Ursachenanalyse in Anlehnung an das Ishikawa-Prinzip konnten die zentralen Fehlerbilder, wie nicht erkannte Bins, fälschlich als nicht greifbar bewertete Bins sowie die Vertauschung von langer und kurzer Seite, eindeutig identifiziert werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden mehrere Optimierungsmaßnahmen umgesetzt, die in ihrer Kombination zu einer Reduzierung der durchschnittlichen Zykluszeit von 80 s auf 46 s führten. Dies entspricht einer Verkürzung der Bearbeitungszeit um rund 42,5 %. Die theoretische Anlagenleistung konnte dadurch von 35,6 auf 55,4 Teilen pro Stunde gesteigert werden, sodass die vorgegebene Zielgröße von 50 Teilen pro Stunde bereits für die aufwendigste Produktvariante erreicht wurde.

Ergänzend zur Optimierung des Bin-Pickings wurden im Bereich der Husky-Lageerkennung wesentliche Grundlagen für den zukünftigen automatisierten Materialtransport innerhalb der Zukunftsfabrik geschaffen. Die Lagerkapazität des Huskys wurde durch die Konstruktion neuer, modularer Lagerplatzmodule von sechs auf neun Lagerplätze erhöht. Parallel dazu wurde ein neuer 2D-Vision-Sensor der Firma ifm ausgewählt, installiert und in Betrieb genommen, welcher die bekannten Schwächen der Vorgängerkamera, insbesondere Reflexionsempfindlichkeit und die redundante Verarbeitung von Tiefeninformationen, gezielt adressiert. Die vollständige Kamera-Pipeline, bestehend aus Bilderkennung, Datenübertragung und Verarbeitung im Roboterprogramm, konnte erfolgreich aufgebaut und verifiziert werden. Ebenso wurde die Hand-

Eye-Kalibrierung zwischen Sensor und Roboter durchgeführt und die geometrische Berechnung der neun Greifpunkte aus den erkannten Ankerpunkten mathematisch bestätigt. Die praktische Umsetzung des Anfahrens sowie die Integration in das bestehende Hauptprogramm konnten aus zeitlichen Gründen sowie aufgrund eines im Bewegungstest aufgetretenen Fehlverhaltens nicht abschließend realisiert werden und bilden damit den Ausgangspunkt für weiterführende Arbeiten.

Über die technischen Verbesserungen hinaus wurde im Rahmen der Studienarbeit auch die bestehende Klickanleitung zur Inbetriebnahme der Demonstrationsanlage überarbeitet. Durch die aktualisierten Beschreibungen, die Ergänzung fehlender Informationen sowie eine klarere Strukturierung der einzelnen Arbeitsschritte konnte die Bedienbarkeit der Anlage verbessert und der Einarbeitungsaufwand für nachfolgende Studierendengruppen deutlich reduziert werden. Diese organisatorische Maßnahme trägt zur langfristigen Sicherung des aufgebauten Wissens sowie zur Standardisierung der Anlagenbedienung bei.

Zusammenfassend zeigt die vorliegende Arbeit, dass durch eine systematische Ist-Analyse, die gezielte Identifikation von Engpässen und die anschließende methodische Umsetzung technischer sowie organisatorischer Verbesserungen ein spürbarer Beitrag zur Leistungssteigerung einer automatisierten Montageanlage geleistet werden kann. Die im Rahmen dieser Studienarbeit erzielten Ergebnisse bilden gleichzeitig eine belastbare Grundlage für den weiteren Ausbau der Zukunftsfabrik Bodensee und deren Weiterentwicklung als Demonstrations- und Forschungsanlage.

8.2 Ausblick

Trotz der erzielten Ergebnisse bestehen im Bereich der Anlage weiterhin verschiedene Ansatzpunkte für zukünftige Optimierungen und Weiterentwicklungen. Diese betreffen sowohl die direkte Fortführung der im Rahmen dieser Arbeit begonnenen Maßnahmen als auch übergeordnete Aspekte der Anlagenintegration und Prozessüberwachung.

Ein zentrales Handlungsfeld stellt die vollständige Umsetzung der kamerabasierten Husky-Lageerkennung dar. Auf Basis der bereits abgeschlossenen Sensorintegration, der erfolgreichen Hand-Eye-Kalibrierung sowie der mathematisch verifizierten Greifpunkt-Berechnung sollte in einem nächsten Schritt die Ursache des im Bewegungstest aufgetretenen Fehlverhaltens eindeutig identifiziert und behoben werden. Anschlie-

ßend können die weiteren Schritte der Programmierungskette, das Anfahren der berechneten Greifpunkte, das Greifen und Ablegen der Bauteile sowie die Integration in das bestehende Hauptprogramm, umgesetzt werden. Erst nach dieser vollständigen Umsetzung kann die dynamische Lageerkennung produktiv genutzt und die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Rückfalllösung mit fest hinterlegten Koordinaten dauerhaft abgelöst werden.

Auch im Bereich des Bin-Pickings verbleibt trotz der deutlichen Reduzierung der Zykluszeit weiteres Optimierungspotenzial. Insbesondere die Prozesssicherheit unter realitätsnäheren Bedingungen sollte weiter untersucht werden. Ein möglicher Ansatzpunkt betrifft die Geometrie der eingesetzten Schale: Bei einer randvollen Befüllung liegen einzelne Bins nach wie vor zu eng am Rand oder zu dicht aneinander, wodurch sie von der Software als nicht greifbar bewertet werden. Der Einsatz einer angepassten Schalengeometrie könnte diese Einschränkung reduzieren. Ergänzend erscheint der Einsatz einer Vibrationsplatte unterhalb der Schale sinnvoll, welche die Bins gezielt in Bewegung versetzen könnte, um sich vor der nächsten Bildaufnahme neu anzuordnen. Darüber hinaus stellen die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Erkennungs- und Greifparameter zwar eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Ausgangszustand dar, sind jedoch nicht als endgültig optimiert zu betrachten. Eine weiterführende, systematische Untersuchung der verbleibenden Einstellmöglichkeiten könnte die Prozesssicherheit sowie die Konstanz der Zykluszeit zusätzlich erhöhen.

Ein weiteres Handlungsfeld, das sich im Laufe des Projekts als relevant herausgestellt hat, betrifft den Umschalter der Produktionslinie. Gegen Ende des Bearbeitungszeitraums traten wiederholt Störungen an dieser Komponente auf: In einigen Fällen verhakte sich der Umschalter mechanisch, in anderen Fällen erfolgte der Umschaltvorgang nicht vollständig, sodass die SPS kein Freigabesignal für den nächsten Bearbeitungsschritt erhielt. In der Folge kam es zu ungeplanten Stillständen und einer Unterbrechung des Materialflusses. Da dieses Verhalten die Prozessstabilität der gesamten Anlage unmittelbar beeinträchtigt, sollten die Ursachen dieser Störungen im Rahmen einer weiterführenden Arbeit systematisch untersucht und der Umschalter mechanisch sowie steuerungsseitig überarbeitet werden. Eine zuverlässige Funktion dieser Komponente ist eine grundlegende Voraussetzung für den dauerhaften Betrieb der Anlage sowie für alle darauf aufbauenden Optimierungsmaßnahmen.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Steigerung der Anlagenleistung besteht in einer feineren Abstimmung der Roboterprogramme auf den Materialfluss. Aktuell folgen die einzelnen Bewegungsschritte der Roboter überwiegend sequentiell auf die Bereitstellung der Werkstücke. Durch eine gezielte Optimierung der Bewegungsabläufe könnten einzelne Teilschritte parallel zum Werkstücktransport ausgeführt werden. So wäre es beispielsweise denkbar, dass der Roboter das nächste zu montierende Bauteil bereits während der Weiterförderung des vorherigen Werkstücks zur nächsten Station aufnimmt und in Bereitschaftsposition hält. Auf diese Weise ließen sich Wartezeiten zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten weiter reduzieren und die Taktzeit der Anlage insgesamt verkürzen, ohne dass hierfür zusätzliche Hardware erforderlich wäre.

Über die einzelnen Stationen hinaus bietet die Anlage Potenzial für eine übergeordnete Prozessüberwachung. Eine automatisierte Erfassung von Kennzahlen über ein MES-System oder direkt über die SPS würde eine kontinuierliche Auswertung der Produktionsleistung ermöglichen und datenbasierte Optimierungsansätze für zukünftige Studienarbeiten schaffen.

Insgesamt zeigt sich, dass die im Rahmen dieser Studienarbeit umgesetzten Maßnahmen die Grundlage für eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Demonstrationsanlage bilden. Sowohl die verbleibenden technischen Herausforderungen als auch die perspektivischen Ausbaustufen bieten zahlreiche Anknüpfungspunkte für nachfolgende Studierendengruppen und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur langfristigen Weiterentwicklung der Zukunftsfabrik Bodensee.

9. Literaturverzeichnis

„Alles Wissenswerte zum Thema Bin Picking“. Zugegriffen 3. Juli 2026. https://www.optonic.com/wissen/bin-picking/.

Buxbaum, Hans-Jürgen und Daimler und Benz Stiftung, Hrsg. *Mensch-Roboter-Kollaboration*. Springer eBook Collection. Ladenburger Diskurs „Mensch-Roboter-Kollaboration“. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-658-28307-0.

Dr.-Ing. Thomas Dietmüller. „Qualitätsmanagement“. o. J.

„Ensenso N40, N41, N45, N46: Hochpräzise 3D-Kameras“. Zugegriffen 7. Juli 2026. https://www.optonic.com/produkte/ensenso/n41-n46/.

Hayat, Abdullah Aamir, Shraddha Chaudhary, Riby Abraham Boby, u. a. *Vision Based Identification and Force Control of Industrial Robots*. Studies in Systems, Decision and Control 404. Springer, 2022.

ifm electronic gmbh. „ifm online Website“. ifm im Überblick, 2026.

ifm electronic gmbh. „O2D522“. 12. Juni 2024.

ifm electronic gmbh. „O3D304“. 15. Januar 2026.

ifm electronic gmbh. „Objekterkennungssensor O2D522“. Objekterkennungssensor O2D522, 2026.

ifm electronic gmbh. „Programmierhandbuch IFM_O2D5xx_UR_Pick_Place_Program“. November 2022.

„Kollaborative Roboterautomatisierung | Universal Robots Cobots“. Zugegriffen 7. Juli 2026. https://www.universal-robots.com/de/produkte/ur3e/.

Kübler, Norman, und Erik Kähm. „Automatisierung eines Roboterarms mit kamerabasierter Steuerung durch SPS“. 14. Juli 2025. Friedrichshafen. DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen.

Kübler, Norman, und Erik Kähm. „Kamerabasierte Lagererkennung von Bauteilen für ein automatisiertes Fließbandsystem“. 10. Januar 2025. Friedrichshafen. DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen.

„Mikado Control: Effiziente Robotersteuerung für Bin Picking“. Zugegriffen 7. Juli 2026. https://www.optonic.com/produkte/mikado/control/.

Rusu, Radu Bogdan. *Semantic 3d object maps for everyday manipulation*. Springer tracts in advanced robotics 85. Springer, 2013.

Universal Robots A/S. „Socket TCP/IP Communication“. Socket TCP/IP Communication, 2026.

Universal Robots A/S. „Über Universal Robots“. Über Universal Robots, 2026.

Universal Robots A/S. „Universal Robots-PolyScope 5“. Universal Robots-PolyScope 5, 2026.

„Was ist Industrie 4.0?“ Zugegriffen 2. Juli 2026. https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html.

„Zentrum für Digitalisierung in Produktion und Produktentwicklung | DHBW Ravensburg“. 23. Oktober 2025. https://www.ravensburg.dhbw.de/forschung-transfer/kompetenzzentren/zentrum-fuer-digitalisierung-in-produktion-und-produktentwicklung.

Anmerkung zur Nutzung von Künstlicher Intelligenz:

Claude/ ChatGPT	- wurde zur Zusammenfassung wissenschaftlicher Quellen und technischer Dokumentationen genutzt - KI-Unterstützung wurde zur sprachlichen Überarbeitung und Umformulierung eigener Textentwürfe genutzt, um Ausdruck und Lesefluss zu verbessern - zur Unterstützung für die Programmierung von Robotern

10. Anhang

```
# Berechnung der 9 Greifpunkte aus 4 Kamera-Eckpunkten
# Reihenfolge der 9 Punkte (Sicht von oben):
#
#   OL ———————— OR
#   |  9   8   7  |   ← obere Reihe (zuletzt)
#   |  6   5   4  |   ← mittlere Reihe
#   |  3   2   1  |   ← untere Reihe (zuerst)
#   UL ———————— UR
#
# Voraussetzungen (vorab in Installation -> Variablen anlegen):
# - Ecke_OL, Ecke_OR, Ecke_UR, Ecke_UL : Pose (kommt aus dem Kamera-Skript)
# - z_greif : Number (Greifhoehe in Meter, negativ)
# - Greif_1 bis Greif_9 : Pose
# - alle Hilfsvariablen (Ax, Ay, ..., start_x, start_y) als Number = 0

# === 1. Eckpunkte in Einzelwerte aufteilen ===
Ax = Ecke_OL[0]
Ay = Ecke_OL[1]
Bx = Ecke_OR[0]
By = Ecke_OR[1]
Cx = Ecke_UR[0]
Cy = Ecke_UR[1]
Dx = Ecke_UL[0]
Dy = Ecke_UL[1]

# === 2. Lokale Achsen der Palette berechnen ===
# X-Achse: von Ecke_UR nach Ecke_UL (untere Kante)
ux_x = Dx - Cx
ux_y = Dy - Cy
len_x = norm(p[ux_x, ux_y, 0, 0, 0, 0])
ux_x = ux_x / len_x
ux_y = ux_y / len_x

# Y-Achse: von Ecke_UR nach Ecke_OR (rechte Kante)
uy_x = Bx - Cx
uy_y = By - Cy
len_y = norm(p[uy_x, uy_y, 0, 0, 0, 0])
uy_x = uy_x / len_y
uy_y = uy_y / len_y

# === 3. Offset zur Eckzelle (Pos 1, unten rechts) ===
off_x = 0.0275
off_y = 0.0522

# Schrittweite zwischen den Zellen
step_x = (len_x - 2 * off_x) / 2
step_y = (len_y - 2 * off_y) / 2


# === 4. Startpunkt fuer Greif_1 (unten rechts) ===
start_x = Cx + off_x * ux_x + off_y * uy_x
start_y = Cy + off_x * ux_y + off_y * uy_y

# === 5. Die 9 Greifpunkte berechnen ===
# Untere Reihe (Greif_1, _2, _3)
Greif_1 = p[start_x + 0 * step_x * ux_x + 0 * step_y * uy_x, start_y + 0 * step_x * ux_y + 0 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]
Greif_2 = p[start_x + 1 * step_x * ux_x + 0 * step_y * uy_x, start_y + 1 * step_x * ux_y + 0 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]
Greif_3 = p[start_x + 2 * step_x * ux_x + 0 * step_y * uy_x, start_y + 2 * step_x * ux_y + 0 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]

# Mittlere Reihe (Greif_4, _5, _6)
Greif_4 = p[start_x + 0 * step_x * ux_x + 1 * step_y * uy_x, start_y + 0 * step_x * ux_y + 1 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]
Greif_5 = p[start_x + 1 * step_x * ux_x + 1 * step_y * uy_x, start_y + 1 * step_x * ux_y + 1 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]
Greif_6 = p[start_x + 2 * step_x * ux_x + 1 * step_y * uy_x, start_y + 2 * step_x * ux_y + 1 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]

# Obere Reihe (Greif_7, _8, _9)
Greif_7 = p[start_x + 0 * step_x * ux_x + 2 * step_y * uy_x, start_y + 0 * step_x * ux_y + 2 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]
Greif_8 = p[start_x + 1 * step_x * ux_x + 2 * step_y * uy_x, start_y + 1 * step_x * ux_y + 2 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]
Greif_9 = p[start_x + 2 * step_x * ux_x + 2 * step_y * uy_x, start_y + 2 * step_x * ux_y + 2 * step_y * uy_y, z_greif, 0, 0, 0]

# === 6. Test-Popups (nach erfolgreichem Test entfernen) ===
popup(to_str(Greif_1))
popup(to_str(Greif_5))
popup(to_str(Greif_9))
```

Anhang 1 Skript Greifpunkte_Berechnung

```
# ======================================================
# BEWEGUNGSTEST: Sicher zu Greif_5 (Palettenmitte) fahren
# ======================================================
# Voraussetzungen vor dem Start:
# - Greifer-TCP ist aktiv (NICHT der Stift-TCP!)
# - Stift aus dem Greifer entfernt
# - Geschwindigkeit am Schieberegler auf 10%
# - Hand am Not-Aus
# - Greif_5 wurde vorher vom Berechnungs-Skript befuellt
# - z_greif ist in den Variablen gesetzt (z.B. -0.6077)
# ======================================================

# Sicherheitshoehe: 10 cm UEBER der Greifebene
sicher_z = z_greif + 0.10

# Ziel-Pose: X/Y von Greif_5, sichere Z-Hoehe, Greifer zeigt nach unten
ziel_sicher = p[Greif_5[0], Greif_5[1], sicher_z, 0, 3.14159, 0]

# SICHERHEITS-POPUP VOR der Bewegung
# Hier kannst du noch abbrechen, falls etwas komisch aussieht
popup("ACHTUNG! Roboter faehrt gleich zu Greif_5 (Mitte). Weiter = Bewegung startet!")

# Langsame Bewegung zur sicheren Position
# a = Beschleunigung (rad/s^2)
# v = Geschwindigkeit (rad/s)
movej(ziel_sicher, a=0.3, v=0.1)

# Bestaetigung nach erfolgreicher Ankunft
popup("Bin ueber Greif_5 angekommen. Pruefe Position!")
```

Anhang 2 Bewegungstest_Greif5

Problemlösungsbericht

Hintergrundinformationen (Was ist das Problem)

Problemtitel: Unzureichende Lagererkennung am Belt-Feeding Arbeitsplatz

Was: Fehlgriffe des Roboters, hohe Taktzeitvariabilität, keine Kompensation von Positionsabweichungen
Wo: Belt-Feeding Arbeitsplatz
Wann: bei jedem Zyklus mit nicht exakter FTS-Position
Wer: Next-Level OP
Wie: strukturierte Beobachtung, Zeitmessung, Pareto-Analyse

Wiederholung? Ja, bei jedem Zyklus mit nicht exakter Position Material-Nr.

Zielzustand (Wie soll es aussehen wenn wir fertig sind)

Wie soll es aussehen:

- Dynamische Erkennung der Palettenlage über Kamera Zuverlässiges Anfahren aller 9 Lagerplätze
- Robustheit gegen Positionsabweichungen und leichte Verdrehung
- Direkte Kommunikation Kamera ↔ Roboter ohne SPS-Umweg

Messgröße und Ausprägung

- Toleranz Anfahrposition: ± 1–2 mm
- Fehlgriffquote: 0 % im definierten Toleranzband
- Taktzeit: reduzierte Variabilität, keine manuellen Eingriffe

5x Warum (Grundursache Einflussgrößen)

Einfluss:	Methode
Warum	Fehlgriffe? → Roboter fährt falsche Position an
Warum	→ Programm arbeitet mit festen Koordinaten
Warum	→ keine dynamische Lageerkennung im System
Warum	→ 3D-Kamera nicht produktiv nutzbar
Warum	→ Sensordaten unzuverlässig
Einfluss:	Sensorik
Warum	unzuverlässige Sensordaten? → 3D-Kamera für Anwendung ungeeignet
Warum	→ Unschärfe bei kurzer Distanz
Warum	→ Auslegung des Sensors für größere Arbeitsabstände
Warum	→ Randbedingungen des Arbeitsplatzes bei Auswahl nicht abgeglichen
Warum	→ keine strukturierte Anforderungsanalyse vor Sensor-Beschaffung
Einfluss:	
Warum	
Warum	
Warum	
Warum	
Warum	

Gegenmaßnahmen (Wer macht was)

Was	Wer	Bis wann	Status
Auswahl 2D-Sensor (ifm O2D522)	Next-Level OP	05.11.2025	●
Installation und Netzwerkanbindung	Next-Level OP	25.02.2026	●
Hand-Eye-Kalibrierung	Next-Level OP	06.05.2025	●
Greifpunkt-Berechnung im UR-Programm	Next-Level OP	22.05.2026	●
Bewegungstest validieren	Nachfolger	offen	○
Integration ins Hauptprogramm	Nachfolger	offen	○
Lastenheft für Nachfolger	Next-Level OP	03.07.2026	●

Erfolgswirkung (Haben wir unser Ziel erreicht)

Messgröße	Ziel	Ist	Mess-Zeitraum
Erkennung 2 Eckpunkte	100 %	erreicht	Im Projekt
Berechnung 9 Greifpunkte	100%	erreicht	Im Projekt
Anfahren der Greifpunkte	100%	Noch offen	Nachfolgeprojekt
Integration ins Hauptprogramm	100%	Noch offen	Nachfolgeprojekt

Im Fall der Nicht-Zielerreichung: weiteres Vorgehen?

- Übergabe an Nachfolge-Studierende mit Lastenheft
- statisches Programm mit festen Koordinaten bleibt aktiv

Anpassung Dokumente (Absichern neuer Standard)

- Dokumentation der Kamera-Konfiguration (Vision Assistant, PCIC-Ausgabe)
- Dokumentation der URScripte (Variablen, Kamera-Auslese, Greifpunkt-Berechnung)
- Übergabedokumentation mit vollständigem Stand

Standardisierung (Das Problem tritt nie wieder auf)

Anpassung Dokumente

Lastenheft für Nachfolger mit Anforderungen, Schnittstellen, empfohlenen Untersuchungsschritten

Abschlussdatum 03.07.2026 **Unterschrift Sponsor**

Anhang 3 Problemlösungsbericht Lageerkennung Husky

Problemlösungsbericht

Hintergrundinformationen (Was ist das Problem)

Problemtitel: Hohe Zykluszeit und Streuung im Bin-Picking-Prozess

Beim Bin-Picking der Montageanlage traten stark schwankende Bearbeitungszeiten (ca. 60-120 s statt der angestrebten Taktzeit) sowie Fehlgriffe auf. Betroffen ist die Station Bin-Picking zwischen Belt Feeding und Handarbeitsplatz. Entdeckt wurde das Problem im Rahmen der Zeitaufnahmen zur IST-Analyse der Anlage durch das Projektteam Next-Level Operation.

Zielzustand (Wie soll es aussehen wenn wir fertig sind)

Wie soll es aussehen:	Messgröße und Ausprägung
Bin-Picking-Zeit für alle Varianten spürbar reduzieren und Streuung minimieren. Übergeordnetes Ziel der Gesamtanlage: 50 Bauteile in 3 Varianten in 1 Stunde.	Bin-Picking-Zykluszeit (Ø s je Werkstückträger, Variante 4); Zielrichtung: deutlich unterhalb der Ausgangszeit von 80 s und im Bereich der erforderlichen Taktzeit

5x Warum (Grundursache Einflussgrößen)

Einfluss:	Methode	Bins werden von der Bildverarbeitung im Schüttgutbehälter nicht erkannt
Warum		Punktwolkenauswertung erfasst nicht alle im Behälter liegenden Bins
Warum		Bei Randlage/Überlappung werden keine eindeutigen Merkmale extrahiert
Warum		Bisherige Mikado-Softwareversion hatte eingeschränkte Erkennungsalgorithmen
Warum		System war nicht auf aktuellem Software-/Betriebssystemstand
Warum		Kein regelmäßiges Update-Vorgehen für die Steuerungssoftware etabliert
Einfluss:	Methode	Tatsächlich greifbare Bins werden von der Kollisionsprüfung als nicht greifbar bewertet
Warum		Griffposition wird als kollisionsbehaftet eingestuft ohne reales Hindernis
Warum		Kollisionsprüfung mit zu konservativen Sicherheitsabständen ausgelegt
Warum		Vorherige (breitere) Greifergeometrie ließ wenig Spielraum in der Schale
Warum		Greifbacken nicht auf beengte Platzverhältnisse in der Schale ausgelegt
Warum		Bin-Anordnung im Schüttgut bei Systemauslegung nicht ausreichend beachtet
Einfluss:	Methode/Material	Die Orientierung (lange/kurze Seite) der Bins wird teilweise falsch bestimmt
Warum		Roboter greift vereinzelt an der kurzen statt der langen Seite
Warum		Punktwolkenauswertung unterscheidet beide Seiten nicht eindeutig
Warum		Lange und kurze Seite unterscheiden sich geometrisch nur gering
Warum		Erkennungsparameter nicht gezielt auf dieses Merkmal optimiert
Warum		Bislang keine gezielte Kalibrierung der Orientierungserkennung erfolgt

Gegenmaßnahmen (Wer macht was)

Was	Wer	Bis wann	Status
Greifpositionen angepasst (lange Seite, höhere Backenposition)	Projektteam	11.11.2025	●
Kamera/Belichtung geprüft (Reflexion ausgeschlossen)	Projektteam	11.11.2025	●
Erkennungsparameter systematisch getestet	Projektteam	20.11.2025	●
SW-Update Mikado + Ubuntu + UR	Projektteam	20.05.2026	●
Neue Greifer, dünnere Greifbacken	Projektteam	21.05.2026	●
Verfahrwege optimiert (kürzere Bahnen)	Projektteam	21.05.2026	●
Doku im Wissensmanagement ergänzen	Projektteam	07.07.2026	●

Die schlechteste Lösung → **Die beste Lösung**

Unterweisung der Mitarbeiter | Qualitätsprüfung am Ende | Änderung der Arbeitsanweisung | Änderung des Prozesses | Poka-Yoke

Erfolgswirkung (Haben wir unser Ziel erreicht)

Messgröße	Ziel	Ist	Mess-Zeitraum
Bin-Picking-Zykluszeit (Var. 4, Ø)	< 80 s	Ø 47 s (-41%)	Q2 2026
Produktionsleistung Gesamtanlage	50/h, 3 Var.	~63,5/h (54 in 51min)	Schlussprüf. Q2

Ziel erreicht (~63,5 > 50 Teile/h). Fokus: Streuung Bin-Picking weiter reduzieren.

Parameter fest in Mikado gespeichert; Doku im Wissensmanagement geplant.

Standardisierung (Das Problem tritt nie wieder auf)

Neue Griffpositionen, Parameter, Greifer & SW-Stand dauerhaft in Mikado gespeichert.

Bestehender Standard vorhanden?	Ja - bisherige Grundkonfiguration von Mikado-Programm und Greifer
Neuer Standard erstellt?	Ja - aktualisierte Software (Mikado/Ubuntu), neue Greifpositionen und neue Greifergeometrie als neuer Standard übernommen

Größter Hebel: Software-Update (zuerst SW, dann Mechanik). Übertragbar auf andere Stationen.

Anhang 4 Problemlösungsbericht Bin-Picking