

## **Entwicklung eines automatischen induktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Dr.-Ing.**

von der Fakultät Maschinenbau  
der Technischen Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

**Jens Bucher, M.Sc.**

geboren in  
Neuss

Tag der mündlichen Prüfung: 25.11.2022

1. Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne
2. Gutachter: Herr Prof. Dr.-Ing. Frank Lobeck

**Dortmund, 2022**

Technische Universität Dortmund  
Fakultät Maschinenbau  
Fachgebiet Maschinenelemente



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Maschinenelemente der Technischen Universität Dortmund erarbeitet. Die Thematik des automatischen induktiven Ladens ergab sich aus meinen Arbeiten im Rahmen des vom Bundesministeriums für *Wirtschaft und Energie* öffentlich geförderten Forschungsprojekts „ALaPuN - Automatisches Ladesystem für PKWs und leichte Nutzfahrzeuge“ mit dem Förderkennzeichen 01MV18001A. Teile dieser Arbeit sind bereits in [BKK21] und werden voraussichtlich im Jahr 2023 ebenfalls im Abschlussbericht [BKK23] veröffentlicht. Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich dabei zu jeder Zeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Künne, dem Leiter des Fachgebiets Maschinenelemente für die hervorragende fachliche und persönliche Unterstützung. Er unterstützte und förderte mich seit Beginn meiner Masterarbeit 2018 und über die darauffolgenden Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter und hat so zu meiner fachlichen und persönlichen Entwicklung entscheidend beigetragen. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Lobeck für die Übernahme des Zweitgutachtens. Zudem spreche ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralph Sievering und Herrn Prof. Dr. Tobias Haertel meinen persönlichen Dank für die faire Behandlung im Rahmen des gesamten Prüfungsverfahrens aus.

Zudem möchte ich mich bei meinen Kollegen Herrn Jan Knipschild und Herrn Philipp Bengfort und ehemaligem Kollegen Herrn Dr. Dennis Stracke für die enge Zusammenarbeit und für die fachlichen Diskussionen bedanken. Sie haben im Rahmen meiner Tätigkeit ein angenehmes Arbeitsklima geschaffen, was mir für eine erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit die Motivation gegeben hat. Im Rahmen dessen möchte ich mich beim gesamten Personal des Fachgebiets Maschinenelemente für die herausragende Zusammenarbeit bedanken.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen studentischen Hilfskräften und Studienarbeitern für die großartige Zusammenarbeit. Sie haben bei der Generierung der Inhalte einen wertvollen Beitrag geleistet und bei dem mit meiner Arbeit in Verbindung stehenden Forschungsprojekt ALaPuN tatkräftig unterstützt.

Schließlich danke ich meiner Frau Lena, ihrer und meiner Familie, die mich alle zusammen mein gesamtes Studium über unterstützt haben und mich zu jeder Zeit ermutigt haben. Sie standen mir während dieser Zeit mit vollen Kräften zur Seite und haben für den nötigen Rückhalt gesorgt.

Dortmund, November 2022

Jens Bucher

## Übersicht

Die zunehmende Elektrifizierung des Straßenverkehrs erfordert in gleichem Maße den Ausbau der Ladeinfrastruktur und die Zurverfügungstellung von Ladesäulen. Mit dem Hintergrund, dass die Entwicklung von autonom fahrenden Fahrzeugen stetig voranschreitet, werden in Zukunft automatische Ladesysteme für Elektrofahrzeuge unverzichtbar sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Entwicklung eines automatischen induktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge vorgestellt. Anhand des aktuellen Standes der Technik wird gezeigt, dass bereits erste Prototypen entwickelt werden, jedoch keine vollständigen Untersuchungen von kostengünstigen automatischen Ladesystemen mit aktiven Markern am Inlet bekannt sind. Aus diesem Grund wird zunächst ein kostengünstiges und kompaktes, an der Wand zu befestigendes, automatisches Ladesystem entwickelt, welches lediglich vier aktiv regelbare Freiheitsgrade aufweist. Die fehlenden zwei rotatorischen Freiheitsgrade werden über eine elastische Ausgleichseinheit kompensiert.

Zudem wird eine Prozedur für den automatischen Einsteckvorgang vorgestellt, die auf der verwendeten Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit montierten Infrarot-LEDs im Inlet basiert. Die Prozedur beinhaltet das Suchen der IR-LEDs bei gleichzeitiger Plausibilitätsüberprüfung der Anordnung der gefundenen Punkte, eine Vorpositionierung mit anschließender Identifikationsüberprüfung des Fahrzeugs, einem Visual Servoing zur Annäherung zwischen Stecker und Inlet und einem abschließenden Einsteckvorgang. Für das entwickelte System wird anschließend eine Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung mit IR-LEDs im Arbeitsraum des automatischen Ladesystems anhand definierter Bewertungskriterien durchgeführt. Diese Untersuchung wird um die Strategie der Inlet-Posenbestimmung mittels AprilTag als passiven Marker und um die Strategie eines trainierten neuronalen Netzwerks zur Erkennung der Inlet-Pose ohne jegliche Modifikation am Fahrzeug erweitert. Somit werden Vor- und Nachteile qualitativ erarbeitet und die Strategien gegenübergestellt.

Abschließend wird eine Evaluierung des Systems im Rahmen diverser Steckversuche im Arbeitsraum des Systems bei unterschiedlicher Inletorientierung durchgeführt. Dabei werden der Steckerfolg, die Dauer des automatischen Steckvorgangs und die wirkenden Kräfte und Momente am Inlet analysiert. Auf Basis dieser Ergebnisse wird abschließend eine Handlungsempfehlung für das zukünftige Vorgehen und die Standardisierung des automatischen induktiven Ladens von Elektrofahrzeugen ausgesprochen.

## Abstract

The increasing electrification of the road traffic requires the expansion of the charging infrastructure and the supply of charging stations to the same extent. As the development of autonomous vehicles continues, automatic charging systems for electric vehicles will become essential in the future. In this work, the development of an automatic conductive charging system for electric vehicles is presented. Based on the current state of the art, it is shown that first prototypes are already being developed, but no complete investigations of low-cost automatic charging systems with active markers on the inlet are known. For this reason, a low-cost and compact wall-mountable automatic charging system is developed first, which has only four actively controllable degrees of freedom. The missing two rotational degrees of freedom are compensated by an elastic compensation unit.

In addition, a procedure for the automatic plugging process is presented based on the used strategy of inlet pose estimation with mounted infrared LEDs in the inlet. The procedure includes the search of the IR-LEDs with a simultaneous plausibility check of the arrangement of the found points, a pre-positioning with a following identification check of the vehicle, a visual servoing for the alignment between connector and inlet and a final insertion process. For the developed system, an investigation of pose estimation of the inlet with IR LEDs in the workspace of the automatic loading system is performed based on defined evaluation criteria. This investigation is extended by the strategy of pose determination using an AprilTag as a passive marker and by the strategy of a trained neural network to detect the inlet pose without any modification on the vehicle. Thus, advantages and disadvantages are worked out qualitatively and the strategies are compared.

Finally, an evaluation of the system is performed in the context of various plugging tests in the system's workspace with different inlet orientations. The plugging results, the duration of the automatic plugging process and the forces and moments acting on the inlet are analyzed. Based on these results, a recommendation for future action and standardization of automatic conductive charging of electric vehicles is finally made.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>2</b>
2.1 Automatische konduktive Ladesysteme . . . . .	2
2.2 Forschungsprojekt ALanE . . . . .	6
2.3 Unterschiedliche Ansätze der Inleterkennung . . . . .	10
2.3.1 Ohne Marker . . . . .	11
2.3.2 Passive Marker . . . . .	13
2.3.3 Aktive Marker . . . . .	15
2.4 Posenbestimmung und Visual Servoing . . . . .	17
2.4.1 Posenbestimmung . . . . .	17
2.4.2 Visual Servoing . . . . .	22
2.5 Robot Operating System - (ROS) . . . . .	26
<b>3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>28</b>
3.1 Problemstellung . . . . .	28
3.2 Zielsetzung . . . . .	29
3.3 Vorgehensweise . . . . .	30
<b>4 Entwicklung des Ladesystems</b>	<b>32</b>
4.1 Anforderungen . . . . .	32
4.2 Kinematikkonzept und Ausarbeitung . . . . .	34
4.3 Stecker- und Inletmodifizierung . . . . .	37
<b>5 Steuerungsaufbau und automatische Ladeprozedur</b>	<b>41</b>
5.1 Steuerungsaufbau . . . . .	41
5.1.1 Aufbau im ROS . . . . .	41
5.1.2 Kamerakalibrierung . . . . .	42
5.1.3 Spindelantrieb des Unterarms . . . . .	44
5.2 Automatische Ladeprozedur . . . . .	46
5.2.1 Suchen der Markierungen und PTP-Vorpositionierung . . . . .	47
5.2.2 Genauigkeitsbetrachtung für die PTP-Vorpositionierung . . . . .	52
5.2.3 Identifikationsprüfung . . . . .	53
5.2.4 Visual Servoing . . . . .	54
5.2.5 Genauigkeitsbetrachtung für das Visual Servoing . . . . .	57

---

5.2.6	Steckvorgang, Laden und Beenden des Prozesses . . . . .	59
<b>6</b>	<b>Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung mit IR-LEDs und weiteren Strategien</b>	<b>62</b>
6.1	Vorgehen und Bewertungskriterien . . . . .	62
6.1.1	Vorgehen im Arbeitsraum des Ladesystems . . . . .	63
6.1.2	Bewertungskriterien . . . . .	66
6.2	Versuchsaufbau . . . . .	67
6.2.1	Versuchsstand . . . . .	67
6.2.2	Kalibrierung ohne IR-Passfilter . . . . .	69
6.3	Versuchsplan und Auswertung . . . . .	69
6.3.1	Versuchsplan . . . . .	70
6.3.2	Auswertung . . . . .	70
6.4	IR-LEDs als aktive Marker . . . . .	71
6.5	AprilTag als passiver Marker . . . . .	76
6.5.1	Auswahl und Positionierung des AprilTags . . . . .	76
6.5.2	Untersuchungsergebnisse . . . . .	77
6.6	Neuronales Netzwerk zur Posenbestimmung ohne Marker . . . . .	81
6.6.1	Vorgehen DOPE . . . . .	81
6.6.2	Anpassung des Versuchsplans . . . . .	85
6.6.3	DOPE - Inlet . . . . .	86
6.6.4	DOPE - AC-Teil . . . . .	88
6.7	Ergebnisdiskussion . . . . .	90
<b>7</b>	<b>Evaluierung und Analyse des Steckverhaltens mit aktiven Markern</b>	<b>92</b>
7.1	Steckversuche im Arbeitsraum . . . . .	92
7.1.1	Versuchsplan . . . . .	92
7.1.2	Versuchsaufbau . . . . .	94
7.1.3	Vorversuche . . . . .	95
7.1.4	Versuchsergebnisse . . . . .	97
7.1.5	Dauer des Einsteckvorgangs . . . . .	102
7.1.6	Wirkende Kräfte und Momente . . . . .	106
7.2	Steckversuche mit notwendiger elastischer Kompensation . . . . .	111
7.2.1	Versuchsplan . . . . .	111
7.2.2	Vorversuche . . . . .	113
7.2.3	Versuchsergebnisse . . . . .	116
7.2.4	Dauer des Einsteckvorgangs . . . . .	118
7.2.5	Wirkende Kräfte und Momente . . . . .	120
7.3	Ergebniszusammenfassung und Diskussion . . . . .	123
<b>8</b>	<b>Wirtschaftliche Bedeutung und Handlungsempfehlung</b>	<b>125</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>128</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>X</b>

---

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>A Anhang - Bildverarbeitung</b>	<b>XXX</b>
A.0.1 Endoskopkamera . . . . .	XXX
A.0.2 IR-Passfilter . . . . .	XXX
A.0.3 IR-LED Blob-Detektion . . . . .	XXXI
A.0.4 Webcam . . . . .	XXXI
<b>B Anhang - Spindelantrieb des Unterarms</b>	<b>XXXII</b>
<b>C Anhang - Kollaborierender Roboter UR10</b>	<b>XXXIII</b>
<b>D Anhang - Untersuchung der Posenbestimmung</b>	<b>XXXIV</b>
D.0.1 Versuchsplan . . . . .	XXXIV
D.0.2 DOPE . . . . .	XLII



# Symbolverzeichnis

## Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Definition
$\alpha$	°	Winkelstellung des Oberarms
$\beta$	°	Winkel des Unterarms mit Bezug zum Oberarm
$\delta$	°	Hilfswinkel entlang der Spindelachse bezogen zur Vertikalachse
$\theta$	°	Inletwinkel
$a$	mm	Abstand zwischen IR-LEDs 0 und 1
$b$	mm	Abstand zwischen IR-LEDs 1 und 2
$c$	mm	Abstand zwischen IR-LEDs 2 und 3
$\mathbf{c}$	-	Spalte der Rotationsmatrix
$d$	mm	Abstand zwischen IR-LEDs 0 und 3
$dz$	mm	Abstand
$e$	mm	Abstand zwischen IR-LEDs 0 und 2
$\mathbf{e}$	-	Fehlervektor
$f$	mm	Abstand zwischen IR-LEDs 1 und 3
$k$	-	Verzerrungsparameter
$l$	-	Länge
$g$	-	Graustufenkennwert
$\lambda$	-	Proportionalfaktor
$\mathbf{m}$	-	Projizierter Punkt in Bildebene in homog. Pixelkoord.
$n$	-	Versuchsnummer
$\omega$	-	Orientierungsvektor
$p$	-	Verhältnis von Brennweite zu Pixelgröße
$\mathbf{p}$	m	Projizierter Punkt in Bildebene in normierten homog. Koord.
$r$	mm	Radialer Abstand in Bildebene
$s$	-	Skew Parameter
$\sigma$	-	Standardabweichung
$t$	s	Zeit
$\mathbf{t}$	-	Translationsvektor
$u, v$	Pixel	Koordinaten in der Bildebene
$x, y$	mm	Koordinaten in der Bildebene
$\mathbf{v}$	-	Geschwindigkeitsvektor
$\mathcal{C}$	-	Ursprung von Koordinatensystem
$\mathcal{F}$	-	Frame
$F$	mm	Brennweite

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Definition</b>
<b>H</b>	-	Homographiematrix
<i>I</i>	mA	Motorstrom
<b>K</b>	-	Kameramatrix
<b>L</b>	-	Interaktionsmatrix/Image-Jacobian Matrix
<i>P</i>	m	Punkt in 2D-Koordinaten
<b>P</b>	m	Punkt im Weltkoordinatensys. in homogenen Koordinaten
<b>Q</b>	-	Projektionsmatrix
<b>R</b>	-	Rotationsmatrix
<b>T</b>	-	Projektionsmatrix
<i>T</i>	-	Ersatzterm in Spindelantriebsberechnung
<i>X</i>	mm	Koordinaten im Bezugskordinatensystem
<i>X'</i>	mm	Koordinaten im einfach mitgedrehten Bezugskordinatensystem
<i>Y</i>	mm	Koordinaten im Bezugskordinatensystem
<i>Y''</i>	mm	Koordinaten im zweifach mitgedrehten Bezugskordinatensystem
<i>Z</i>	mm	Koordinaten im Bezugskordinatensystem

### Indizes und Abkürzungen

<b>Zeichen</b>	<b>Definition</b>
<i>c</i>	Bezug zum Kamerakordinatensystem
<i>cs</i>	Bezug zum Ladesystemkordinatensystem (charging station)
max	Maximum
min	Minimum
oIR	Ohne IR-Passfilter
ref	Referenz
<i>w</i>	Bezug zum Weltkordinatensystem
<i>A1, A2</i>	Längenbezug an Spindelaufhängung für Spindelantriebsberechnung
<i>AT</i>	Bezug zum AprilTag-Kordinatensystem
<i>B1, B2</i>	Längenbezug am Ellbogen für Spindelantriebsberechnung
<i>FM</i>	Bezug zum Kraftmessdosenkordinatensystem
<i>I</i>	Bezug zum Inletkordinatensystem
<i>M</i>	Bezug zum Markerkordinatensystem
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
ALanE	Automatisches Ladesystem für nachhaltige Elektromobilität
BRIEF	Binary Robust Independent Elementary Features
CCS	Combined Charging System
CNN	Convolutional Neural Network
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DOF	Degrees of freedom
DOPE	Deep Object Pose Estimation
FAST	Features from Accelerated Segment Test
FPS	Frames per second

---

<b>Zeichen</b>	<b>Definition</b>
LED	Light-Emitting Diode
IR-LED	Infrared-Light-Emitting Diode
NDDS	Nvidia Deep Learning Dataset Synthesizer
OEM	Original Equipment Manufacturer
ORB	Oriented FAST and Rotated BRIEF
PE	Protective Earth (Schutzleiter)
RGB	Rot, grün, blau (Grundfarben)
RPY	Roll-Pitch-Yaw
ROS	Robot Operating System
SIFT	Scale Invariant Feature Transform
SURF	Speeded-Up Robust Features
TCP	Tool Center Point
TPU	Thermoplastische Polyurethane
UE4	Unreal Engine 4
UR	Universal Robots
VS1	Erstes Visual Servoing
VS2	Zweites Visual Servoing

# 1 Einleitung

Weltweite politische Entscheidungen treiben die immer weiter ansteigenden Neuwagenverkäufe von Elektrofahrzeugen an. Neben der zunehmenden Anzahl an Elektrofahrzeugen und der stetigen Entwicklung der Antriebs- und Batterietechnik ist ein weiterer nicht zu vernachlässigender Aspekt die ansteigende Nachfrage an elektrischen Ladesäulen und einer funktionierenden Ladeinfrastruktur. Bislang ist es üblich, das Fahrzeug durch manuelles Einstecken eines Ladekabels konduktiv aufzuladen. Dabei ist die verwendete Ladesäule bis zu dem Zeitpunkt besetzt, an dem der Fahrzeughalter das Fahrzeug umparkt und den Stellplatz für das nächste Elektrofahrzeug zu Verfügung stellt. Um in Zukunft unwirtschaftliches Blockieren der Ladeinfrastruktur zu vermeiden, sind automatische Ladesysteme erforderlich. So können Elektrofahrzeuge autonom und priorisiert die Ladeinfrastruktur nutzen, ohne dass an jedem einzelnen Parkplatz eine zu Verfügung stehende Ladesäule zu installieren ist. Das automatische Laden ist zudem die Grundvoraussetzung für die Umsetzung des autonom fahrenden Fahrzeugs. Erst dann kann sich das Vehikel ohne jede zusätzliche menschliche Hilfe vollständig autonom bewegen.

Aus den genannten Gründen ist eine Entwicklung eines automatischen konduktiven Ladesystems erforderlich. Erste Entwicklungen und Untersuchungen werden bereits heute sowohl von *Original Equipment Manufacturers* (OEM) aus der Automobilindustrie als auch diversen Forschungseinrichtungen durchgeführt. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich zunächst mit den unterschiedlichen Ansätzen des mechanischen Aufbaus, der Prozedur des automatischen Einsteckens und den ersten Ergebnissen und Analysen. Aufbauend darauf wird die Entwicklung und Untersuchung eines neuen innovativen automatischen Ladesystems angestrebt. Dabei werden die Ziele einer Konzeptionierung und Umsetzung eines neuen mechanischen Aufbaus verfolgt, der im öffentlichen Raum eingesetzt werden kann. Des Weiteren umfasst die Entwicklung das Entwerfen einer Prozedur für das automatische Einstecken, die für den mechanischen Aufbau und die hier verwendete Strategie der Inleterkennung mit Infrarot-Markern zugeschnitten ist. Hierfür wird eine Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung sowohl mit aktiven Markern als auch mit passiven oder keinen zusätzlichen Markern im Arbeitsraum des Ladesystems angestrebt, um zum einen das hier entwickelte System bezüglich der Inleterkennung und Posenbestimmung zu analysieren und zum anderen weiteren Ansätzen qualitativ gegenüberzustellen. Um anschließend eine Aussage über einen möglichen Einsatz unter Realbedingungen des automatischen Ladesystems treffen zu können, sind Untersuchungen bezüglich unterschiedlicher Parksituationen und daraus resultierenden Inletposen erforderlich, sodass eine Beurteilung hinsichtlich Robustheit, Zuverlässigkeit und möglichen Problemindikatoren erstellt werden kann. Abschließend ist eine Handlungsempfehlung für das weitere Vorgehen in der Entwicklung von automatischen konduktiven Ladesystemen und dessen Standardisierung zu erarbeiten.

## 2 Stand der Technik

Der Bereich der Elektromobilität ist eine sich stetig weiterentwickelnde Thematik, welche durch die in aller Welt geführten politischen Diskussionen über den Klimawandel weiter beflügelt wird. Ein Teilbereich davon ist das Laden eines Elektrofahrzeugs, unabhängig ob PKW, Nutzfahrzeug oder kleinere Transportfahrzeuge in der Intralogistik. Unterschieden wird hierbei zwischen dem induktiven und dem konduktiven Ladeverfahren. Beim induktiven Laden erfolgt eine berührungslose Energieübertragung, bei der über die Primärspule, die beispielsweise im Boden verbaut wird, Wechselstrom in die Sekundärspule im Fahrzeug induziert wird [Kar15]. Beim konduktiven Laden, welches innerhalb dieser Arbeit ausschließlich betrachtet wird, wird das Fahrzeug über ein elektrisches Kabel mit der Ladestation verbunden. Auch wenn dieses Verfahren einen gewissen Aufwand, ob mittels menschlicher Muskelkraft oder durch einen maschinell bewegten *Connector*, erfordert, wird aufgrund hoher Kosten und der geringeren Ladegeschwindigkeiten beim induktiven Laden zumindest kurz- bis mittelfristig das konduktive Ladeverfahren bevorzugt in Betracht gezogen werden [Bun18]. Um das manuelle Ein- und Ausstecken des Ladekabels bzw. des Connectors zu automatisieren und somit gleichzeitig das Laden von autonom fahrenden Fahrzeugen erstmals zu ermöglichen, wird das Entwickeln eines Laderoboters innerhalb dieser Arbeit angestrebt. Diverse Prototypen wurden bereits entwickelt und werden im folgenden **Abschnitt 2.1** vorgestellt und näher erläutert. Zudem wird in **Abschnitt 2.2** näher auf das an der TU Dortmund durchgeführte Forschungsprojekt *ALanE* eingegangen und die erarbeiteten Ergebnisse und Probleme detailliert dargestellt, da das weitere Vorgehen teilweise auf den hier erlangten Ergebnissen aufbaut. Im Anschluss werden in **Abschnitt 2.3** erste veröffentlichte Untersuchungen bezüglich unterschiedlicher Methoden zur Inleterkennung erläutert und erste Ergebnisse aufgeführt. Um anschließend an die Inletlokalisierung einen Steckvorgang durchführen zu können, werden im darauffolgenden **Abschnitt 2.4** die Methoden der Posenbestimmung und die Grundlagen des Visual Servoings erläutert. Abschließend wird in **Abschnitt 2.5** die Open-Source Middleware „Robot Operating System“ vorgestellt, die für die Programmierung von Roboterkinematiken immer mehr eingesetzt wird.

### 2.1 Automatische konduktive Ladesysteme

Das Entwickeln erster Prototypen von Laderobotern wird derzeit stetig populärer. In diesem Abschnitt werden aktuelle Prototypen vorgestellt. Dabei werden die Konzepte in drei Kategorien eingeordnet. Die erste Kategorie umfasst gängige Industrieroboter mit mindestens sechs Freiheitsgraden, bei der die Laderoboter am Straßenrand positioniert werden können. Die zweite Kategorie charakterisiert mobile Ladesysteme, bei denen der Laderoboter mittels fahrbarem Unterbau zum stehenden Fahrzeug fährt und dort über einen geladenen Akku das Fahrzeug lädt. Die dritte Kategorie beinhaltet bionische Kinematiken.

## Kategorie 1

Das börsennotierte Unternehmen *Innogy SE* stellte bereits 2019 einen Laderoboter auf der Energiefachmesse *E-world energy & water* in Essen, Deutschland vor. Entwickelt wurde er im Rahmen eines Forschungsprojekts mit dem Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Duisburg-Essen [Inn19]. Wie in **Abbildung 2.1** dargestellt, wird hier ein am Boden oder auf einer fixierten Plattform montierter Industrieroboter verwendet. Dieser ist mit einer Sensorüberwachung zur Kraftbegrenzung ausgestattet und verwendet ein Kamerasystem, welches über eine Bilderkennung das Inlet sucht und erkennt. Der Ladestecker wird über ein Greifsystem aufgenommen und mittels Laderoboter zum Fahrzeug geführt. Das Fahrzeug muss sich demnach ausreichend genau im Arbeitsraum des Roboters positionieren, damit eine Kopplung stattfinden kann. [Inn19]

Als Anwendungsfall ist vor allem der Einsatz für Flottenbetreiber attraktiv, da der Personaleinsatz entfällt. Vorstellbar ist, dass das System Zugriff auf Personalpläne und eingetragene Pausen und Schichtwechsel hat, sodass die Flottenfahrzeuge zum richtigen Zeitpunkt geladen werden können. [Inn19]

An einem vergleichbaren Pilotprojekt arbeitet die Firma *Stable Auto* gemeinsam mit der Tochterfirma *Electrify America* von der Volkswagen AG, in dem das automatische Laden mit autonomen Fahrzeugen im Jahr 2020 erprobt wird [Schos]. Wie in **Abbildung 2.2** zu erkennen ist, wird der Laderoboter fest an einem Ort installiert, vergleichbar mit dem Laderoboter von *Innogy SE*. Auch hier wird ein Roboter mit mindestens sechs Freiheitsgraden verwendet, der über ein Kamerasystem am Kopf des Roboterarms verfügt. Die autonomen Fahrzeuge, die nach dem Positionieren lediglich die Ladeklappe öffnen müssen, sollen nach [Schos] mit einer Leistung von 150 kW geladen werden können.

Veröffentlichungen bezüglich des Ladevorgangs, der Steuerung, der notwendigen Steckkraft, der Robustheit etc. sind bezüglich dieser Prototypen bislang nicht bekannt.



**Abbildung 2.1:** Prototyp der Firma *Innogy SE*, ausgestellt auf der Messe E-World 2019 in Essen, Deutschland [Inn19]



**Abbildung 2.2:** Schnellladeeinrichtung des Unternehmens *Electrify America* aus dem Jahr 2019 [Ele19]

## Kategorie 2

Die zweite Kategorie umfasst Ladesysteme, bei denen sich das Lademodul zum Fahrzeug bewegt. Bereits im Jahr 2015 stellte der weltweit vertretene Automobilhersteller *Volkswagen AG* einen Laderoboter vor, der in dem Forschungsprojekt *e-smart Connect* in Kooperation mit dem Unternehmen *Kuka* entwickelt wurde. Wie in **Abbildung 2.3** zu sehen ist, wird der Manipulator LBR Iiwa von *Kuka* mit sieben Achsen verwendet. Der Roboterarm befindet sich auf einem verfahrbaren Unterbau, in dem die notwendige Elektronik verbaut ist. Der Wagen manövriert sich autonom im Raum mit Hilfe eines patentierten Radkonzepts *Omniwheels*. Somit steht das Fahrzeug still und der Laderoboter hat sich zu dem Vehikel zu positionieren. Dies erfolgt über eine eingebaute Kamera am Kopf des Laderoboters, die in Richtung des Ladesteckers positioniert ist. Die Umgebung wird somit um die Ladesteckdose gescannt und die Position relativ zum Roboter bestimmt. [Vol18]

Nach Till Reuter, damaliger CEO der Firma *Kuka*, gelten für Service-Roboter die gleichen Anforderungen an die Roboter wie bei einer Mensch-Roboter-Kollaboration in der Fabrik. Somit wird hier der Roboter an jeder Achse mit Drehmomentsensoren ausgestattet, um bei einer Störung sofort stoppen oder ausweichen zu können. Ein Anwendungsfall sollen Parkhäuser sein, bei denen der Passagier vor dem Parkhaus aussteigt und sich das Auto autonom im Parkhaus auf einem freien Parkplatz positionieren kann. Der Laderoboter *CarLa* kann dann dieses Fahrzeug aufsuchen und den Steckvorgang mit anschließendem Ladevorgang starten. [Vol18]

Ein weiteres Konzept mit einer mobilen Ladeeinheit ist der in **Abbildung 2.4** dargestellte Laderoboter, veröffentlicht von der *Samsung Group*. Auch hier fährt das mobile Ladesystem zum Roboter und positioniert sich vor dem parkenden Auto. Das Fahrzeug und der Laderoboter haben eine Steckvorrichtung, die unabhängig von den gängigen Steckern ist und die allein für diesen Vorgang entwickelt wurde. Die Roboterkinematik basiert auf einer linearen Steckbewegung mit einer elastischen Ausgleichseinheit am Verbinder (in dem veröffentlichten Video zu erkennen.) Hier wird nicht wie bei *CarLa* ein Industrieroboter verwendet, sondern eine eigens entwickelte Kinematik aufgeführt.



**Abbildung 2.3:** Laderoboter *CarLa* von der *Volkswagen AG* in Kooperation mit *Kuka* vorgestellt 2018 [Vol18]

**Abbildung 2.4:** Mobiler Laderoboter *EVAR* der *Samsung Group* aus dem Jahr 2018 [Mar18]

Auch hier wurden bislang keine konstruktiven Details oder Prozessabläufe, notwendige Genauigkeiten für die Steuerung oder auch Daten bezüglich der Robustheit, Wiederholgenauigkeit oder der benötigten Steckkraft veröffentlicht.

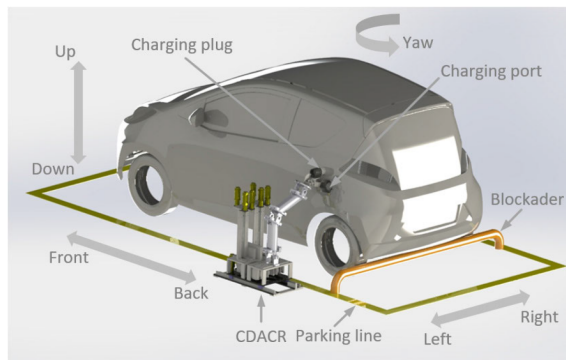
### Kategorie 3

Zu der dritten Kategorie gehören die bionischen Roboterkinematiken. Die Firma *Tesla Inc.* entwickelt eine schlangenartige Ladeeinheit, die in **Abbildung 2.5** dargestellt wird. Bislang gibt es keinerlei Veröffentlichungen oder technische Details, wie das System genau funktioniert. Als weiteres Beispiel kann der Laderoboter von [KUK20] aufgeführt werden, der an einen um  $90^\circ$  gedrehten Arm erinnert. Jedoch gibt es auch hier keinerlei Informationen zum Prozess oder der Bildverarbeitung.

Ein ähnliches schlangenartiges Konzept wird in **Abbildung 2.6** vorgestellt. Hier wird ein Laderoboter mit drei Freiheitsgraden (zwei translatorische und ein rotatorischer) mittels drei rotatorischen Gelenken auf einer beweglichen Plattform (Schienensystem parallel am Fahrzeug entlang) dargestellt, bei dem die Gelenkwinkel über mehrere Kabelzüge angesteuert werden. Insgesamt werden für den Arm sechs angetriebene Kabel beziehungsweise Antriebe und ein weiterer Aktuator für die Bewegung der Plattform benötigt. Somit sind insgesamt sieben Antriebe für drei translatorische und einen rotatorischen Freiheitsgrad anzusteuern. Um den fehlenden rotatorischen Freiheitsgrad  $\theta_{yaw}$  bei nicht parallelem Parken zum Roboter ausgleichen zu können, wird vorne am Stecker eine Ausgleichseinheit installiert, die nicht näher erläutert wird. [LD20]

Auch hier erfolgt der Steckvorgang mittels Bildererkennung. Durch das Detektieren des Inlets kann die Pose bestimmt werden, die sich aus Position und Orientierung zusammensetzt. Dabei besitzt die eingesetzte Posenerkennung eine Genauigkeit von  $0,25\text{ mm}$  und  $0,5^\circ$ . Für die Evaluierung des Ladesystems wurden diverse Tests mit der *CHAdEMO* Steckverbindung durchgeführt. [LD20]

Die Winkeländerung  $\theta_{pitch}$  am Fahrzeuginlet kann auftreten, wenn sich beispielsweise viel Last im Kofferraum des Fahrzeugs befindet und sich somit eine Winkelstellung zwischen der Inletorientierung und der Grundausrichtung des Roboters einstellt. Dieser zweite fehlende Freiheitsgrad wird innerhalb der Publikation nicht weiter betrachtet.



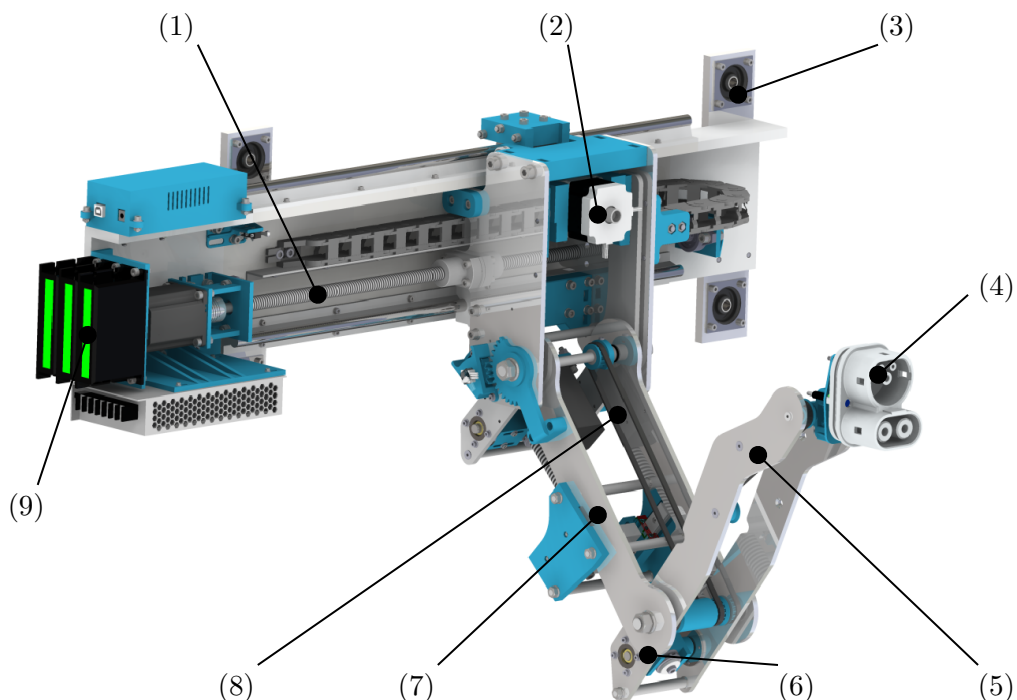
**Abbildung 2.5:** Schlangenartige Ladeeinheit von *Tesla Inc.* [BCJM16] **Abbildung 2.6:** Automatischer Laderoboter mit einer Kabelzugkinematik [LD20]



## 2.2 Forschungsprojekt ALanE

Im Zeitraum vom 01.10.2012 bis 30.09.2015 wurde am Fachgebiet Maschinenelemente der TU Dortmund das Forschungsprojekt *ALanE* in Kooperation mit der Arthur Bräuer GmbH & Co. KG und der Phönix Contact GmbH & Co. KG durchgeführt. Das Ziel war es, ein automatisches Ladesystem zur konduktiven Verbindung zwischen Fahrzeug und Ladestation zu entwickeln. Innerhalb dieses Projektes wurde eine Kinematik systematisch entworfen, die auf einer linearen Achse, zwei aktiven und einer passiven rotatorisch beweglichen Achse basiert. Wie in **Abbildung 2.7** dargestellt wird, befindet sich die lineare Achse (1) parallel zur Wandaufhängung (3) und ermöglicht es, den Laderoboter entlang der Fahrzeugseitenwand zu verfahren. Über einen Schrittmotor mit durchgeführter Spindel (2) in der Schultereinheit wird der Oberarm (7) über eine Blecheinheit rotatorisch bewegt. Der Unterarm (5) wird durch axiales Bewegen der Spindelmutter im Oberarm um den Ellbogen (6) rotatorisch verfahren. Der Connector (4) verfügt über keine aktive Bewegungsregelung, sondern ist über einen Synchronisationsriemen (8) im Ober- und Unterarm stetig gleichbleibend orientiert. Ist das Fahrzeuginlet geneigt oder das Fahrzeug parkt schräg, können Winkelabweichungen zwischen Connector und Inlet nicht aktiv korrigiert werden. Die Elektronik (9) befindet sich auf der linken Seite der Wandaufhängung, in der die Bahnplanung mittels einem kostengünstigen Mikrocontroller durchgeführt wird. [Kra14]

Da der Steckroboter lediglich drei translatorische und einen starr einstellbaren rotatorischen Freiheitsgrad bedienen kann, wurde eine Ausgleichseinheit entwickelt und anschließend patentiert [Patentnr.: DE: 10 2015 100 452.6]. Der Patentstatus ist jedoch erloschen. Die Ausgleichseinheit



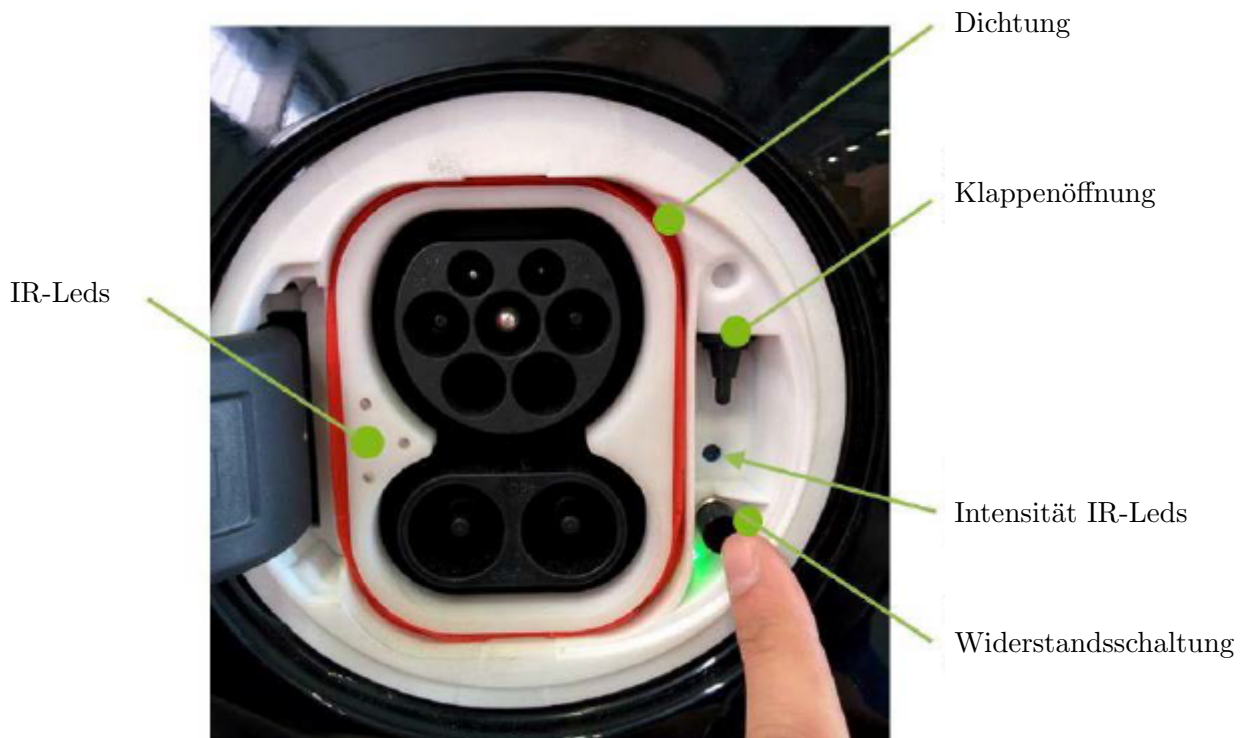
**Abbildung 2.7:** Laderoboter im Forschungsprojekt *ALanE* [Kra14]

(1) Lineare Achse, (2) Schultereinheit mit rotatorischer Achse für Oberarm, (3) Wandaufhängung, (4) Connector, (5) Unterarm, (6) Ellbogen, (7) Oberarm, (8) Synchronisationsriemen, (9) Elektronik

befindet sich vorne am Connector und gleicht über ein vorgespanntes Elastomer sowohl Winkel-  
fehlstellungen als auch axiale Abweichungen aus. Somit ist es möglich, mit einer geringen Anzahl  
an aktiv gesteuerten Achsen den Steckvorgang durchzuführen. [BF15]

Für die Steuerung des Roboters wird eine vereinfachte Bahnplanung auf dem Mikrocontroller  
implementiert, die mittels einer *Lookup-table* die Motorstellung für eine vordefinierte Anzahl an  
erreichbaren Punkten übergibt. Somit wird vorgegeben, mit welcher Kombination der einzelnen  
Motorstellungen ein definierter Punkt  $(X, Y, Z)$  im Arbeitsraum erreicht werden kann. Für den  
automatischen Steckvorgang wird in den Connector eine Kamera mit Infrarot-Passfilter ver-  
baut, die die im Rahmen des Projektes integrierten drei Infrarot-LEDs im auf der Fahrzeugseite  
verbauten Inlet erkennt. Durch die Auswahl der Wellenlänge im Infrarotbereich sollte die Bil-  
derkennung unempfindlicher gegenüber Lichtreflexionen werden und somit das System robuster  
machen. In **Abbildung 2.8** wird das im Forschungsfahrzeug integrierte und modifizierte Inlet  
dargestellt. Die Infrarot-LEDs sind linksseitig in definierter Position eingesetzt. Auf der rechten  
Seite des Inlets wird ein Stift für die automatische Klappenöffnung und eine Einstellmöglichkeit  
für die Intensität der Infrarot-LEDs installiert.

Mit Hilfe der Infrarotkamera im Connector, den LEDs im Inlet und der hinterlegten Bahnplanung  
konnte somit eine Steuerung entwickelt werden, die den Roboter selbstständig den Steckvorgang  
durchführen lässt. In **Abbildung 2.9** wird der Ablauf verdeutlicht. Nach der Bilderkennung (1)  
wird das Bild zunächst binarisiert (2). Anschließend wird der Schwerpunkt anhand der erkannten  
LEDs ermittelt und geprüft, ob diese Anordnung plausibel ist (3). Bei erfolgreicher Prüfung wird  
die erforderliche Bewegung von Connector zum Inlet rechnerisch ermittelt. Das Funktionsprin-



**Abbildung 2.8:** Inlet im Projekt *ALanE*

zip der Kinematik und das Verwenden einer Kamera im Stecker und Leuchtdioden am Fahrzeug wurde von der *PHOENIX CONTACT E-Mobility GmbH* zum Patent [KK21] angemeldet.

Für die eigentliche Regelung wird ein bildbasierter visual Servoing Ansatz gewählt. Hierfür werden zunächst die detektierten Mittelpunkte der Infrarot-LEDs in Bildkoordinaten  $u$  und  $v$  mit  $\mathbf{m}_i = [u_i, v_i]^\top$  mit  $i = 1, 2, 3$  beschrieben [WBRB15]. Mithilfe der intrinsischen Kameraparameter können die Punkte  $\mathbf{m}_i$  mit Hilfe der Gleichung

$$\mathbf{p}_i = \begin{pmatrix} \frac{(u_i - u_0) \cdot l_x}{F} \\ \frac{(v_i - v_0) \cdot l_y}{F} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

in das Sensorkoordinatensystem mit  $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i]^\top$  überführt werden. So kann über die Differenz zwischen erkannten LEDs  $\mathbf{m}_i$  und dem Bildmittelpunkt in Pixeln  $(u_0, v_0)$  die Position im Bild bestimmt werden kann. Die Parameter  $F$  und  $l_x, l_y$  sind dabei die Brennweite und die Pixeldimensionen. Um eine Regelung durchführen zu können, wird eine Referenz benötigt. Hierfür werden die Referenzmittelpunkte der LEDs in  $\mathbf{p}_{i,\text{ref}}$  definiert. Somit kann eine Regeldifferenz  $\mathbf{e}$  zwischen den detektierten LEDs  $\mathbf{p}_i$  und den Referenzpunkten nach

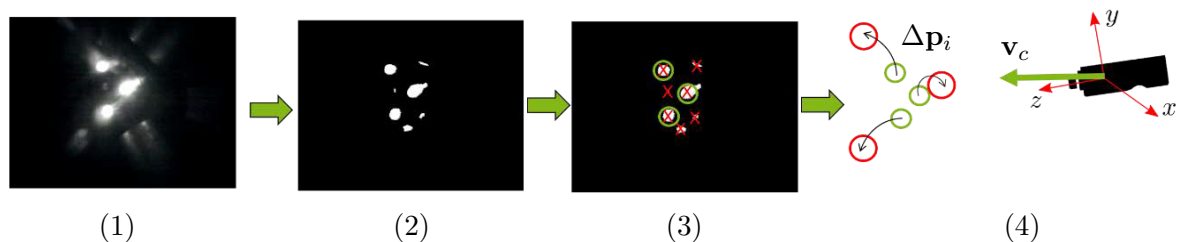
$$\mathbf{e} = \Delta \mathbf{p} = \sum_{i=1}^3 (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i,\text{ref}}) \quad (2.2)$$

aufgestellt werden [WBRB15]. Geregelt wird anschließend mit der zielmäßigen Minimierung der Differenz  $\mathbf{e}$ . Die erforderlichen translatorischen Geschwindigkeiten  $\mathbf{v}_c$  des Roboters im Kamerakoordinatensystem werden abschließend unter der Annahme  $\Delta \dot{\mathbf{p}} = \lambda \Delta \mathbf{p}$  mittels

$$\mathbf{v}_c = -\lambda \widehat{\mathbf{L}}^+ \Delta \mathbf{p} \quad (2.3)$$

berechnet [WBRB15].  $\lambda$  ist dabei ein Proportionalfaktor, mit dem die Geschwindigkeit linear erhöht oder verlangsamt werden kann.  $\widehat{\mathbf{L}}^+$  ist eine Approximation der Pseudo-Inversen der Interaktionsmatrix. Dieser Ansatz des *Visual Servoings* stammt aus [CH07] und wird in Abschnitt 2.4 näher beschrieben.

Für die Regelung können lediglich die translatorischen Freiheitsgrade betrachtet werden, weil die Roboterkinematik nur diese zur Verfügung hat. Da die Orientierung nicht berücksichtigt wird,



**Abbildung 2.9:** Bildverarbeitung im Projekt *ALanE*

(1) Infrarot-Bild, (2) Binarisieren, (3) Schwerpunktsberechnung und Plausibilitätscheck, (4) Roboterbewegung

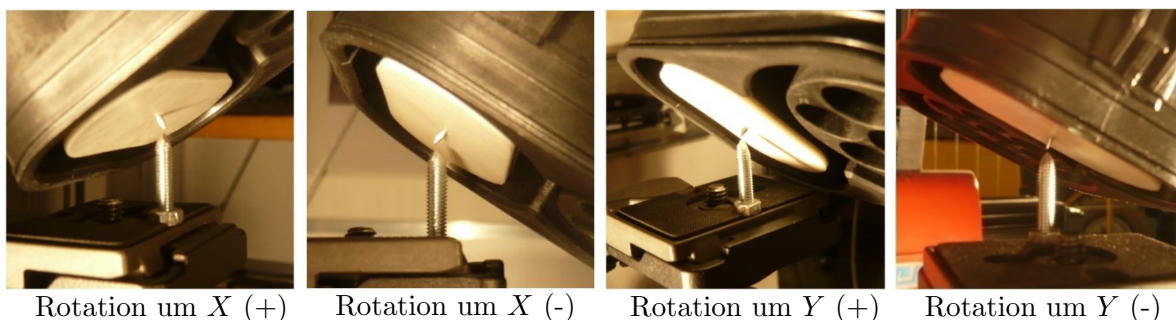
wird hierbei keine Pose berechnet, sondern lediglich die relative Position zwischen Kamera und den LEDs. Der Abstand zwischen Inlet und der Kamera wird über die bekannte Anordnung der LEDs geschätzt. [WBRB15]

Die Projektergebnisse zeigen, dass die Roboterkinematik mit lediglich drei aktiv gesteuerten translatorischen Freiheitsgraden einen Steckvorgang durchführen kann. Versuchsreihen oder Ergebnisse zum Steckverhalten, zur Wiederholgenauigkeit oder auch bezüglich der Robustheit sind nicht vorhanden. Es wird jedoch die hohe notwendige elastische Nachgiebigkeit des Roboterarms und dessen Aufhängung als problematisch erachtet. Bei Fahrzeuginlets, die in der Längsachse des Autos nach oben oder unten geneigt sind, kann der Laderoboter aufgrund von fehlender Winkeleinstellung und fehlender Berechnung der Orientierung lediglich horizontal nach vorne stecken. Somit müssen Winkelabweichungen durch einen höheren Kräfteinsatz und eine hohe elastische Nachgiebigkeit kompensiert werden. Zudem wird die Kinematik nicht kraftbegrenzt und wird somit während des Steckens durch eine Kollision mit Gegenständen oder sogar einem Lebewesen nicht automatisch gestoppt. Bei einer solchen Scherenkinematik kann dies zu Verletzungen führen.

### Fangraumanalyse

Im Rahmen des Forschungsprojektes und einer zugehörigen fachwissenschaftlichen Arbeit [Ber15] wird eine Fangraumanalyse bezüglich des CCS Combo 2 Steckers nach IEC 62196 durchgeführt. Dabei wird untersucht, in welchem translatorischen und rotatorischen Bereich einer Abweichung zwischen Stecker und Inlet ein Stecken dennoch möglich ist. Hierfür wird eine kardane Aufhängung für das Inlet verwendet, in das ein Industrieroboter mit montierter Kraftmessdose und einem CCS Inlet linear auf den Stecker zufährt. Die federnd gelagerte kardanische Aufhängung ermöglicht einen unabhängigen Ausgleich aller drei Rotationsachsen um einen definierten Punkt. In **Abbildung 2.10** sind die einzustellen Rotationen dargestellt, die um den Mittelpunkt zwischen den beiden DC-Kontakten drehen.

Für die Fangraumanalyse wurden zunächst Grenzwerte ermittelt, die in **Tabelle 2.1** dargestellt werden. Diese beziehen sich zu Beginn auf eine unabhängige Analyse der Grenzwerte ohne jegliche Wechselwirkungen. Anhand eines ersten Versuchsplans wurden die Grenzwerte aufgrund der



**Abbildung 2.10:** Untersuchte Abweichungen in der Fangraumanalyse [Ber15]

Wechselwirkungen erkannt durch mehrfach unerfolgreiche Steckversuche, auf die Zielgrößen in **Tabelle 2.2** reduziert. Mit Hilfe dieser Grenzwerte wurde ein statistischer Versuchsplan erstellt und durchgeführt und dabei die notwendige Steckkraft  $F_Z$  untersucht.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe zeigen, dass Abweichungen bei einer Rotation um die  $X$ -Achse einen mehrfach größeren Einfluss auf die Steckkraft aufweisen als Rotationsabweichungen um die  $Y$ - oder auch die  $Z$ -Achse. Dies ist auf die asymmetrische Steckerform zurückzuführen. Die Steckgeschwindigkeit hat dabei keinen signifikanten Einfluss auf die Steckkraft. [Ber15]

**Tabelle 2.1:** Ermittelte Grenzwerte der möglichen nicht korrelierenden Abweichungen [Ber15]

Abweichung	Positive Richtung	Negative Richtung
Verschiebung in $X$ -Richtung [mm]	4	-6
Verschiebung in $Y$ -Richtung [mm]	6	-6
Verdrehung um $X$ -Achse [°]	16	-19
Verdrehung um $Y$ -Achse [°]	20	-20
Verdrehung um $Z$ -Achse [°]	11	-11

**Tabelle 2.2:** Ermittelte und untersuchte Grenzwerte bei korrelierenden Abweichungen [Ber15]

Abweichung	Positive Richtung	Negative Richtung
Verschiebung in $X$ -Richtung [mm]	3	-5
Verschiebung in $Y$ -Richtung [mm]	5	-5
Verdrehung um $X$ -Achse [°]	13	-7,6
Verdrehung um $Y$ -Achse [°]	17	-17
Verdrehung um $Z$ -Achse [°]	9	-9

Anhand der Ergebnisse dieser Fangraumanalyse können Anforderungen bezüglich der translatorischen und rotatorischen Genauigkeit für das automatische Stecken erarbeitet werden. Unter Berücksichtigung der ermittelten Kraftniveaus und der Anzahl an Fehlversuchen können Rückschlüsse für die Kinematik und die Bilderkennung beziehungsweise der Posenbestimmung gezogen werden.

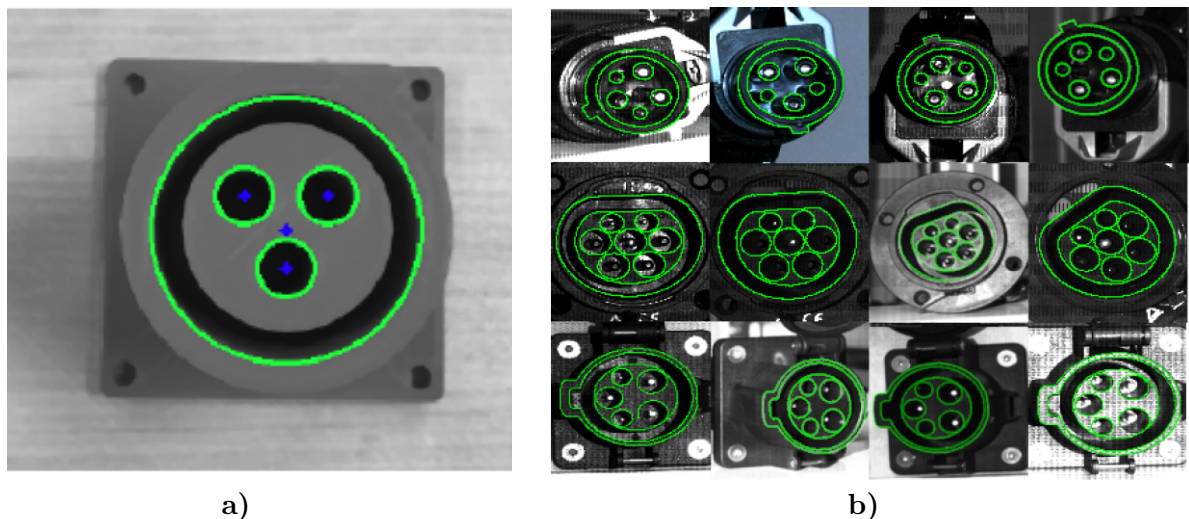
## 2.3 Unterschiedliche Ansätze der Inleterkennung

Für ein automatisches Ladesystem ist es erforderlich, dass die Position und Orientierung zwischen Stecker und Inlet bekannt ist. Somit hat eine Inleterkennung und eine relative Posenberechnung stattzufinden. Dies kann mit Hilfe unterschiedlicher Strategien durchgeführt werden. Im Folgenden werden drei Strategien und die möglichen Verfahren und Methoden zur Inleterkennung vorgestellt, die bereits anhand unterschiedlicher Ladesysteme untersucht wurden. Dabei werden im einzelnen Ansätze zur Objekterkennung und Bildverarbeitung vorgestellt, die analog auch bei einer anderen Strategie zur Inleterkennung eingesetzt werden können. Diese werden hier jedoch anhand eines Beispiels vorgestellt. Innerhalb dieses Abschnittes wird sich dabei auf die reine Erkennung beschränkt, während die darauffolgende Posenberechnung im Anschluss näher erläutert wird.

### 2.3.1 Ohne Marker

Als erste Strategie kann das Erkennen des Inlets ohne jegliche Markierungen oder Modifizierungen am Inlet aufgeführt werden. Dies hat den wesentlichen Vorteil, dass keine hardwaretechnischen Umbauten oder Adaptionen am Fahrzeug durchgeführt werden müssen und allein durch eine Bilderkennung eine Erkennung des Inlets und dessen Posenbestimmung durchgeführt werden kann. Zudem kann jedes bestehende Fahrzeug ohne Umrüsten für das automatische Laden eingesetzt werden. In **Abbildung 2.11 a)** wird beispielsweise ein solches Vorgehen dargestellt, bei dem die kreisförmigen Geometrien mit Hilfe der Hough-Transformation (s. YPDK89) erkannt werden und mit Hilfe eines Feature basierenden Template Matchings mit der Zielgeometrie verglichen werden [BDF<sup>+</sup>19]. Hierbei werden die Kanten in einem Referenzbild des Inlets detektiert. Im Anschluss werden diese mit den gefundenen Kanten im Kamerabild verglichen und nach der größten Übereinstimmung gesucht [BDF<sup>+</sup>19]. Die Kamera befindet sich dabei oberhalb des Steckers am automatischen Ladesystem. Eine Analyse bezüglich der Funktionserfüllung oder der Robustheit der Bilderkennung oder auch diverser Steckversuche wird innerhalb der Veröffentlichung [BDF<sup>+</sup>19] nicht aufgeführt.

Wie beschrieben, wird ein Template Matching zur Detektierung des Inlets verwendet. Das Template Matching ist eine Bildverarbeitung, bei der in einem Bild nach Bereichen oder Merkmalen gesucht wird und anschließend diese mit einem Template verglichen werden [Bru09]. Unterschieden wird dabei zwischen dem *Feature basierenden Template Matching* ([Low04], [LLF05]), dem *Template basierenden Template Matching* ([LK81]), dem *Linien basierenden Template Matching* ([Bou89]) und dem *hybriden Template Matching* ([PM05], [VLF04], [LBN07]). Die beiden ersten genannten Methoden werden hauptsächlich eingesetzt. Sie werden im Folgenden kurz näher erläutert.



**Abbildung 2.11:** Inleterkennung ohne Marker

- a) Inlet Detektion mittels Hough-Transformation und einem Template-Matching [BDF<sup>+</sup>19]  
 b) Inlet Detektion mittels Template Matching und automatisch erzeugten Templates [MRW<sup>+</sup>17]

Beim Feature basierenden Template Matching werden markante Bildbereiche/-punkte wie beispielsweise Punkte, Kurven, Kanten etc. aus einem Referenzbild (Template) extrahiert und diese mit dem zu untersuchenden Eingangsbild abgeglichen [HAGF16]. Dabei ist es das Ziel, die erkannten Merkmale paarweise sowohl im Referenzbild als auch im Kamerabild korrekt zuzuordnen. Mithilfe verschiedener Methoden wird eine Merkmalzuordnung als richtig bestimmt oder nicht weiter berücksichtigt [HAGF16]. Gängige Methoden zum Extrahieren der Merkmale sind beispielsweise die *Fast*-Methode (Features from accelerated segment test) nach [RD05], die *SIFT*-Methode (Scale Invariant Feature Transform) nach [Low04] und die *SURF*-Methode (Speed up Robust Feature) nach [BETv08]. Die SIFT- und die SURF-Methode sind nach [MB17] die geeignetsten Ansätze, da diese beständiger gegenüber Skalierung, Rotation, Translation, Beleuchtung und Unschärfe sind. Die SIFT-Methode wird als sehr effizient für die Objekterkennung bewertet, jedoch ebenfalls als rechenintensiv besonders bei Echtzeitanwendungen deklariert [KPS17]. Die SURF-Methode ist eine Approximierung der SIFT-Methode, welche schneller als die SIFT-Methode agiert und dabei keine wesentlichen Qualitätseinbußen verzeichnet [KPS17]. Als Alternative von SIFT und SURF ist die ORB-Methode mitzubetrachten, die nach [KPS17] vergleichbare Ergebnisse erzielen kann.

Das Template basierende Template Matching (auch *Pattern Matching* genannt) charakterisiert die Aufgabe, das Bildmuster aus dem Referenzbild (Template) in einem Bild zu suchen und zu finden [OTM<sup>+</sup>11]. Übereinstimmungen werden auf der Grundlage der Pixel-Intensitätswerte (Graustufenbild: 1 Wert, RGB-Bild: 3 Werte) von Bild und Vorlage geschätzt. Basismethoden wie das *Naïve Template Matching* oder die Methoden des *Image Correlation Matching* sind anfällig für Rotationen und Skalierungen, was zu Ungenauigkeiten und Problemen in der Erkennung führen kann [HAGF16]. Nach [HAGF16] sollte das Feature basierende Template Matching bei Anwendungen mit hauptsächlich strukturellen Informationen und charakteristischen Merkmalen bevorzugt werden, während das Template basierende Vorgehen bei Übereinstimmungen über die Intensitätsinformationen wie Graustufen bessere Ergebnisse erzielen kann.

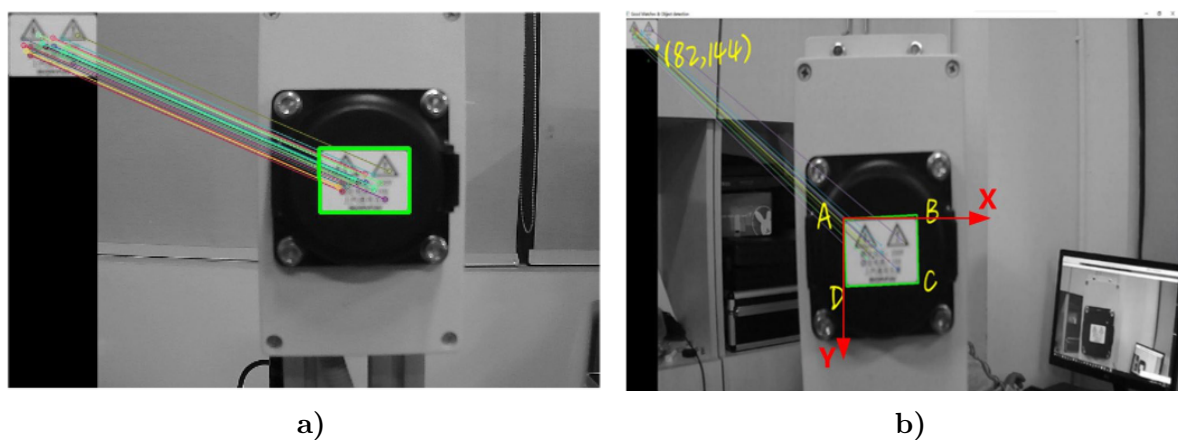
In einem weiteren Anwendungsbeispiel, das in **Abbildung 2.11 b)** dargestellt wird, ist ebenfalls ein Template Matching zu erkennen, welches mit Hilfe der kostenpflichtigen Software *MVTec HALCON* [MVT] durchgeführt wird [MRW<sup>+</sup>17]. Dabei wird ein Modell (*Template*) anhand der Kreiskonturen erstellt und dieses in unterschiedlicher Skalierung gespeichert. Für die Bildverarbeitung wird eine stereoskopische Bildaufnahme verwendet, bei der zwei nebeneinander angebrachte Optiken genutzt werden. Somit wird eine dreidimensionale Fotografie ermöglicht. Es werden die  $x$ - und  $y$ -Koordinaten in den Kamerabildern  $(x_1, y_1)$  und  $(x_2, y_2)$  bestimmt, mit denen das Inlet mithilfe der Kamerabrennweite im Weltkoordinatensystem lokalisiert werden kann. Die Kameras sind hierbei seitlich von der automatischen Ladevorrichtung montiert. Es ist die relative Position zwischen Roboter beziehungsweise Stecker und dem Inlet mithilfe der fünf bis sieben Referenzpunkte im Inlet zu berechnen. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass ein Erkennen des Inlets bei Winkelstellungen von bis zu  $45^\circ$  bezogen auf die Kameraorientierung funktioniert. Die Erkennung wird limitiert bei schwachen Lichtverhältnissen und bei Reflektionen. Bei den Steckversuchen können vermehrte Ausrichtungsfehler (innerhalb der Versuchsreihe zu 50%) festgestellt werden. [MRW<sup>+</sup>17]

In [QLL<sup>+</sup>21] wird eine Bildverarbeitung entwickelt, die ebenfalls keine zusätzlichen Marker am Inlet benötigt. Mithilfe einer Kombination aus den Algorithmen *Hough Circle* [GL99] und *Hough Line* [DH72] werden die Positionsinformationen des Inlets aus dem Bild gewonnen. Durch mehrere Optimierungen und eine anschließende Posenbestimmung können bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen (Indoor, Outdoor, sonnig, bewölkt und bei Nacht) Genauigkeiten im Durchschnitt von  $(X, Y, Z, R_X, R_Y, R_Z)$  0,6 mm, 0,83 mm, 1,23 mm und  $1,19^\circ, 0,97^\circ, 0,5^\circ$  erreicht werden. Nach [QLL<sup>+</sup>21] treten Fehler in der Erkennung vor allem bei inhomogener Beleuchtung wie beispielsweise bei starker Sonneneinstrahlung im Außenbereich ein. Bei flachen Einstrahlwinkeln des Lichtes entstehen Schatten im Inlet, was zu Unbestimmtheiten in der Bildverarbeitung führt. Zudem wird auf die Bedeutung der Kameraauflösung und der Kamerakalibrierung hingewiesen. Bei einer geringen Auflösung der Kamera oder einer unzulänglichen Kalibrierung treten ebenfalls nicht zu vernachlässigende Abweichungen in der Posenbestimmung auf.

Durch die stetig zunehmende Rechenleistung wird das Verwenden von künstlichen neuronalen Netzen in der maschinellen Bildverarbeitung zunehmend attraktiver. [PSLW20] zeigt, dass mithilfe eines *convolutional neural network (CNN)* das Inlet bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen zuverlässig erkannt werden kann, auch wenn bei sowohl sehr starker (10000 lux) als auch sehr schwacher (500 lux) Beleuchtung Probleme bei der Erkennung des Inlets auftreten. Die Pose wird nach dem Erkennen des Inlets mithilfe einer Feature basierenden Detektion bezogen auf fünf kreisförmige Markierungen am Inlet durchgeführt.

### 2.3.2 Passive Marker

Eine weitere Möglichkeit zur Inleterkennung ist das Verwenden von passiven Markern. Da die meisten Inlets aus einem farblich homogenen schwarzen Kunststoff hergestellt werden und zu meist keine Texturen für ein einfaches Feature basierendes Template Matching aufweisen, ist es vor allem für monokulare Kamerasysteme erschwert, die Position und Orientierung des Inlets zu detektieren und zu bestimmen [LCHL19]. Aus diesem Grund verwendet beispielsweise [LCHL19] ein rechteckiges Label, welches auf die seitlich drehbar öffnende Abdeckkappe des AC-Inlets ge-



**Abbildung 2.12:** Inletlokalisierung mit Hilfe eines passiven Markers [LCHL19]

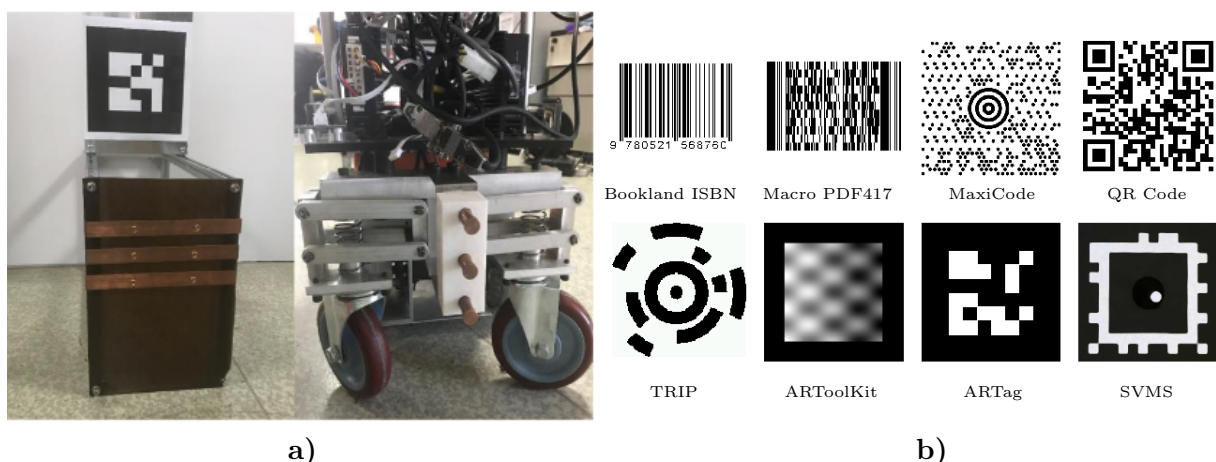
- a) SURF-Algorithmus (Feature basierendes Template Matching)
- b) Posenbestimmung durch P4P Algorithmus



klebt wird. Wie in **Abbildung 2.12 a)** dargestellt, klebt das Label mit diversen Features wie Schriften, Zeichen etc., die mit Hilfe eines Feature basierenden Matchings detektiert werden können. Hier wird der zuvor bereits vorgestellte SURF-Algorithmus verwendet. Wie in **Abbildung 2.12 a)** zu erkennen ist, umfasst das Template (oben links) das Label, was zu einer Übereinstimmung im Bild anhand mehrerer Feature-Points führt. Sobald das Label detektiert wird, werden die vier Eckpunkte des Rechtecks extrahiert. In **Abbildung 2.12 b)** werden die Eckpunkte mit A, B, C und D beschrieben. Mit Hilfe der vier Punkte wird ein  $PnP$ -Algorithmus (wird im folgenden Kapitel näher beschrieben) verwendet, um die Pose zwischen dem Label und der Kamera am Roboter zu berechnen.

Die Strategie des Steckens umfasst in diesem Beispiel neben dem eigentlich Einstecken des Steckers auch das Öffnen der Abdeckkappe. Somit erkennt der Roboter die Pose des Inlets anhand der Abdeckkappe, öffnet diese und steckt anschließend ein. Erste Versuche zeigen, dass die Inletlokalisierung unter Laborbedingungen geeignet funktioniert und dass wiederholbar eingesteckt werden kann [LCHL19]. Innerhalb erster Experimente ist jedoch der Neigungswinkel der Abdeckung bekannt, sodass lediglich translatorisch im Kamerakoordinatensystem bezogen auf die Label-Erkennung geregelt werden muss.

Eine weitere Möglichkeit zur Erkennung und Posenbestimmung eines Objektes mit passiven Markierungen ist das Verwenden von sogenannten *fiducial marker systems* wie beispielsweise *AprilTags*, was in [GG17] anhand eines mobilen Roboters in einem Warenhaus beschrieben wird. Mithilfe einer monokularen Kamera am Roboter kann die Markierung erkannt werden und Position und Orientierung können bestimmt werden. In **Abbildung 2.13 a)** wird der Aufbau des mobilen Roboters und der Ladestation mit einem AprilTag dargestellt. Das AprilTag System ist als Open Source Lizenz frei verfügbar und beinhaltet einen quadratischen visuellen Marker [Ols11]. In **Abbildung 2.13 b)** werden diverse weitere fiducial marker systems dargestellt. *ARToolKit* ist nach [KB99] eines der ersten Systeme und nutzt einen schwarzen Rahmen für eine robuste Erkennung. *TRIP* nach [IMH02] nutzt kreisförmige schwarze Markierungen.



**Abbildung 2.13:** Posenbestimmung mithilfe von Framemarkern

a) Ladestation mit AprilTag und Laderoboter [GG17]

b) Diverse Framemarkersysteme (engl. fiducial markers systems) [XD11]

*ARTag* nach [Fia05] ist ebenfalls ein häufig eingesetztes System und robust bei verschiedenen Lichtverhältnissen. In einem Vergleich nach [SSS<sup>+</sup>17] ist das AprilTag System im Vergleich zu den Systemen ARTag und dem CALTag robuster bei verschiedenen Lichtverhältnissen und funktioniert besser bei Verdeckungen.

Ein Beispiel für das Verwenden eines QR-Codes für das automatische Laden wird von [Tar17] beschrieben. Hierbei wird ein UR10 Roboter der Firma *Universal Robots, Dänemark* als Manipulator verwendet, der mithilfe einer montierten Kamera und einem QR-Code am Inlet automatisch einsteckt. Der Anwendungsfall ist das Laden eines Busses, an dem der fiducial marker an der Dachkante oberhalb des Inlets angebracht wird. Die Größe des QR-Codes wird nicht angegeben. Eine erste Testreihe zeigt, dass von 22 Versuchen 21 Mal erfolgreich eingesteckt werden kann. Informationen über Steckkräfte oder die Lichtverhältnisse sind nicht bekannt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass es zu Erkennungsproblemen bei weiterer Entfernung oder Beleuchtungsabweichungen kommen kann. Als vergleichbares Konzept kann [Har21] aufgeführt werden. Es wird ebenfalls ein fiducial Marker verwendet, der die Lokalisierung des Ladeinlets für einen autonom fahrenden mobilen Roboter (UR10) mit Kamera ermöglicht. Auch hier wird ein erfolgreiches Einstecken bei neun von zehn Versuchen erreicht.

Neben dem Verwenden von Aufklebern mit Schriften etc. oder von fiducial marker systems besteht die Möglichkeit, RFID Chips zur Lokalisierung zu nutzen. In [HBS<sup>+</sup>15] wird das Elektrofahrzeug von unten geladen und mit zwölf RFID Chips an der Unterseite bestückt. Mithilfe eines RFID Card readers am beweglichen Ladesystem am Boden können die RFID Chips detektiert und eine Position und Orientierung bestimmt werden.

### 2.3.3 Aktive Marker

Die dritte Strategie beschreibt das Verwenden von aktiven Markern wie beispielsweise LEDs. Innerhalb dieser Arbeit werden Markierungen oder Adaptionen zur Posenbestimmung als aktiv bezeichnet, wenn diese ein- und ausgeschaltet werden können. Ein Beispiel für das Verwenden von aktiven Markern ist das Bestimmen der Inletposition anhand der Infrarot-LEDs im Pro-

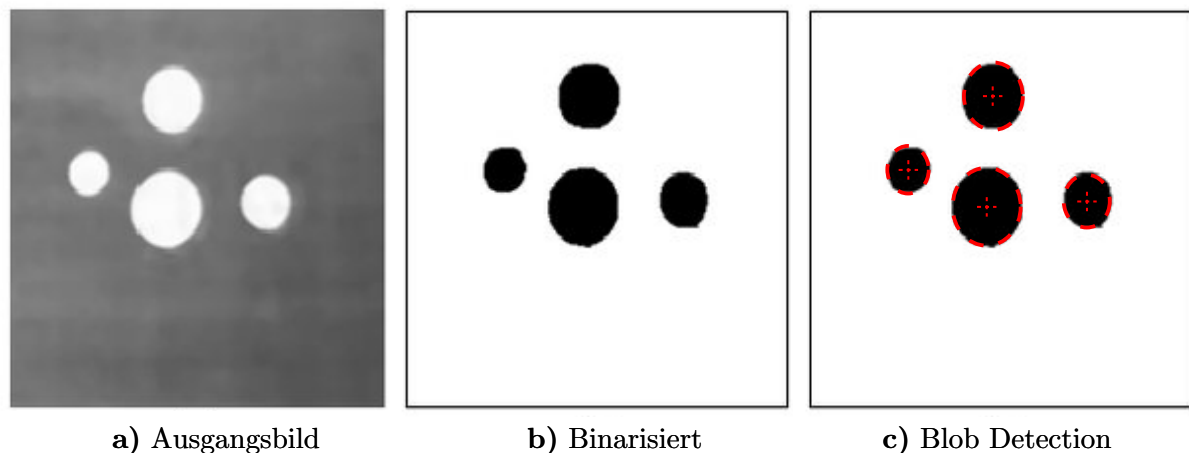


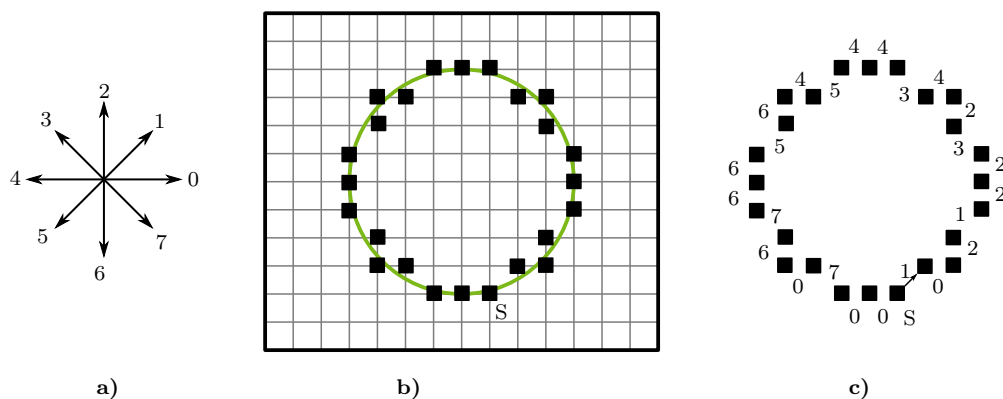
Abbildung 2.14: Binarisieren (a) & b) [SAL09] und Blob Detection c)

jekt *ALanE*, welches in Abschnitt 2.2 vorgestellt wird. Das Inlet am Fahrzeug wird mit drei IR-LEDs modifiziert, sodass während des Ladeprozesses mithilfe einer Bilderkennung die Markierungen detektiert werden können. Hierfür wird eine Kamera mit Infrarot Passfilter eingesetzt, um größtenteils die Wellenlänge wahrzunehmen, die von den IR-LEDs ausgestrahlt wird. Innerhalb des Projektes wird das Bild binarisiert und die Markierungen werden wie folgt detektiert.

Ein Beispiel für ein binarisiertes Bild wird in den **Abbildungen 2.14 a)** und **b)** dargestellt. Ein wesentlicher Vorteil des Binarisierens ist, dass zum einen deutlich weniger Speicherkapazität benötigt wird und zum anderen sich Konturen voneinander deutlicher abgrenzen und somit eine Kantenerkennung erleichtert wird. [Nik11]

**Abbildung 2.14 c)** zeigt die Detektierung der vier Blobs im binarisierten Bild. Eine Möglichkeit zur Detektierung der Blobs ist die Kontur-Detektion einer Pixelgruppe mit gleichen Eigenschaften in einem binarisierten Bild, um die Blob Charakteristiken wie beispielsweise Position und Größe zu bestimmen. Durch das Binarisieren findet eine Gruppierung der Pixel durch die Abstufung in schwarz oder weiß statt. Das Auffinden der Konturen und somit auch der Blobs kann mit Hilfe des Algorithmus des *Freeman-Chain-Code's* [Fre61] durchgeführt werden. Hierbei wird der zu untersuchende Bereich neu unterteilt (Bei zu hoher Auflösung besteht die Gefahr, bei direkter Pixelbetrachtung zu viel Speicher zu benötigen). Von einem Startpunkt entlang der Kontur wird durch Betrachten der schwarz/weiß-Werte eine Zahlenabfolge definiert. In **Abbildung 2.15** wird das Konzept anhand eines Beispiels verdeutlicht. In **a)** werden die acht Orientierungen dargestellt, die für die Beschreibung des Konturverlaufs in **b)** des Kreises vom Startpunkt S gegen den Uhrzeigersinn angewendet werden. In **c)** werden die ermittelten Orientierungen aufgeführt, was zu einem Verlauf von: 102122324344546566760700 führt.

Eine Alternative zur Modifizierung des Inlets ist das Anbringen eines LED-Musters an der Ladestation und das Verwenden einer Kamera am Fahrzeug. Nach [PBAN12] und [PNL<sup>+</sup>13] wird ein Verfahren entwickelt und untersucht, bei dem das autonom fahrende Fahrzeug sich selbst zur Ladestation positioniert und andockt. Erste Simulationen und Experimente zeigen, dass das Verfahren als funktionsfähig einzustufen ist, jedoch in mehreren Aspekten weiter zu erforschen ist.



**Abbildung 2.15:** Beispiel für *Freeman chain Code* nach [Ban09]

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Ansätze zur Inleterkennung vorgestellt. Dabei wurde im Detail darauf eingegangen, welche Möglichkeiten bestehen und in welchen Bereichen diese bereits angewendet wurden. Das Verwenden von aktiven Markern ist bisher am wenigsten untersucht. Zudem liegt insgesamt keine Gegenüberstellung hinsichtlich Genauigkeit, Robustheit bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen oder anderen Randbedingungen der einzelnen Strategien vor, was das Normen und Standardisieren des automatischen Ladens von Elektrofahrzeugen erschwert. Innerhalb dieses Abschnitts wurde sich dabei auf die Erkennung des Inlets oder der Markierungen begrenzt. Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wie anschließend eine relative Pose zwischen Kamera und Objekt ermittelt wird und wie sich daraufhin der Laderoboter dazu entsprechend zu einer Zielpose positioniert.

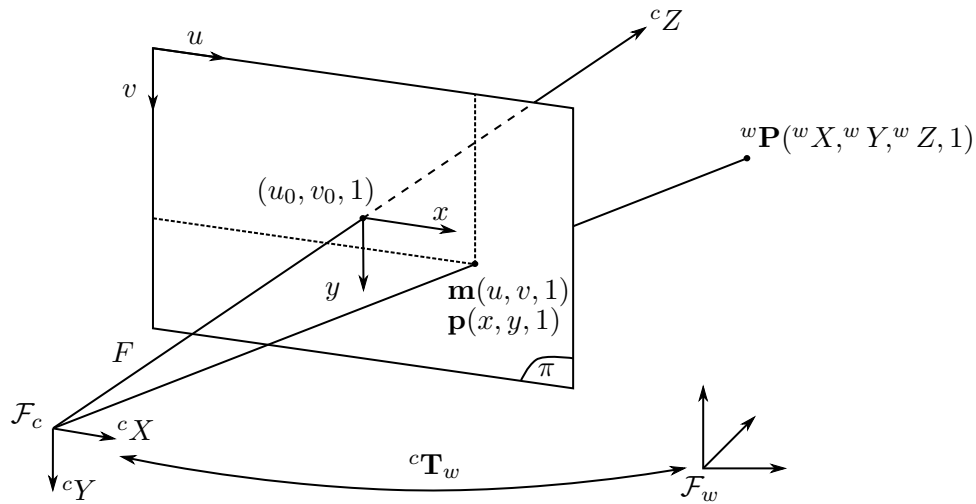
## 2.4 Posenbestimmung und Visual Servoing

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, kann das Inlet unterschiedlich erkannt werden. Um den Laderoboter zum Inlet zu bewegen und den Stecker einstecken zu können, ist es erforderlich, die Pose (Position und Orientierung) von Kamera zum Inlet beziehungsweise Laderoboter zum Inlet zu bestimmen. Im folgenden **Abschnitt 2.4.1** wird näher auf die verschiedenen Methoden der Posenbestimmung eingegangen. Anschließend wird in **Abschnitt 2.4.2** aufgeführt, wie mit Hilfe verschiedener Ansätze des *Visual Servoings* der Laderoboter zur Steckposition und Steckerorientierung geführt werden kann.

### 2.4.1 Posenbestimmung

Die Posenbestimmung der Kamera bezüglich eines Zielobjektes wird bereits in einem weitläufigen Umfang erforscht [ASMG20]. Sie ist in Bereichen wie beispielsweise der Kamerakalibrierung [RSO13], dem Visual Servoing [PLH<sup>+</sup>18] oder auch bei der immer mehr eingesetzten Augmented Reality (AR) erforderlich [DBCK13]. Für die Umsetzung der Posenbestimmung gibt es verschiedene Ansätze. Die vorliegende Arbeit betrachtet ausschließlich Methoden, bei denen die Pose mit sechs Freiheitsgraden (6-DoF) mit einem Monokular bestimmt wird. Die Tiefe, die bei Stereoptiken beispielsweise mittels Triangulation ermittelt werden kann, wird hierbei über einen Skalierungsansatz mittels der geometrischen Beziehungen zwischen dem vorgegeben Zielobjekt und den erkannten Merkmalen im Bild bestimmt [ASMG20].

Unabhängig vom verwendeten Ansatz ist zunächst zu erläutern, wie eine Posenbestimmung im Grundsatz funktioniert. In **Abbildung 2.16** wird nach dem gängigen Lochkameramodell eine perspektivische Projektion dargestellt. Ein Punkt  ${}^w\mathbf{P}({}^wX, {}^wY, {}^wZ, 1)$  bezogen auf das Weltkoordinatensystem  $\mathcal{F}_w$  wird auf die Bildebene  $\pi$  als Punkt  $\mathbf{m}(u, v, 1)$  ohne Berücksichtigung von Verzerrung (mit Verzerrung siehe [ZH96]) in homogenen Pixelkoordinaten projiziert. Die Projektionsebene oder auch Bildebene  $\pi$  liegt parallel zu der  ${}^cX$ - ${}^cY$ -Ebene des Kamerakoordinatensystems. Der Abstand zwischen der Projektionsebene  $\pi$  und dem Ursprung des Kamerakoordinatensystems ist die Brennweite  $F$ . Es kann ebenfalls formuliert werden, dass  ${}^w\mathbf{P}$  den Punkt  $\mathbf{p} = [x \ y \ 1]^\top$  in normierten homogenen Koordinaten projiziert. Die normierte Bildebene befin-



**Abbildung 2.16:** Perspektivische Projektion zwischen dem Weltbild  $\mathcal{F}_w$  und dem Kamerabild  $\mathcal{F}_c$  nach [HMGZ18] und [MUS16]

det sich bei der Brennweite  $F = 1$ . Der Zusammenhang zwischen den normierten Koordinaten und den Pixelkoordinaten kann mittels

$$\mathbf{m} = \mathbf{K}\mathbf{p} \quad \text{mit} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} p_x & s & u_0 \\ 0 & p_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

abgebildet werden. Dabei ist  $\mathbf{K}$  die Kameramatrix, die die folgenden intrinsischen Parameter beinhaltet [MCB98].  $(u_0, v_0, 1)$  sind die Pixelkoordinaten des *Principal Points*, der den Schnittpunkt zwischen der optischen Achse  ${}^cZ$  und der Bildebene  $\pi$  darstellt.  $p_x = F/l_x$  und analog  $p_y = F/l_y$  spiegeln das Verhältnis zwischen Brennweite  $F$  im metrischen Einheitensystem und der metrischen Pixelgröße  $l_x$  beziehungsweise  $l_y$  wieder und werden in der Regel in Pixeln angegeben.  $s$  ist der *Skew* Parameter und beschreibt die Scherung. Dieser wird häufig als null angenommen [HZ04]. Die intrinsischen Kameraparameter können durch eine Kamerakalibrierung zu Beginn bestimmt werden. Nach [MCB98] kann bei einer kalibrierten Kamera sowohl in Pixelkoordinaten als auch den normierten Daten gerechnet werden. Sollte diese nicht optimal kalibriert sein, liefert die Rechnung mit normierten Daten eine robustere Lösung. [MUS16]

Nach den Vorgaben der Elementargeometrie nach [KKS96] lassen sich zudem die Verhältnisse

$$\frac{x}{{}^cX} = \frac{y}{{}^cY} = \frac{F}{{}^cZ} \quad (2.5)$$

in Bezug zu einander setzen. Mithilfe der zuvor eingeführten normierten Koordinaten mit  $(F=1)$  kann der dreidimensionale Objektpunkt  ${}^c\mathbf{P}({}^cX, {}^cY, {}^cZ, 1)$  im Kamerakoordinatensystem in die Bildebene durch

$$x = \frac{{}^cX}{{}^cZ} \quad \text{und} \quad y = \frac{{}^cY}{{}^cZ} \quad (2.6)$$

projiziert werden.

Um eine Transformation zwischen den beiden Koordinatensystemen der Kamera  $\mathcal{F}_c$  und dem der Welt  $\mathcal{F}_w$  beschreiben zu können, wird eine  $4 \times 4$  Matrix  ${}^c\mathbf{T}_w$  einer linearen Abbildung in homogenen Koordinaten

$${}^c\mathbf{T}_w = \begin{bmatrix} {}^c\mathbf{R}_w & {}^c\mathbf{t}_w \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

definiert [MUS16]. Dabei ist die  $3 \times 3$  Matrix  ${}^c\mathbf{R}_w$  die Rotationsmatrix und  ${}^c\mathbf{t}_w$  der Translationsvektor, mit denen die Position und Orientierung von Koordinatensystem  $w$  in  $c$  abgebildet wird [CMS<sup>+</sup>12].

Durch Verwenden der  $3 \times 4$  Projektionsmatrix  $\mathbf{Q} = [\mathbf{I}_3 \ \mathbf{0}]$  wird die anfänglich beschriebene Projektion von  ${}^w\mathbf{P}$  auf  $\mathbf{m}$  durch

$$\mathbf{m} = \mathbf{K}\mathbf{Q}{}^c\mathbf{T}_w{}^w\mathbf{P} \quad (2.8)$$

definiert. Nach [MUS16] ist Gleichung 2.8 die Grundgleichung für die Posenberechnung. Für die Bestimmung einer Pose zwischen Kamerakoordinatensystem und dem Weltkoordinatensystem oder einer definierten Position und Orientierung bezüglich eines sichtbaren Objektes ist die Gleichung bezüglich der Projektionsmatrix  ${}^c\mathbf{T}_w$  zu lösen. Diese umfasst insgesamt sechs Freiheitsgrade mit drei Rotationen und drei Translationen. [MUS16]

Mithilfe der projizierten Daten und den verschiedenen Strategien der Inleterkennung aus Abschnitt 2.3 besteht darauffolgend die Aufgabe, eine relative Pose zwischen den erkannten Merkmalen und der Ziellanordnung beziehungsweise der Zielpose zu bestimmen. Im Allgemeinen lässt sich die Posenbestimmung mit einer einzelnen Kamera in zwei Ansätze unterteilen [ASMG20]. Die erste Variante beschreibt die Posenberechnung eines Objektes durch Nutzung von  $n$  Merkmalen (*feature points*), für die die 3D-Koordinaten in der definierten Zielpose bekannt sind. Diese Methode wird in der Literatur *Perspective-n-Point* (PnP) Problem genannt [FB81]. Mathematisch wird dabei wie zuvor beschrieben das Gleichungssystem

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{Q}{}^c\mathbf{T}_w{}^w\mathbf{P}_i \quad \text{mit} \quad \mathbf{p}_i = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{m}_i \quad (2.9)$$

nach  ${}^c\mathbf{T}_w$  unter Berücksichtigung der bekannten Punkte  ${}^w\mathbf{P}_i$ ,  $i \in n$  im Weltkoordinatensystem gelöst. Grundsätzlich werden die PnP-Lösungsansätze unterschieden in (1) Formulierung von nichtlinearen algebraischen Polynomen und einer direkten Lösung, (2) Numerische Lösung eines linearen Gleichungssystems und (3) Optimierung einer nichtlinearen Kostenfunktion [Dru16].

Die geringste Anzahl an notwendigen Punkten zur Posenbestimmung und dem Lösen der Polynomgleichung vierter Ordnung ist  $n = 3$  (P3P). Nach [Gru41] ergeben sich dabei bis zu vier Lösungen. Für eine eindeutige Lösung wird hierfür ein vierter Punkt benötigt [FB81], [QL99]. [HLON91] untersuchte die bis 1991 gängigsten Methoden. Die meisten P3P Algorithmen erfolgen in zwei nacheinander durchgeführten Schritten. Im ersten Schritt wird die Tiefe  $\|\mathbf{C}\mathbf{P}_i\|$  zwischen Ursprung des Kamerakoordinatensystem und dem Punkt  $\mathbf{P}_i$  mithilfe von Triangulation (Lambertsches Kosinusgesetz) bestimmt. Erst anschließend erfolgt die Berechnung der Orientierung  ${}^c\mathbf{R}_w$  und der Position  ${}^c\mathbf{t}_w$  [XXJH03]. Die zweistufige Methode ist anfällig für Fehler bei der

Schätzung der Entfernungen und führt häufig zu einer fehlerhaften Posenbestimmung [Ban18]. Neuere Algorithmen wie beispielsweise [KSS11] berechnen direkt die Pose des Objektes, was eine höhere Recheneffizienz zur Folge hat. Diverse weitere Optimierungen und Erweiterungen werden erforscht und umfassen die Verbesserung der numerischen Stabilität, der Rechenzeit und/oder der Genauigkeit [KR17], [PN18], [Ban18]. In einem Vergleich nach [PN18] wird gezeigt, dass die Implementierungen nach [KR17] und [KSS11] immer vier Lösungen berechnen, von denen nicht alle korrekt sind. Durch einen nachträglichen Auswahlprozess wie beispielsweise eine erforderliche positive Tiefenabschätzung (Punkt muss vor der Kamera liegen) oder bei dem Betrachten der Rotationsmatrix können einzelne Lösungen verworfen werden. Innerhalb der Untersuchungen werden durchschnittlich 1,7 gültige Lösungen pro Probe ermittelt [PN18]. Auch wenn P3P Algorithmen geeignete Lösungen ausfindig machen, werden in der Regel mehr als drei Merkmale zur Posenbestimmung verwendet, da die Genauigkeit mit ansteigender Anzahl an Merkmalen meist zunimmt [MUS16].

Die  $PnP$  Methode ist hingegen eine überbestimmte und allgemein gültige Lösung für die Posenbestimmung [MUS16]. Verglichen mit P3P wird auch hier unterschieden, ob der Algorithmus ein- oder zweistufig durchgeführt wird. Ein gängiger und einer der ersten einstufigen Ansätze ist der DLT (*Direct Linear Transform*) [HZ04]. Hierbei werden die intrinsischen Kameraparameter vernachlässigt, was zu Ungenauigkeiten führen kann [LMNF09]. Auch wenn dieser Ansatz sehr sensibel gegenüber Rauschen und im Vergleich zu anderen Ansätzen ungenauer ist, wird dieser beispielsweise in AR Anwendungen häufig verwendet [MUS16]. Ein weiterer häufig eingesetzter Ansatz ist der iterative POSIT-Ansatz nach [DL95]. Ein Vorteil von diesem Ansatz ist, dass keine anfängliche Initialisierung in Form einer ersten Posenschätzung oder ähnliches wie bei manch anderen Ansätzen benötigt wird [MUS16]. Zudem ist beispielsweise der Rechenaufwand im Vergleich zum DLT geringer. Nachteilig ist, dass dieser Algorithmus nicht für koplanare Punktanordnungen gültig ist. Nach [MUS16] ist zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade der Transformation  ${}^c\mathbf{T}_w$  der geeignetste Ansatz die Minimierung der Norm des Reprojektionsfehlers mit Hilfe eines nichtlinearen Minimierungsansatzes wie z.B. eines Gauß-Newton- oder eines Levenberg-Marquardt-Verfahrens. Das Vorgehen wird in [MUS16] näher beschrieben.

Für komplexere Anwendungen, bei denen beispielsweise die Anzahl der Referenzpunkte  $n$  steigt, werden Ansätze wie  $EPnP$  [LMNF09],  $OPnP$  [ZKS<sup>+</sup>13],  $GPnP$  [KFS13],  $UPnP$  [KLS14] oder  $SQPnP$  [TL20] bevorzugt. Sowohl lineare als auch nichtlineare Ansätze sind in der Open-Source Software VISP (Visual Servoing Platform) bereits implementiert und in [CMS<sup>+</sup>12] näher erläutert. Auch wenn hier nur einige von vielen Methoden und Ansätze aufgeführt werden, kann nach [MSC05] nicht eine Methode pauschal als die beste für jeden Anwendungsfall bezeichnet werden. Abhängigkeiten wie die Anzahl an Referenzpunkten, Bildrauschen, unterschiedliche Lichtverhältnisse usw. müssen bei der Auswahl mit berücksichtigt und untersucht werden.

Die zweite grundlegende Variante der Posenbestimmung ist die Zuhilfenahme der Homographie, die die projektive Abbildung zwischen zwei Ebenen beschreibt [HZ04]. Zum einen kann die Homographie genutzt werden, um die Projektion einer Ebene (mit beispielsweise mehreren

Punkten) in der Bildebene zu beschreiben. Dabei wird angenommen, dass alle Punkte auf der Ebene  ${}^wZ = 0$  liegen, sodass sich für einen Punkt  ${}^w\mathbf{P} = ({}^wX, {}^wY, 0, 1)$  nach Gleichung 2.9 der Zusammenhang

$$\mathbf{p} = \mathbf{Q} {}^c\mathbf{T}_w {}^w\mathbf{P} = \mathbf{Q}(\mathbf{c}_1 \ \mathbf{c}_2 \ \mathbf{c}_3 \ {}^c\mathbf{t}_w) \begin{pmatrix} {}^wX \\ {}^wY \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

ergibt [MUS16].  $\mathbf{c}_i$  ist dabei die  $i$ -te Spalte der Rotationsmatrix  ${}^c\mathbf{R}_w$ . Durch  ${}^wZ = 0$  ergibt sich

$$\mathbf{p} = \mathbf{Q}(\mathbf{c}_1 \ \mathbf{c}_2 \ {}^c\mathbf{t}_w)({}^wX, {}^wY, 1)^\top = {}^c\mathbf{H}_w({}^wX, {}^wY, 1)^\top \quad (2.11)$$

${}^c\mathbf{H}_w$  ist die Homographiematrix, die mithilfe des DLT-Algorithmus (näher erläutert in [HZ04]) gelöst werden kann. Wenn  ${}^c\mathbf{H}_w$  bekannt ist, kann über die Beziehung aus Gleichung 2.11 die Pose  ${}^c\mathbf{T}_w$  bestimmt werden. Hierfür wird lediglich für die dritte Spalte der orthogonalen Rotationsmatrix die Beziehung  $\mathbf{c}_3 = \mathbf{c}_1 \times \mathbf{c}_2$  benötigt. Voraussetzung für die Posenbestimmung mittels Homographiematrix ist das Bestimmen der intrinsischen Kameraparameter und das Erkennen von mindestens vier Punkten auf einer Ebene. [MUS16]

Ein weiterer Anwendungsansatz ist die Bestimmung der Homographie zwischen zwei Kameraspektiven [MV07]. Bei Betrachten einer Ebene, die einen Punkt  $\mathbf{p}_1$  in ein Bild  $I_1$  und einen Punkt  $\mathbf{p}_2$  in  $I_2$  projiziert, stehen die Koordinaten der beiden Punkte durch die Homographiematrix  ${}^2\mathbf{H}_1$  in Beziehung zu einander.

Mithilfe der Gleichung

$$\mathbf{p}_2 = {}^2\mathbf{H}_1\mathbf{p}_1 \quad \text{mit} \quad {}^2\mathbf{H}_1 = ({}^2\mathbf{R}_1 + \frac{{}^2\mathbf{t}_1}{{}^1d} {}^1\mathbf{n}^\top) \quad (2.12)$$

kann gezeigt werden, dass die Koordinaten der Punkte  $\mathbf{p}_1$  und  $\mathbf{p}_2$  durch die Homographie  ${}^2\mathbf{H}_1$  von einander abhängig beschrieben werden können. Der Translationsvektor  ${}^2\mathbf{t}_1$  wird dabei auf den Abstand  ${}^1d$  zwischen der Objektebene und dem Ursprung der Referenzebene 1 normiert.  ${}^1\mathbf{n}$  ist der Normalenvektor zur Referenzebene 1. Bei einer reinen Rotation der Punkte zueinander ist nach Gleichung 2.12  ${}^2\mathbf{H}_1 = {}^2\mathbf{R}_1$ . In diesem Sonderfall ist Gl. 2.12 auch bei einer nicht planaren Anordnung der Punkte gültig [MUS16]. [MV07]

Neben den beschriebenen Ansätzen zur Posenbestimmung anhand von  $n$  Merkmalen spielt die Konfiguration der Merkmale eine wesentliche Rolle. Nach [AW18] gilt, je geringer die Anzahl  $n$  der Merkmale ist, umso höher ist der Einfluss der Anordnung der Merkmale zueinander. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass ein planares Quadrat eine sehr stabile und robuste Konfiguration für alle Kameraposen liefert. Eine Optimierung der Konfiguration kann nach der Regel erfolgen, die Abstände zwischen den Merkmalen zu maximieren und sie auf der Ebene zu verteilen. [AW18]



In diesem Abschnitt wurden diverse Methoden und Ansätze zur Posenbestimmung aufgeführt. Nach [MUS16] kann pauschal nicht festgelegt werden, welcher Ansatz grundsätzlich am besten einzusetzen ist und im Allgemeinen am robustesten und genauesten funktioniert. Hier ist je nach Einsatzgebiet und den zugehörigen Anforderungen herauszuarbeiten, welche Methode zu bevorzugen ist.

Die bisherige Darstellung der Bildaufnahme wird durch eine ideale mathematische Beschreibung dargestellt. In der Realität werden Abbildungsfehler durch fehlerhafte Linsensysteme hervorgerufen. Die sogenannten Verzeichnungsfehler werden in eine radiale und eine tangentielle Verzerrung unterteilt. Nach [Luh10] ist der Anteil der tangentialen Verzerrung als wesentlich geringer einzustufen, weswegen dieser innerhalb dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird. Die radiale Verzerrung wird nach [MCM03] mittels

$$x' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (2.13)$$

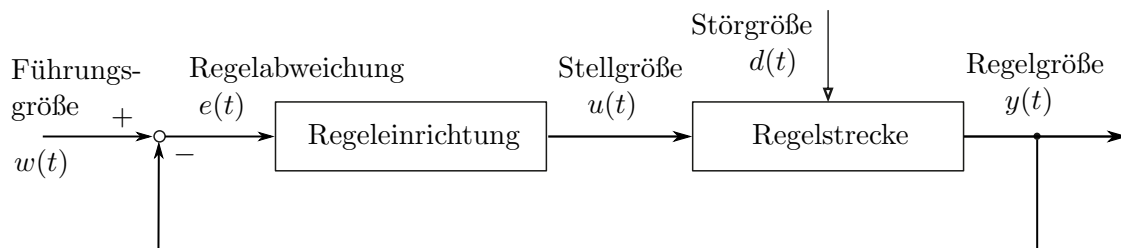
$$y' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (2.14)$$

mit  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  korrigiert. Die Koeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  werden mittels Kamerakalibrierung bestimmt. Durch  $x'$  und  $y'$  wird die korrigierte Bildposition dargestellt.

### 2.4.2 Visual Servoing

Um aus der bestimmten Pose und somit Abweichung zu der Zielpose eine Bewegung der Roboterkinematik zu erzeugen, wird eine Steuerung oder auch eine Regelung benötigt, die den Aktuatoren die notwendigen Bewegungsinformationen übergeben kann. Bei einer Steuerung wird lediglich eine Führungsgröße  $\omega(t)$  vorgegeben, während eine Abweichung zwischen Regelgröße  $y(t)$  und Führungsgröße nicht betrachtet wird. So kann das gewünschte Ziel ausschließlich bei bekannten dynamischen Eigenschaften der Steuerstrecke erreicht werden, da sich Störgrößen  $d(t)$  ungemindert auf die Regelgröße  $y(t)$  auswirken und die Stellgröße  $u(t)$  keine Informationen über mögliche Abweichungen erhält. [Lun07]

Bei einer Regelung, für die der geschlossene Regelkreis in **Abbildung 2.17** dargestellt wird, findet ein Vergleich zwischen Führungsgröße  $\omega(t)$  und Regelgröße  $y(t)$  statt, sodass auf die Regelabweichung  $e(t) = \omega(t) - y(t)$  in der Regeleinrichtung in Form von der Stellgröße  $u(t)$  reagiert werden kann. Vorteile einer solchen Regelung sind, dass Störungen in der Bewegung



**Abbildung 2.17:** Geschlossener Regelkreis nach [Lun07]

oder beispielsweise mögliche Schrittverluste bei Schrittmotoren detektiert werden können und somit die Abweichung korrigiert werden kann. Die Vorteile einer Steuerung (schnelles Reagieren auf Änderungen) und die einer Regelung (Stabilisierung und Störkompensation) können mittels Vorsteuerung kombiniert werden, sodass eine Regelstrecke zunächst möglichst schnell der Führungsgröße nachgeführt wird und die Regelung auf mögliche Störungen abschließend reagieren kann. [Lun07]

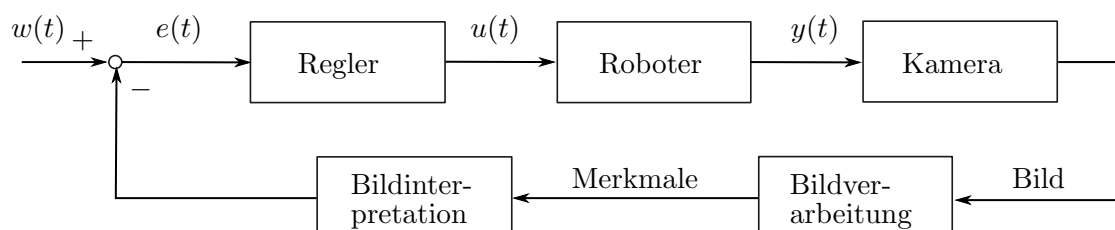
Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, können mithilfe von Kameras bzw. Bildverarbeitungssystemen Merkmale wie beispielsweise Kanten oder Blobs detektiert werden. Diese Detektierung kann helfen, dem Roboter eine Orientierungshilfe zu liefern oder diesen auch zu einem Ziel zu führen. Wird, wie in **Abbildung 2.18** dargestellt, eine solche Bildverarbeitung in den Regelkreis integriert, wird von einem *Visual Servoing* gesprochen. Dabei wird nicht direkt die Abweichung zwischen der Regelgröße  $y$  und der Führungsgröße  $w$  betrachtet, sondern eine Bildinterpretation liefert zusätzliche Informationen für den Regler. Die Kamera kann hierbei am Roboterarm („Eye-In-Hand“) oder stationär im Raum („Eye-To-Hand“) installiert sein. Durch die Bildverarbeitung und das Bestimmen einer Pose zwischen Roboter und detektiertem Objekt kann die Regelabweichung  $e(t)$  ermittelt und die Stellgröße  $u(t)$  für die Roboterbewegung berechnet werden. [Win16]

Die bildbasierte Eye-In-Hand Regelung lässt sich grundsätzlich in *positionsbasierte* und *bildbasierte* Ansätze unterteilen [HHC96]. Beim positionsbasierten Ansatz werden dreidimensionale Eingangsgrößen verwendet, weshalb der Ansatz auch *3D Visual Servoing* genannt wird [WWB96]. Beim bildbasierten Ansatz werden zweidimensionale Eingangsgrößen betrachtet, so wird dieser auch mit *2D Visual Servoing* deklariert [ECR92].

Das grundlegende Ziel eines jeden *visual servoing* Ansatzes ist das Minimieren des Fehlers  $\mathbf{e}(t)$

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{p}(\mathbf{m}(t), \mathbf{K}) - \mathbf{p}_{\text{ref}}. \quad (2.15)$$

Der Fehler beziehungsweise die Abweichung zur Zielpose wird gebildet aus der Subtraktion zwischen den aus dem Bild ermittelten Informationen in  $\mathbf{p}(\mathbf{m}(t), \mathbf{K})$  und den vorgegebenen Referenzbildmerkmalen in  $\mathbf{p}_{\text{ref}}$ . In  $\mathbf{m}(t)$  befinden sich die Pixelkoordinaten von mehreren Bildmerkmalen  $n$  in Vektorform  $(u_i, v_i)$  mit  $i \in n$ , während in  $\mathbf{K}$  die intrinsischen Kameraparameter mitberücksichtigt werden (siehe Gl. 2.4). [FS06]



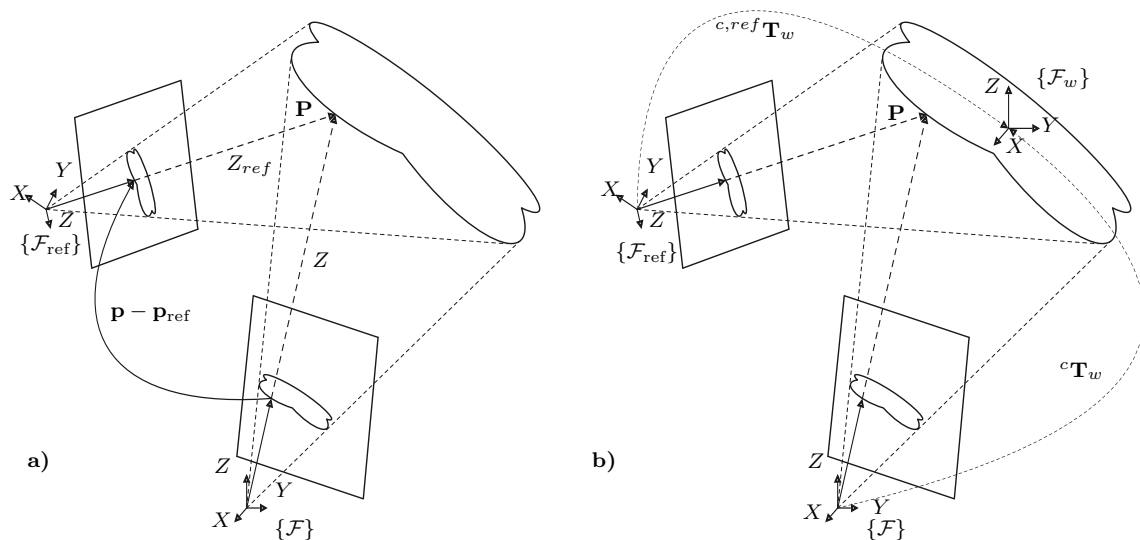
**Abbildung 2.18:** Grundstruktur eines Visual-Servoing Systems nach [Win16]

Die Methode, den Vektor  $\mathbf{p}$  zu bestimmen, ist bei dem bildbasierten 2D und dem positionsbasierten 3D Ansatz unterschiedlich. Wie in **Abbildung 2.19 a)** werden im bildbasierten Ansatz die Merkmalinformationen direkt aus den Bilddaten entnommen. Die Merkmalkoordinaten  ${}^w\mathbf{P}$  vom betrachteten Zielobjekt werden auf die Bildebene projiziert und im bildbasierten Ansatz zweidimensional durch  $\mathbf{p}$  dargestellt. Da das projizierte Bild keine Informationen über die Tiefe  $Z$  liefern kann, ist diese hierbei über Merkmalinformationen wie beispielsweise Größe oder Abstand der Punkte zu schätzen. Der positionsbasierte Ansatz nutzt eine Posenberechnung zwischen Kamera und der definierten Zielkoordinaten, um den Vektor  $\mathbf{p}$  zu ermitteln, was in **Abbildung 2.19 b)** dargestellt wird. In diesem Fall wird  $\mathbf{p}$  zu  $\mathbf{p} = ({}^c\mathbf{t}_w, \theta\mathbf{u})$  und  $\mathbf{p}_{\text{ref}}$  zu  $\mathbf{p}_{\text{ref}} = ({}^c\mathbf{t}_{w,\text{ref}}, \mathbf{0})$ . So ergibt sich für die Translation die Differenz  ${}^c\mathbf{t}_w - {}^c\mathbf{t}_{w,\text{ref}}$  zwischen den beiden Translationsanteilen der Posenberechnung und für die Rotationsbeziehung zwischen Kamerapose und Referenzpose durch den Winkel  $\theta$  und der Drehachse  $\mathbf{u}$  die Differenz  $\theta\mathbf{u}$ . [FS06]

Ist der Vektor  $\mathbf{p}$  definiert, wird ein Regelschema benötigt, welches die zeitliche Änderung des Vektors  $\mathbf{p}$  und die Geschwindigkeit der Kamera  $\mathbf{v}_c = (\mathbf{t}_c, \omega_c)$  berücksichtigt. Die Anteile von  $\mathbf{v}_c$  sind dabei die translatorischen Geschwindigkeiten im Koordinatensystem der Kamera, während  $\omega_c$  die zugehörigen Winkelgeschwindigkeiten abbilden. Somit ergibt sich unter Einbezug der Gleichung 2.15 das Regelschema

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}\mathbf{v}_c, \tag{2.16}$$

bei dem  $\mathbf{L}$  bezogen auf  $\mathbf{p}$  die Interaktionsmatrix oder auch *Image-Jacobian Matrix* genannt, ist. Sie beschreibt die Beziehung zwischen der Bewegung der visuellen Features im Bild und der dreidimensionalen Bewegung der Kamera am Roboterarm. [MV07]



**Abbildung 2.19:** Visual Servoing Ansätze a) Bildbasiert , b) Positionsbasiert nach [MCB99]

Der Geschwindigkeitsvektor  $\mathbf{v}_c$  ist der Input für die Robotersteuerung und kann mithilfe der Vereinfachung  $\dot{\mathbf{e}} = -\lambda\mathbf{e}$  durch Umstellen der Gl. 2.16 mittels

$$\mathbf{v}_c = -\lambda\widehat{\mathbf{L}}^+\mathbf{e} \quad (2.17)$$

ermittelt werden.  $\lambda$  ist dabei ein Proportionalfaktor und  $\widehat{\mathbf{L}}^+$  ist eine Approximation der Pseudo-Inverse von  $\mathbf{L}$ . Es wird eine Approximation zu Hilfe gezogen, da in der Praxis ein exaktes Errechnen von  $\mathbf{L}$  oder auch  $\mathbf{L}^+$  nicht möglich ist. Für das Bestimmen von  $\widehat{\mathbf{L}}^+$  für die bild- und positionsbasierten Ansätze wird beispielsweise auf [FS06] verwiesen. [FS06]

Der bildbasierte und positionsbasierte Ansatz sind die Standardansätze, die weitreichend untersucht sind und verschiedene Probleme aufweisen. Beim positionsbasierten Ansatz wird in jeder Iteration eine vollständige Posenbestimmung durchgeführt. Dies hat den Nachteil, dass sich das Zielobjekt beim Bewegen aus dem Bild entfernen kann [MC00]. Dies hängt damit zusammen, dass das Kontrollschema nicht über die Informationen aus der Bildebene stattfindet. Der bildbasierte Ansatz hat den Nachteil, dass die Interaktionsmatrix singulär werden kann, was zu einem instabilen Verhalten führen kann. Zudem kann es vorkommen, dass lediglich ein lokales Minimum ermittelt wird und es zu einer Abweichung zwischen berechneter und eigentlicher Zielpose kommen kann. [MC00]

Um diese Nachteile der beiden Ansätze in der Anwendung zu vermeiden, kann eine Kombination angewendet werden, das sogenannte *2 1/2 D Visual Servoing* nach [MCB99]. Hierbei werden die Informationen aus den 2D Bildmerkmalen und den 3D Informationen kombiniert, sodass der Vektor  $\mathbf{p}$  die Form  $\mathbf{p} = (x, y, z, \theta\mathbf{u})$  annimmt. Dabei sind  $x$  und  $y$  die normierten metrischen Koordinaten eines Bildpunktes, die mithilfe der intrinsischen Kameraparameter mit Gleichung 2.4 bestimmt werden können.  $z$  wird nach [MC00]

$$z = \log({}^cZ) \quad (2.18)$$

mit der Entfernung  ${}^cZ$  (aus Posenbestimmung) bestimmt.  $z_{\text{ref}}$  wird demnach abhängig von der Zieldistanz  ${}^cZ_{\text{ref}}$  ermittelt.  $\theta\mathbf{u}$  wird wie beim positionsbasierten Ansatz mit Hilfe der Posenbestimmung aus der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  bestimmt. Der Fehler  $\mathbf{e}$  wird anschließend mittels

$$\mathbf{e} = (x - x_{\text{ref}}, y - y_{\text{ref}}, \log\left(\frac{{}^cZ}{{}^cZ_{\text{ref}}}\right), \theta\mathbf{u})^\top \quad (2.19)$$

berechnet. Die ersten beiden Komponenten von  $\mathbf{e}$  werden in der Bildebene anhand der Position des Bildmerkmals und der Referenzposition bestimmt. Die Differenz  $z - z_{\text{ref}}$  wird mithilfe der Regel für Subtraktionen von Logarithmen zusammengeführt. Für die Tiefe und die Rotation ist eine Posenbestimmung durchzuführen. [MC00]

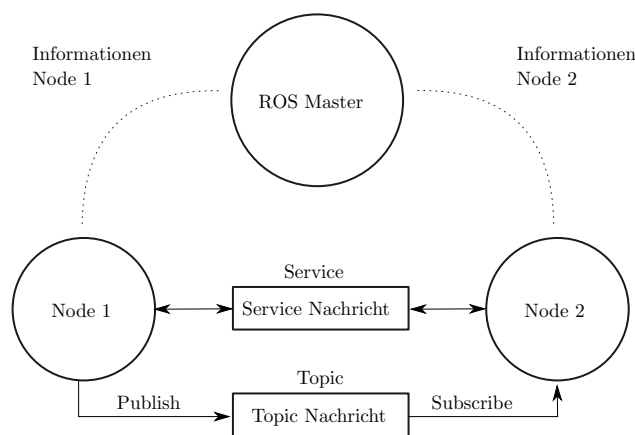
In diesem Abschnitt wurden die Grundlagen und die Vor- und Nachteile verschiedener Methoden der Posenbestimmung aufgeführt. Zudem wurde aufgeführt, dass es, pauschal gesehen, nicht den optimalen Ansatz zur Posenbestimmung gibt, sondern dieser individuell vom Einsatzgebiet

abhängt. Zudem wurden das Visual Servoing und dessen Eigenschaften beschrieben. Im Folgenden wird ein Open-Source Framework für die Entwicklung von Robotersoftware vorgestellt, der in der Forschung und Entwicklung zunehmend an Stellenwert gewinnt.

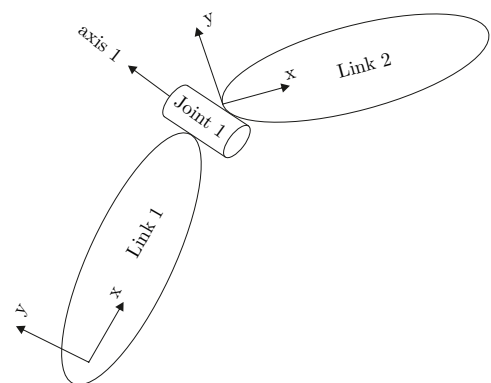
## 2.5 Robot Operating System - (ROS)

Für die Steuerung einer Roboterkinematik wird eine Software benötigt. Diese kann von Grund auf neu entwickelt werden oder auf Basis eines vorhandenen und bereits etablierten System angepasst und erweitert werden. Es gibt bereits zahlreiche Software und Frameworks wie zum Beispiel *MOOS* [Oxf], *YARP* [FCD<sup>+</sup>14] oder *Microsoft Robotics Develover* [Mic19]. Nach [Kou19] hat sich jedoch besonders das Framework *Robot Operating System (ROS)* in den letzten Jahren zu einer sehr beliebten und weltweit eingesetzten Handhabungsmöglichkeit für Robotikapplikationen durchgesetzt. ROS ist ein Open-Source Framework und bietet diverse Besonderheiten und Vorteile. Ein befürwortender Aspekt für ROS ist das vielseitige und überdurchschnittliche Angebot an Tools zur Visualisierung, Simulation und zum Debuggen [JC18]. Zudem ist ROS modular aufgebaut, sodass einzelne bereits entwickelte Systeme implementiert und mit weiteren Teilen verknüpft werden können [Ope]. Dies liefert die Möglichkeit, Lösungen für voneinander unabhängige Problemstellungen eigenständig zu entwickeln oder vorhandene Lösungen einzubinden und abschließend zu einem Gesamtsystem zu verknüpfen. Das flexible Framework bietet somit die Grundlage für eine strukturierte Kommunikation für diverse Hosts eines heterogenen Rechenclusters [QCG<sup>+</sup>09].

Das grundlegende Interaktionskonzept in ROS wird in **Abbildung 2.20 a)** dargestellt und basiert im Wesentlichen aus dem „Master“, den „Nodes“, diversen „Messages“, „Services“ und „Topics“. Der Master liefert den Rahmen und die Namensregistrierung. Ohne ihn findet keine Kommunikation zwischen den Nodes statt. Die Nodes sind eigenständige Prozesse, die Berechnungen durchführen. Durch den bereits zuvor erwähnten modularen Aufbau umfassen die Nodes in der Regel verschiedene Aufgaben, wie beispielsweise die Motorensteuerung, die Bahnplanung



a) ROS Kommunikation nach [Jos18]



b) URDF für die Besch. der Roboterkin. nach [ROS17]

**Abbildung 2.20:** Grundbausteine von ROS

oder auch die Bildverarbeitung. Ist ein Datenaustausch zwischen den Nodes notwendig, können Informationen über den Master ausgetauscht werden. Dabei wird eine sendende Node *publisher* und eine empfangende Node *subscriber* genannt [Jos18]. Die verschiedenen Dateiformate, die von den Nodes versendet werden, werden *Messages* genannt. Ein Node versendet eine Message, indem sie diese in einer Topic veröffentlicht bzw. „publisht“. So kann eine andere Node diese Topic abonnieren und die Daten abrufen und verwerten. Für jede Topic kann es nur einen Publisher geben, jedoch können unbegrenzt viele Nodes eine Topic abonnieren. Durch das zunächst „anonyme“ Veröffentlichen von Daten kann so keine Kommunikation in Form von Anfrage/Antwort zwischen zwei Nodes durchgeführt werden. Hierfür werden die Services benötigt, die auch in **Abbildung 2.20 a)** als bidirektionale Verbindung zwischen zweier Nodes dargestellt werden. [ROS14]

Die Basis für die Verwendung von ROS für die Steuerung eines Roboters ist eine code-unabhängige, lesbare Beschreibung der Roboterkinematik. Diese wird mittels „Unified Robot Description Format“ (URDF) implementiert und wird zur bildlichen Verdeutlichung in **Abbildung 2.20 b)** dargestellt. In der URDF wird sowohl die kinematische Beschreibung des Roboters definiert, als auch Informationen wie Trägheiten, maximale Bewegungsbereiche in den Gelenken oder Kollisionsbereiche gespeichert.

In diesem Kapitel wurde der Stand der Technik bezüglich des automatischen Ladens von Elektrofahrzeugen detailliert aufgeführt. Neben dem Kategorisieren bereits bestehender Prototypen und dem Vorstellen des Forschungsprojektes ALanE wurde auf die verschiedenen Ansätze der In-terkennung und die unterschiedlichen Methoden zur Posenbestimmung eingegangen. Im folgenden Kapitel wird die Problemstellung und die daraus resultierende Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beschrieben.

## 3 Problemstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird zunächst die Problemstellung auf Basis des zuvor erarbeiteten Standes der Technik beschrieben. Anschließend werden die daraus resultierenden Ziele dieser Arbeit formuliert. Abschließend wird die Vorgehensweise erläutert.

### 3.1 Problemstellung

Die Bestände an neu zugelassenen Elektrofahrzeugen haben sich im Zeitraum von 2016 bis 2020 weltweit mehr als verfünffacht [Nie21]. Alleine in Deutschland haben sich diese Bestände mehr als verzehnfacht [Nie21]. Um in Zukunft ein autonomes Fahren der Stufe vier oder höher attraktiv für die Bevölkerung und den breiten Einsatz gestalten zu können, ist ein zuverlässiges und robustes automatisches Laden der Fahrzeuge Voraussetzung. Zudem ist eine zeitlich flexible Gestaltung der Energiebereitstellung ein wesentlicher Aspekt, der bei einer ansteigenden Zulassung von elektrischen Fahrzeugen an Bedeutung gewinnt [JKF13]. Ein zuverlässiges flexibles Ladesystem für das automatische Laden von E-Autos kann durch Rotieren der Fahrzeuge an der Ladestation etabliert werden.

In Kapitel 2 wird aufgeführt, dass bereits erste Systemansätze sowohl von international vertretenen Automobilherstellern als auch von Forschungseinrichtungen entwickelt werden. Einige Arbeiten untersuchen das Steckverhalten verschiedener Kinematiken mit unterschiedlichen Bildverarbeitungen und unterschiedlichen Prozessverfahren. Dabei wurde bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht umfangreich getestet, ob alle sechs Freiheitsgrade für ein sicheres und zuverlässiges Steckverhalten notwendig sind. Zum Teil werden Industrieroboter mit sechs Freiheitsgraden und bis zu sieben Achsen eingesetzt, jedoch kann anhand der ersten Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt ALanE gezeigt werden, dass grundsätzlich eine geringere Anzahl ausreichen kann. Wie aber in Abschnitt 2.2 beschrieben, weist das entwickelte ALanE-System jedoch konstruktive Schwächen bezüglich der Sicherheit im öffentlichen Raum auf und durch die horizontale Ausrichtung des Steckers kann der Bauraum durch Einfahren zusätzlich verringert werden.

Zu den meisten Systemen werden teilweise wenige oder auch keine Systemanforderungen, Versuchsreihen oder Analysen veröffentlicht. Die Strategie der Inleterkennung und dessen Posenbestimmung ohne jegliche zusätzlichen Marker durch Kantenerkennung und Matching-Methoden wird bereits vereinzelt untersucht und unter Laborbedingungen evaluiert. Auch hier besteht Bedarf für weitere Analysen bezüglich der Robustheit und Genauigkeit der Inleterkennung und dessen Pose bei unterschiedlichen Inletposen und verschiedenen Lichtverhältnissen. Der Ansatz

mit passiven Markern wie fiducial marker systems wird bereits in der Industrie vielseitig zum Detektieren von Objekten und bei Bedarf zur Bestimmung deren Pose eingesetzt. Auch hier sind weitere Untersuchungen für den Einsatz für Laderoboter anzustreben. Die Strategie mit aktiven Markern, wie das Verwenden von LEDs, ist am wenigsten untersucht. Das Konzept des Verwendens von IR-LEDs am Inlet als aktive Marker wurde im Forschungsprojekt ALanE als geeignet eingestuft, jedoch sind keine wissenschaftlichen Ergebnisse bezüglich des Steckerfolgs, der Dauer des automatischen Einsteckvorgangs oder auch der wirkenden Kräfte und Momente auf das Inlet bekannt. Eine vollständige Untersuchung des Systems mit aktiven Markern am Inlet ist fehlend.

Anhand der aktuellen Normungen bezüglich des automatischen Ladens von Elektrofahrzeugen wird deutlich, dass auch hier noch keine einheitliche Strategie für die Inleterkennung und dessen Posenbestimmung verabschiedet werden konnte. Um zukünftig Aussagen bezüglich eines wiederholgenauen Systems treffen zu können, ist es erforderlich, die verschiedenen Ansätze und deren Eigenschaften gegenüberzustellen und eine qualitative Einordnung der Systeme vorzunehmen.

### 3.2 Zielsetzung

Auf Basis der zuvor erarbeiteten Problemstellung werden die folgenden Ziele formuliert. Zunächst ist die Entwicklung eines optimierten Ladesystems basierend auf dem ALanE-Konzept für das automatische Laden unter Berücksichtigung der notwendigen Anzahl aktiv gesteuerter Freiheitsgrade erforderlich. Bei einer geringeren Anzahl als sechs aktiv regelbarer Freiheitsgrade ist ein elastischer Ausgleich zu berücksichtigen, der mit zu entwickeln ist. Zudem ist die Kinematik so zu gestalten und auszulegen, dass diese für den öffentlichen Raum einsetzbar ist. Die Kinematik ist an einer Wand mit einer möglichst geringen Tiefe beispielsweise im Parkhaus oder in einer privaten Garage zu montieren oder kann mit Hilfe einer Umhausung freistehend am Straßenrand aufgestellt werden.

Neben der Kinematik und mechanischen Entwicklung ist der Einsatz von aktiven Markern wie das Verwenden von IR-LEDs weiter zu untersuchen. Auf Basis der bislang veröffentlichten Beiträge ist keine genaue Stellungnahme bezüglich der Eignung oder zu auftretenden Problemen möglich. Hierfür sind Modifikationen sowohl am Fahrzeuginlet als auch am Ladestecker vorzunehmen, da nach Norm keine aktiven Marker am Inlet installiert sind. Neben der hardware-spezifischen Modifikation ist eine Ladeprozedur zu entwickeln, mit der das automatische Stecken mit IR-LEDs durchgeführt werden kann. Die Bildverarbeitung ist zu entwickeln und ein geeignetes Verfahren zur Posenerkennung des Inlets anhand der IR-LEDs auszuwählen. Dabei ist anzustreben, dass zu jedem Zeitpunkt die richtigen IR-LEDs erkannt werden und die korrekte Zuordnung von Fahrzeug zu Ladestation überprüft wird. Der entwickelte Laderoboter hat sich ausreichend genau vor das Inlet mit der erforderlichen Genauigkeit für Position und Orientierung zu bewegen, um abschließend einen erfolgreichen Steckvorgang durchführen zu können. Hierfür sind die Genauigkeiten abhängig von der Bilderkennung und der verwendeten Hardware zu analysieren. Um Kosten für die Entwicklung und fortlaufende Fragestellungen gering zu halten, ist die Umsetzung in einer Open-Source Umgebung anzustreben.

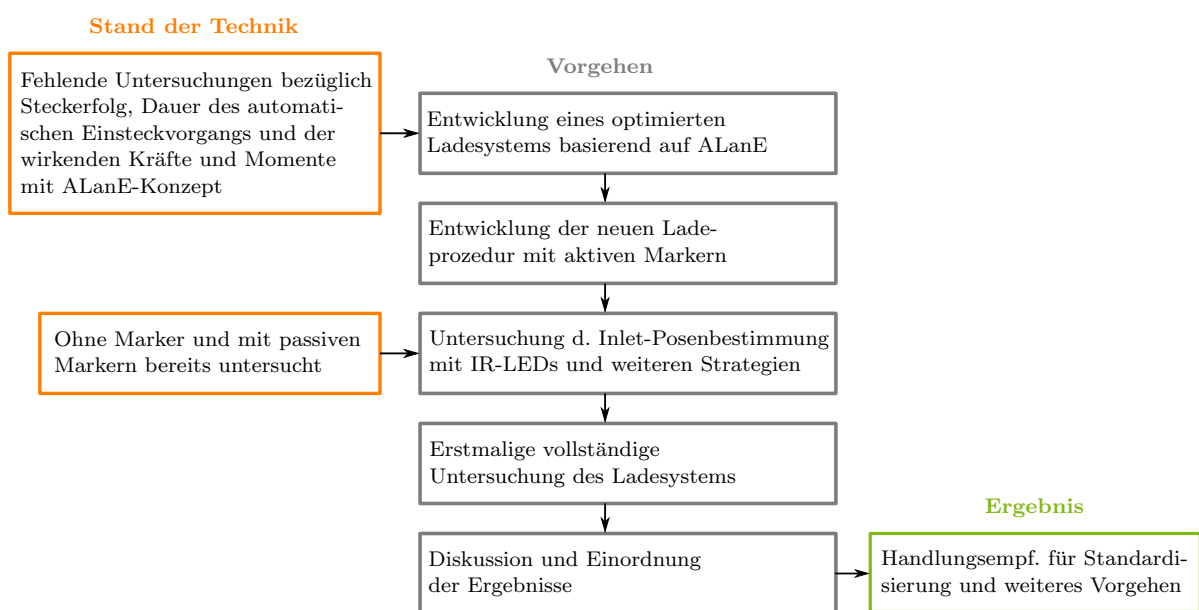


Anhand der zuvor beschriebenen Problemstellung ergibt sich das Ziel, eine Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung mit aktiven Markern im Arbeitsraum des Ladesystems zu erstellen und diese mit möglichen weiteren Strategien mit passiven oder ohne zusätzlichen Markern qualitativ zu vergleichen. Somit können Vor- und Nachteile erfasst werden, um eine Empfehlung für das weitere Vorgehen auszusprechen. Hierfür sind Bewertungskriterien zu definieren, anhand deren die Strategien der Inlet-Posenbestimmung bewertet werden können.

Auf Basis der entwickelten Kinematik und Ladeprozedur ist die Entwicklung hinsichtlich des Steckerfolgs, der benötigten Zeit zum automatischen Stecken und der auf das Inlet wirkenden Kräfte und Momente vollständig zu untersuchen. Es ist zu bewerten, ob das System für das automatische konduktive Laden geeignet ist und ob die Kräfte und Momente durch nachträgliche Anpassungen der Ladeprozedur reduziert werden können. Dabei ist auf Potentiale des Systems, aber auch auf mögliche Probleme und Schwächen einzugehen. Die Ergebnisse sind zu diskutieren und einzuordnen.

### 3.3 Vorgehensweise

Wie in der zuvor beschriebenen Zielsetzung zu erkennen ist, sind die Ziele chronologisch aufeinander aufbauend formuliert. Somit werden diese Themen im Anschluss nacheinander bearbeitet, um das Gesamtsystem abschließend zu analysieren. In **Abbildung 3.1** wird die Vorgehensweise und Zielsetzung abgeleitet aus dem Stand der Technik dargestellt. Das Vorgehen wird zunächst durch die konstruktiven Schwächen und die fehlenden Untersuchungen im Rahmen des vorgestellten ALanE-Konzepts motiviert. Nach Betrachten der beschriebenen Zielsetzung wird zunächst eine Kinematik auf Basis einer zu definierenden Anforderungsliste konzeptioniert und konstruiert. Die Anforderungsliste umfasst dabei den Arbeitsraum, die notwendigen Kräfte und die entsprechenden Sicherheitsanforderungen. Daraufhin wird sich auf die Entwicklung der Ki-



**Abbildung 3.1:** Vorgehensweise und Zielsetzung abgeleitet aus dem Stand der Technik

nematik und die Auswahl an mechanischen Komponenten konzentriert. Da der Laderoboter für den öffentlichen Raum konzeptioniert wird, ist darauf zu achten, dass möglichst keine Quetschgefahr besteht und möglichst geringe Massen bewegt werden. Eine Modifikation des Inlets und des Steckers sind für die Verwendung von aktiven Markern erforderlich, sodass zunächst die Marker und die Kamera positioniert und ausgerichtet werden müssen.

Nach der Entwicklung des optimierten Ladesystems wird anschließend die Prozedur des automatischen Steck- und Ladevorgangs mit der zugehörigen Bildverarbeitung entwickelt. Hierfür wird angestrebt, das Open-Source Framework ROS zu verwenden, in dem bereits eine Vielzahl der hier benötigten Funktionalitäten zu Verfügung stehen. Nach der Kalibrierung der verwendeten Kamera und dem Definieren der einzelnen Prozedurschritte sind diese auszuarbeiten. Um das Ziel der stetigen Gewährleistung einer korrekten Zuordnung zwischen erkannten Markierungen und Ladestation sicherzustellen, wird eine Plausibilitätsprüfung - sind die erkannten Marker die richtigen? - und eine Identifikationsprüfung - steht das korrekte Fahrzeug vor der Ladestation? - entwickelt. Zudem sind erste Genauigkeitsbetrachtungen durchzuführen, um zu analysieren, ob das Konzept des automatischen Einsteckens als geeignet bewertet werden kann oder ob die geforderten Genauigkeiten nicht erreicht werden können.

Im Anschluss an die hardware- und softwaretechnische Entwicklung wird eine Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung durchgeführt, bei der die Genauigkeit der hier verwendeten Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit aktiven Markern im Arbeitsraum ermittelt wird. Anhand von zu definierenden Bewertungskriterien wird bestimmt, ob das Verwenden der IR-LEDs als aktive Marker zuverlässig und mit ausreichender Genauigkeit zu bewerten ist und ob diese für die weiteren Versuchsreihen am besten geeignet sind. Dabei wird die Untersuchung um zwei weitere Strategien mit einem passiven Marker und ohne zusätzliche Marker am Inlet erweitert, um diese untereinander qualitativ gegenüberzustellen. Demnach ist hierfür ein Versuchsaufbau und ein Versuchsplan zu erstellen. So können qualitative Vor- und Nachteile identifiziert werden.

Abschließend ist eine Evaluierung des entwickelten automatischen Ladesystems in Form einer vollständigen Untersuchung und einer Ergebnisdiskussion durchzuführen. Ein Versuchsplan und ein dafür vorgesehener Versuchsaufbau wird erstellt, um die Zielparameter wie Erfolgsquote, benötigte Dauer für den automatischen Steckvorgang und die wirkenden Kräfte und Momente am Inlet zu untersuchen. Dabei sind Abhängigkeiten bezüglich unterschiedlicher Inletposen relativ zum Ladesystem zu identifizieren und anwendungsspezifische Probleme der verwendeten Bildverarbeitung kenntlich zu machen. Auf Basis dieser Untersuchungen und der vorherigen Betrachtung der verschiedenen Strategien der Inlet-Posenbestimmung kann eine Handlungsempfehlung für das weitere Vorgehen und die Standardisierung ausgesprochen werden.

## 4 Entwicklung des Ladesystems

Für die Untersuchungen am automatischen Ladesystem werden zu Anfang aufbauend auf dem zuvor erarbeiteten Stand der Technik ein Konzept und eine Kinematik entwickelt. Hierfür werden zunächst in **Abschnitt 4.1** Anforderungen in Rücksprache mit Industriepartnern vereinbart, auf denen die Konzeptentwicklung und die schlussendliche Konstruktion basieren. Anschließend wird in **Abschnitt 4.2** die Konzeptentwicklung und die Konstruktion für die Roboterkinematik dargestellt, die für die späteren Untersuchungen als Demonstrator dient. Für die Inbetriebnahme und die ersten Versuchsreihen wird zunächst der Ansatz mit aktiven Markern in Form von Infrarot LEDs entwickelt und implementiert. Wie in Kapitel 3 beschrieben, sind hierfür bislang keine umfangreichen Untersuchungen bekannt. Hierfür werden in **Abschnitt 4.3** die erforderlichen Modifizierungen am Stecker und am Inlet erläutert.

### 4.1 Anforderungen

Für die Entwicklung eines Laderoboters werden im Dialog mit einem Automobilhersteller und einem Ladesäulenentwickler Anforderungen an die Geometrie, die Mechanik, die Sicherheit usw. definiert. In **Tabelle 4.1** werden die für diese Arbeit relevanten Forderungen aufgeführt. Diese sind bei der Entwicklung der Kinematik zu berücksichtigen. Hierbei wird beispielsweise die Tiefe für die Aufhängung an einer Parkhauswand auf weniger als 300 mm definiert. So kann ein Automobil neben dem Laderoboter geparkt werden, ohne dass bei gängigen Parkplatzbreiten von  $\approx 2,5$  m ein Platzmangel entsteht. Zudem soll für die Ladekinematik ein CCS Combo 2 Steckgesicht nach Teil 3 der IEC 62196 verwendet werden, das so modifiziert wird, dass eine DC- und AC-Kontaktbelegung bei gleichem Steckgesicht möglich ist. Die aktiv gesteuerten Freiheitsgrade sollen alle translatorischen abdecken. Wünschenswert sind alle rotatorische Freiheitsgrade, um geneigte Inlets zuverlässig und unterhalb der maximalen Steckkraft stecken zu können. Hier ist jedoch eine Entscheidung zu treffen, ob alle rotatorischen Freiheitsgrade aktiv angesteuert werden müssen oder ob diese die Kinematik und Steuerung nicht nur unnötig aufwändig und teuer machen.

**Tabelle 4.1:** Anforderungen an den Laderoboter

F/W	Nr.	Bezeichnung	Min.	Soll	Ideal	Einheit
F	1.1	Wandmontage				
W	1.2	Baugröße (Tiefe zur Wand)	<300	<250	<200	mm
F	1.3	Modifizierter CCS Combo 2 Stecker				
F	2.1	Translat. Freiheitsgrade		3		
W	2.2	Rotat. Freiheitsgrade	0	1	3	
F	2.3	Ideale Steckhöhe des Inlets		750		mm

Tabelle 4.1: Anforderungen an den Laderoboter

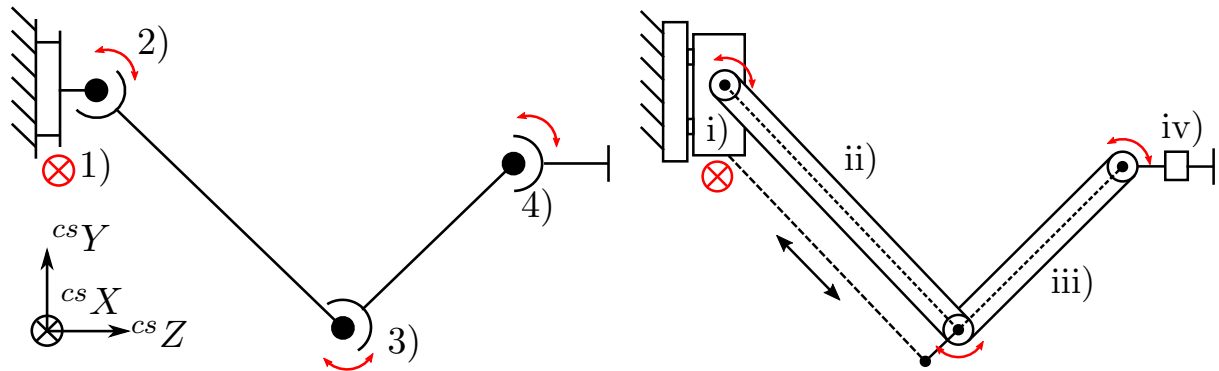
F/W	Nr.	Bezeichnung	Min.	Soll	Ideal	Einheit
W	2.4	Arbeitsraum Distanz zum Inlet	500	600	$\geq 700$	mm
W	2.5	Arbeitsraum abw. zur idealen Steckhöhe	$\pm 50$	$\pm 100$	$\pm 150$	mm
W	2.6	Arbeitsraum parallel zum PKW	400	500	$\geq 600$	mm
W	2.7	Variabler Steckwinkel ( $\theta_X, \theta_Y$ )	$\pm 5$	$\pm 10$	$\pm 15$	$^\circ$
W	2.8	Variabler Steckwinkel ( $\theta_Z$ Steckricht.)	$\pm 0$	$\pm 3$	$\pm 5$	$^\circ$
W	3.1	Dauer Steckvorgang	$< 90$	$< 40$	$< 15$	s
W	3.2	Steckvorg. unabh. von Umgebungslicht				
F	4.1	Steckkraft		$< 100$		N
F	4.2	Steckkraftbegrenzung		$< 150$		N
F	4.3	Kontaktkraftbegr. währ. d. Regelung		65		N
F	5.1	Position- u. Kraftüberwachung				
F	5.2	Stillstand bei Energieausfall				
F	6.1	Kommunikation nach ISO 15118				
F	6.2	EN ISO 12100 Sicherheit von Maschinen				

Für den Steckvorgang wird als Wunsch eine Dauer von weniger als 15 s angegeben und minimal unter 90 s. Zudem soll der Steckvorgang möglichst unabhängig vom Umgebungslicht sein. Demnach ist ein erfolgreiches Stecken idealerweise sowohl bei starker Sonneneinstrahlung als auch bei völliger Dunkelheit zu gewährleisten.

Ein weiterer für die zu entwickelnde Kinematik relevanter Aspekt ist die notwendige Steckkraft. Nach DIN EN IEC 62196-3 soll für den Steckvorgang weniger als 100 N benötigt werden. Zudem soll die maximal aufbringbare Kraft des Roboters nicht höher als 150 N liegen. So sollen sowohl Beschädigungen am Fahrzeug und am Roboterarm verhindert werden als auch das Gefahrenpotential für Passanten begrenzt werden. Damit zu keinem Zeitpunkt eine Gefahr für außenstehende Personen besteht, wird eine maximale Kontaktkraft von 65 N vorgeschrieben. Diese wird angenommen auf Basis der DIN ISO/TS 15066 für kollaborierende Roboter. Wie in 5.1 aufgeführt, ist demnach auch eine Positions- und Kraftüberwachung erforderlich. Als zusätzlicher Sicherheitsaspekt dient das Gewährleisten eines Stillstandes bei Energieausfall, sodass auch in diesem Fall keine unkontrollierten Bewegungen vom Roboterarm durchgeführt werden können. Die Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der Ladestation soll nach ISO 15118 erfolgen. Abschließend ist die Roboterkinematik so zu gestalten, dass die Sicherheit von Maschinen, genormt in EN ISO 12100, gewährleistet wird.

Im folgenden Abschnitt wird die Konzeptionierung und die Ausarbeitung der Roboterkinematik erläutert. Die hier entwickelte Kinematik dient als Versuchsstand für alle darauffolgenden Versuchsreihen und Untersuchungen.

## 4.2 Kinematikkonzept und Ausarbeitung



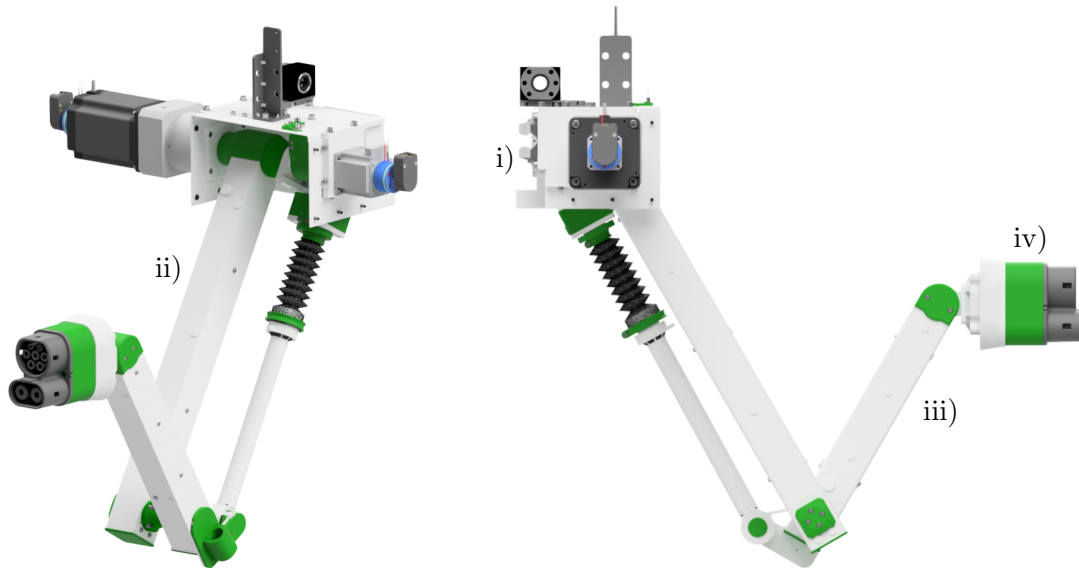
a) Konzept der Roboterkinematik mit vier aktiv gesteuerten Achsen - (1) Linear parallel zum Fahrzeug, (2) Rotatorisch, (3) Rotatorisch, (4) Rotatorisch

b) Konzept für die Ausführung der Bewegungsachsen (i) Schulter, (ii) Oberarm, (iii) Unterarm, (iv) Kopf mit Ausgleichseinheit

**Abbildung 4.1:** Konzeptionierung der Roboterkinematik [BKK21]

Wie bereits in Kapitel 2.2 vorgestellt, wurde im Forschungsprojekt ALanE eine Roboterkinematik entwickelt. Im Rahmen der Arbeit [Kra14] werden zwei Konzepte final bevorzugt, von denen das eine in ALanE final ausgewählt wurde. Da bereits die Nachteile bezüglich der Sicherheit und Robustheit der Kinematik in Abschnitt 2.2 erläutert werden, wird sich im Folgenden auf das zweite als ebenso gut bewertete Konzept nach [Kra14] bezogen, welches um die rotatorische Achse in  $X$ -Richtung (parallel zum Fahrzeug) erweitert wird. Diese Erweiterung dient der möglichen Reduzierung der Steckkraft, da bei der beschriebenen Fangraumanalyse aus Abschnitt 2.2 der am höchsten signifikante Einfluss auf die Steckkraft eine Fehlpositionierung in der Rotation um die  $X$ -Achse ist. In **Abbildung 4.1 a)** wird das Konzept dargestellt. Die Kinematik besteht aus einer linearen Achse (1)), die an der Wand befestigt wird und parallel zum Fahrzeug verläuft. So kann der Roboterarm in der  ${}^{cs}X$ -Achse ( $cs$ : charging station) entlang dem Fahrzeug verfahren (siehe Anforderungsliste 2.6). Die Achsen 2) bis 4) sind rotatorische Achsen, sodass durch das Rotieren der einzelnen Gelenkachsen der Roboterarm in den translatorischen Achsen  ${}^{cs}Y$  und  ${}^{cs}Z$  verfahren kann und ebenfalls den rotatorischen Freiheitsgrad um  ${}^{cs}X$  abdeckt. Eine aktive rotatorische Verstellung des Steckers um  ${}^{cs}Y$ -Achse ist bei idealer Positionierung des Fahrzeugs nicht notwendig. Ebenfalls wird die Orientierung um die  ${}^{cs}Z$ -Achse ebenfalls als fluchtend zwischen Stecker und Inlet angenommen.

Für die konstruktive Umsetzung des vorgestellten Konzepts wird eine Konstruktionssystematik nach VDI-Richtlinie 2221 durchgeführt, die innerhalb dieser Arbeit nicht im Detail beschrieben wird. Wie in **Abbildung 4.1 b)** dargestellt, wird die Kinematik in die Komponenten (i) Schulter, (ii) Oberarm, (iii) Unterarm und (iv) Kopf unterteilt. Die Kinematik ist demnach wie der menschliche Arm aufgebaut. Da die Sicherheit im Vergleich zu der Kinematik aus dem Forschungsprojekt ALanE verbessert werden soll, wird hierbei versucht, keine Scherenkinematik umzusetzen und zudem die Masse des bewegten Arms so gering wie möglich zu halten. Demnach sollten sich die Antriebe von Unterarm und Kopf nicht direkt auf der Gelenkachse befinden. Die Idee ist, dass der Unterarm über eine längenveränderbare lineare Verbindung bewegt wird, die

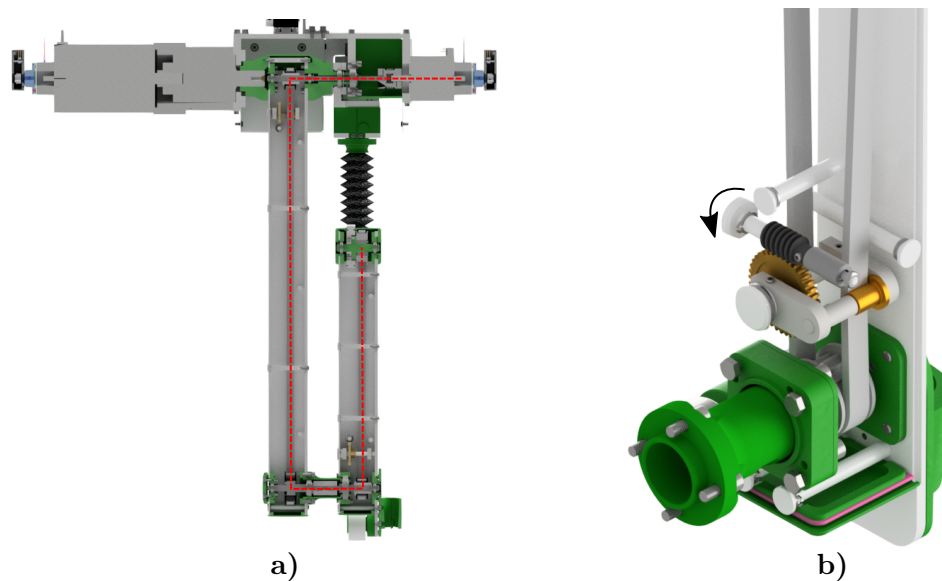


**Abbildung 4.2:** Armkonstruktion des automatischen Ladesystems  
 i) Linearführung, ii) Oberarm, iii) Unterarm, iv) Kopf mit Ausgleichseinheit

mittels Hebelarm am Ellbogen angreift. So kann der Antrieb ebenfalls in die Schulter gelegt werden und es müssen zudem keine elektrischen Leitungen zum Ellbogen verlegt werden. Für den Kopf ist eine Riemendurchführung durch Ober- und Unterarm vorgesehen, sodass auch hier der Antrieb in der Schulter positioniert werden kann und sich keine elektrischen Leitungen im Arm befinden. Ein zusätzlicher Sicherheitsaspekt ist das Reduzieren einer Quetschgefahr, indem der Steuerriemen des Kopfes innerhalb der Armkomponenten verläuft. Vor dem Kopf wird eine elastische Ausgleichseinheit montiert. Diese hat sowohl die Aufgabe, Fehler der Regelung beim Steckvorgang auszugleichen, als auch Winkelfehler zu kompensieren, die von der Kinematik nicht aktiv angesteuert werden können. Hierbei handelt es sich um die Rotationen  $\theta_Y$  und  $\theta_Z$ .

In **Abbildung 4.2** wird die Armkonstruktion des Ladesystems dargestellt. Die Markierung i) zeigt den Linearschlitten der Linearführung, die als Aufhängung für die Armeinheit dient und es dem Roboter ermöglicht, anhand einer Linearspindel parallel zum Fahrzeug zu verfahren. An der Schulter befindet sich der Oberarm (ii), der durch einen Nema34 Schrittmotor und ein vorgeschaltetes Planetengetriebe bewegt werden kann. Am unteren Ende des Oberarms ist dieser mit dem Unterarm (iii) über eine Lagerung verbunden. Wie zuvor beschrieben, wird der Unterarm über eine sich längenändernde Verbindung bewegt. Eine angetriebene Spindel (verdeckt durch den schwarzen Faltenbalg) zieht beziehungsweise schiebt den Unterarm über einen Hebelarm und bewegt diesen kreisförmig um die Achse des Ellbogens. Die Lagerung und der Antrieb der Spindel befinden sich ebenfalls auf der Schulterachse, sodass keine hohen Massen am Ellbogen bewegt werden müssen.

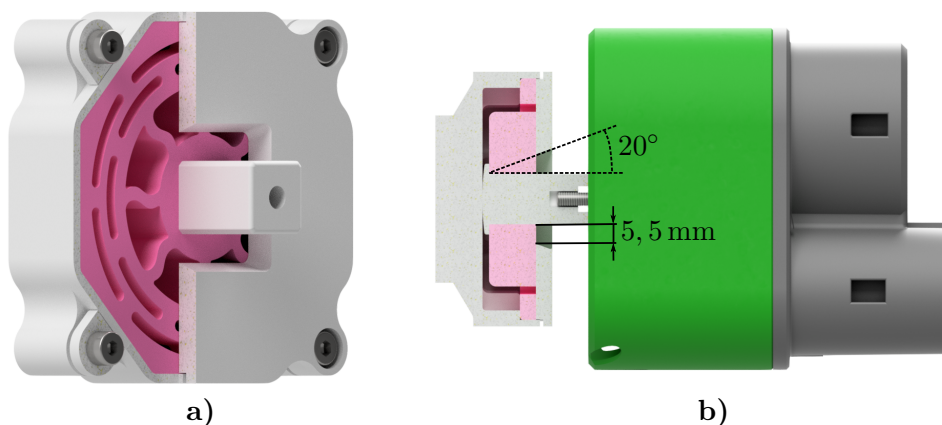
Der Kopf (iv), der den Stecker und die Ausgleichseinheit beinhaltet, befindet sich am Ende des Unterarms. Für das Bewegen des Kopfes und die Änderung der Orientierung wird eine Zahnriemendurchführung eingesetzt, die in **Abbildung 4.3 a)** dargestellt wird. So wird auch hier der



**Abbildung 4.3:** Zahnriemenkonzept  
a) Zahnriemendurchführung, b) Riemenspanner

Antrieb in der Schulter untergebracht, was die bewegte Masse am Stecker und Arm reduziert. Die Zahnriemendurchführung erfolgt über Hohlwellen in der Schulter und im Ellbogen. Zum Spannen der Zahnriemen wird sowohl im Ober- als auch im Unterarm ein Schneckengetriebe eingesetzt, welches über einen Hebelarm und eine Gleitbuchse aus Sinterbronze den Zahnriemen spannt. Dies wird in **Abbildung 4.3 b)** anhand des Unterarms dargestellt. Betätigt wird der Spanner von außen und muss durch die Selbsthemmung des Schneckengetriebes nicht festgelegt werden. Lediglich eine Mutter an der Außenseite wird aus Sicherheitsgründen angezogen.

Wie zuvor beschrieben, umfasst das Ladesystem lediglich vier aktiv regelbare Freiheitsgrade. Die fehlenden zwei rotatorischen Freiheitsgrade müssen kompensiert werden können, falls das Fahrzeug nicht exakt parallel zum Ladesystem positioniert oder es ungleichmäßig beladen ist. Diese Kompensation wird in Form einer elastischen Ausgleichseinheit vorgenommen, die zwischen Kopfaufhängung und Stecker montiert wird. In **Abbildung 4.4 a)** wird die Ausgleichseinheit



**Abbildung 4.4:** Ausgleichseinheit nach [BKK21]  
a) Teilschnitt, b) Schnittdarstellung des Steckers mit Ausgleichseinheit

und in **b)** der Einbau vor dem Stecker dargestellt. Der in pink dargestellte Einsatz ist der elastische Anteil, welcher für den Prototypen aus *SaintSmart: Flexible Filament* TPU-Kunststoff gedruckt (30% Infill) ist und eine Shorehärte A von 95 aufweist. Der elastische Teil wird in einem Gehäuse festgelegt, welches an der rotatorischen Kopfachse montiert wird. Aufgrund der oktogonalen Form verhält sich der elastische Ausgleich wie eine Torsionsfeder. Zudem enthält das Design mehrere Ausschnitte im Material, damit ein translatorischer Ausgleich von 5,5 mm und ein rotatorischer Ausgleich von theoretisch bis zu 20° in allen Richtungen möglich ist. Wie in Tabelle 2.2 aufgeführt, kann somit der Bereich einer möglichen Selbstzentrierung abgedeckt werden. So kann der Stecker sich bei einer Abweichung zwischen Steckbewegung und realer Pose des Inlets selbst durch die elastische Nachgiebigkeit ausrichten. Wie in Abbildung 4.4 b) aufgeführt, wird die elastische Ausgleichseinheit mit dem Stecker verbunden.

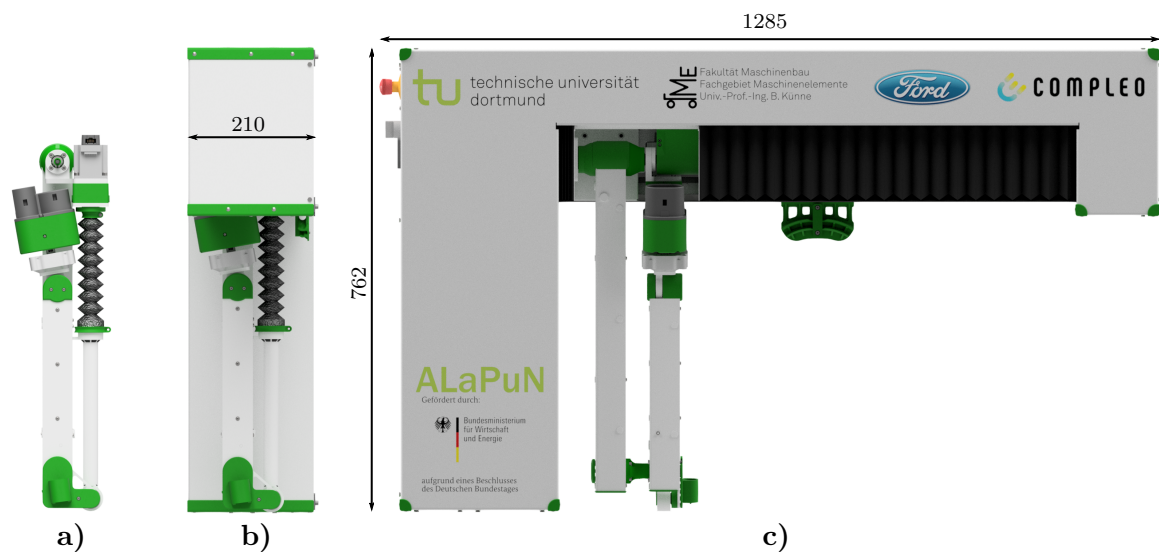


Abbildung 4.5: Konstruktion mit Außenmaßen

In den **Abbildungen 4.5 a) bis c)** wird die Gesamtkonstruktion des automatischen Ladesystems in der Home-Position dargestellt. In a) ist die Schulterlagerung im oberen Teil zu erkennen, die sich linear über eine Länge von 600 mm parallel zum geparkten Fahrzeug verfahren lässt. In der Home-Position ist der Stecker nach oben ausgerichtet und liegt somit innerhalb der Tiefe des Gehäuses, welches in 4.5 b) dargestellt wird. Die Tiefe der Konstruktion in Richtung zur Wand von 210 mm liegt somit nahe am Idealbereich von 200 mm, welcher in der Anforderungsliste vermerkt wird. Die Gesamtbreite von 1285 mm hat keinen negativen Einfluss auf das Parkverhalten, da es parallel zum Fahrzeug montiert wird.

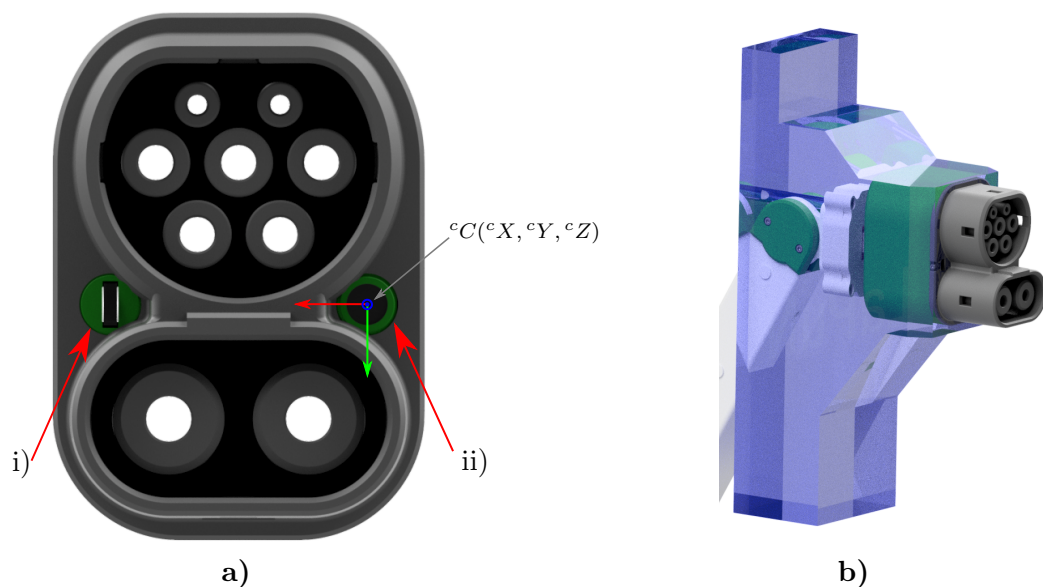
### 4.3 Stecker- und Inletmodifizierung

Für die Strategie der Inleterkennung wird zunächst der Ansatz der aktiven Marker verfolgt. Innerhalb des bereits vorgestellten Forschungsprojektes *ALanE* [WBRB15] konnte gezeigt werden, dass diese Strategie grundsätzlich als funktionsfähig bewertet wird, jedoch keine Untersuchungen hierzu durchgeführt und veröffentlicht wurden. Für das Erkennen von Infrarot-LEDs am Fahrzeug wird eine Endoskopkamera im Stecker untergebracht, bei der ein Infrarot-Passfilter vor der



Optik installiert wird. In **Abbildung 4.6 a)** wird der modifizierte CCS-Stecker dargestellt. Die Kamera wird im Stecker zwischen dem AC und dem DC Teil des CCS-Steckers untergebracht, da der empfohlene Bauraum für den Stecker nach DIN EN 62196-3 keinen allzu großen Spielraum um den Stecker zulässt (siehe **Abbildung 4.6 b)**). Durch die Positionierung der Kamera im Stecker befinden sich keine Bauteile außerhalb und der Bauraum wird somit minimiert. Zudem wird gewährleistet, dass der Roboterarm so nah wie möglich an das Inlet heranzufahren kann und so keine Art von *Blindflug*, bei dem der Laderoboter bezüglich der letzten erfassten Pose *blind* einsteckt, durchgeführt werden muss.

Der Einsatz mit Kamera und Filter wird zunächst außerhalb montiert, damit eine Kalibrierung der Kamera inklusive Filter außerhalb des CCS-Steckers erfolgen kann. So wird das Sichtfeld während der Kalibrierung nicht unnötig eingeschränkt. Bei der Kamera handelt es sich um eine kostengünstige ( $\approx 30$  Euro) Endoskopkamera mit einer Bildauflösung von  $1600 \times 1200$  und einer Videoauflösung bei 30 FPS von  $640 \times 480$  Pixel. Die Farbbild-Endoskopkamera verfügt über einen  $1/6$  in großen CMOS Sensor, einen Blickwinkel von  $54^\circ$ , eine Fix-Fokussierung von 30-60 mm und einen möglichen automatischen Weißabgleich. Der IR-Passfilter ist laut Lieferant (siehe **Abbildung A.1** im Anhang) durchlässig für eine Wellenlänge von 808-1064 nm mit einer Transmissivität von  $>83\%$ . Somit werden die Anteile des Sonnenlichts im Bereich des ultravioletten Lichts (UV: 100-380 nm) und des sichtbaren Lichts (VIS: 380-780 nm) herausgefiltert [WV16]. Des Weiteren ist der Stecker bezüglich der Pinbelegung nicht normgerecht. Innerhalb dieser Arbeit wird der CCS-Combo 2 Stecker zusätzlich zu den DC-Pins um die AC-Pins erweitert (s. Abb. 4.7 a)). Auch wenn hier höhere Kräfte bei späteren Untersuchungen zu erwarten sind, müssen diese mit einer neuen von Hand gesteckten Referenz (im späteren Versuchsbereich zu ermitteln) verglichen werden. Die Erweiterung um die AC-Pins liefert jedoch auch die Möglichkeit, mit einem Stecker



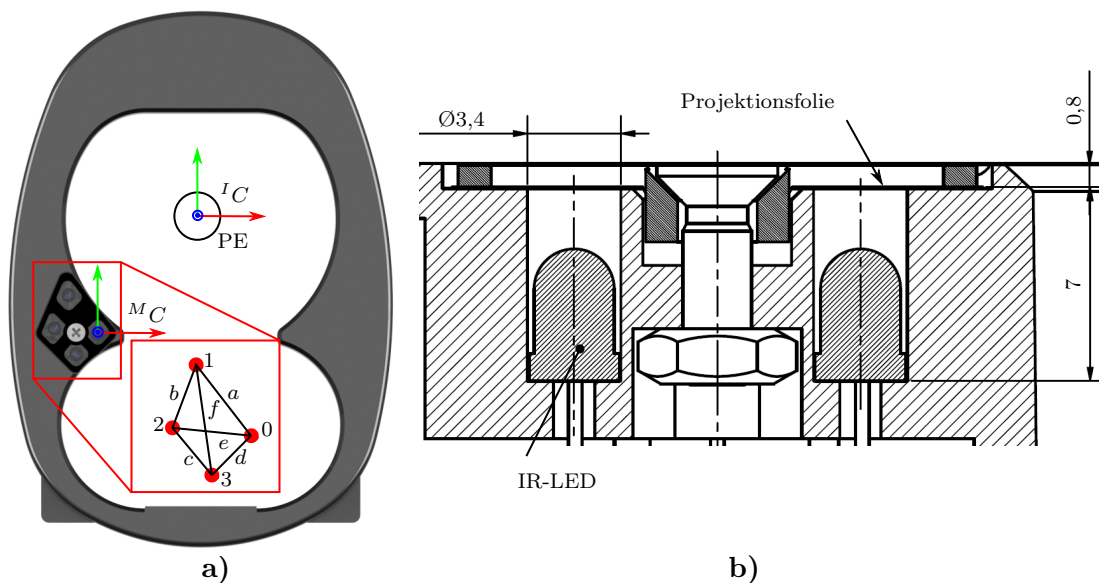
**Abbildung 4.6:** CCS-Steckermodifikation

a) CCS-Stecker mit AC- und DC-Pins und i) Mikroschalter und ii) Kameraeinsatz mit IR-Passfilter nach [BKK21], b) Empfohlener Bauraum (transparent blau) für Stecker nach DIN EN 62196-3

das AC und DC Laden zu ermöglichen, je nachdem, welche Pins aktiv angeschlossen werden. Sowohl aus Sicherheitsgründen als auch um Verschmutzungen zu verhindern, sollen während des AC Ladens die DC Pins im Inlet nicht frei liegen. Aus diesem Grund befindet sich bei den Fahrzeugen eine Abdeckkappe, die für das DC-Laden abgenommen werden würde. Auch dieser Aspekt befürwortet das entwickelte Steckerdesign, bei dem sowohl beim AC Laden als auch beim DC Laden die Außenkontur gleich ist. Für das automatische Ladesystem ist dies von Vorteil.

Da laut Datenblatt der Kamera das exakte Projektionszentrum im Inneren der Kamera nicht bekannt ist, wird die Position des Kamerakoordinatensystems auf die Linsenoberfläche hinter dem IR-Passfilter festgelegt. Der IR-Passfilter weist eine Dicke von 2 mm auf. Zudem ist der Kameraaufbau um 0,8 mm im Inlet versenkt. Das hier bestimmte Kamerakoordinatensystem befindet sich demnach um 2,8 mm in das Innere vom Steckergrund versetzt. Eine Abweichung zwischen Projektionszentrum und dem hier bestimmten Koordinatensystem kann zu Abweichungen bei der bestimmten Pose zwischen den Koordinatensystemen führen. Der Einfluss für die im folgenden Kapitel 5 beschriebene Prozedur des automatischen Steckens wird als vernachlässigbar eingestuft.

Das modifizierte Inlet, welches in **Abbildung 4.7 a)** dargestellt wird, zeigt die Modifizierung hinsichtlich der IR-LEDs, die als aktive Markierungen dienen. Bei dem Inlet handelt es sich um die Inlet-Front des Herstellers *PHOENIX CONTACT E-Mobility GmbH*. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, werden für eine eindeutige Posenberechnung mindestens vier Punkte benötigt. Nach [AW18] liefert eine quadratische Anordnung von vier Punkten eine robuste Posenbestimmung, während ein größtmöglicher Abstand die Posenbestimmung verbessert. Aus diesem Grund wer-



**Abbildung 4.7:** Inletmodifikation

- a) Inletmodifikation mit vier IR-LEDs und einer Projektionsfläche nach [BKK21]
- b) Schnittansicht in der  ${}^M X Z$ -Ebene zwischen den LEDs 0 und 2

den am Inlet vier IR-LEDs (Wellenlänge: 940 nm) rautenförmig implementiert, wobei die einzelnen Abstände im möglichen Bauraum vergrößert werden. In dieser Konfiguration befindet sich die LED 0 auf der entsprechenden Position gegenüber des Kameramittelpunktes. So wird gewährleistet, dass auch im eingesteckten Zustand mindestens eine LED erkannt wird.

**Tabelle 4.2:** Anordnung der IR-LED Marker  ${}^M\mathbf{P}_i$

IR-LED	${}^M\mathbf{P}_i(M X_i, M Y_i, M Z_i)$ in [mm]
0	( 0, 0, 0)
1	(-7, 9, 0)
2	(-10,4, 1, 0)
3	(-5,2, -5,2, 0)

Die Anordnung der IR-LEDs wird in **Tabelle 4.2** in der Schreibweise des Markerkoordinatensystems  ${}^M C$  beschrieben. Dabei wird für die Bilderkennerung der Nullpunkt in die IR-LED 0 gelegt. Der Nullpunkt des Markerkoordinatensystems  ${}^M C$  im Inletkoordinatensystem  ${}^I C$  liegt bei (-24,8 mm, -27,4 mm, 1,45 mm). Die  $Z$ -Komponente ist nicht Null, da der PE-Pin nicht bündig mit der Eintrittsebene (Versatz von 2,25 mm) und die Projektionsfläche ebenfalls 0,8 mm in die Eintrittsebene versenkt ist. Die vorliegende Anordnung weicht von der symmetrischen Rautenanordnung aus [BKK21] ab. Innerhalb weiterer Versuche hat sich gezeigt, dass bei größeren Entfernungen zwischen Kamera und LEDs von  $> 700$  mm die erkannten LEDs dazu tendieren, ineinander zu verlaufen, da die Abstände zwischen den LEDs zu gering sind. Die Erkennung wird somit instabil. Die Schlussfolgerung ist das vorliegende Vergrößern der LED-Abstände zueinander.

Da die IR-LEDs inhomogen leuchten und dies zu Problemen in der Erkennung des Mittelpunktes führen kann, werden die LEDs um 7 mm im Inlet versenkt, sodass eine Projektionsfläche auf der Inletoberfläche installiert werden kann. In **Abbildung 4.7 b)** wird dies im Detail dargestellt. Dabei werden die IR-LEDs von vorne eingesetzt. Hierbei zentrieren sich diese und werden auf einem Absatz axial festgelegt und von hinten verklebt. Die Projektionsfläche ist die Diffusionsfolie 3735-50 vom international vertretenen Hersteller *3M*. Laut Hersteller wird diese eingesetzt, um eine gleichmäßige Ausleuchtung und eine gute Lichtstreuung bei geringem Leuchtabstand zu erreichen. Aus diesem Grund wird sie in diesem Fall passend zugeschnitten, aufgeklebt und mit Hilfe einer 3D-gedruckten Halterung aufgeschraubt und gesichert, damit sie plan aufliegt und vor äußeren Einflüssen weitestgehend geschützt ist. Die Projektionsfläche dient speziell der Aufgabe, homogene und möglichst ideal runde Markierungen zu projizieren, die best möglichst detektiert werden können. Zudem soll die Projektionsfläche dazu verhelfen, bei geneigten Inlets die LEDs geeignet zu erkennen. Erste Vorversuche zeigen, dass die IR-LEDs bei geringen Abständen ohne das Verwenden der Folie zu inhomogen leuchten, sodass es zu Abweichungen in der Bilderkennerung führen kann. Durch das Versenken der IR-LEDs im Inlet und der Projektionsfläche können die Leuchtdioden in Form von *Blobs* detektiert werden.

## 5 Steuerungsaufbau und automatische Ladeprozedur

In diesem Kapitel wird auf die Robotersteuerung und auf den Prozessablauf für die automatische Ladeprozedur eingegangen. Hierzu wird zunächst in **Abschnitt 5.1** der entwickelte Aufbau der Steuerung innerhalb des zuvor beschriebenen Open-Source Frameworks *Robot Operating System (ROS)* beschrieben und auf dessen Verknüpfungen eingegangen. Anschließend wird die Kalibrierung der Kamera und die Ermittlung der intrinsischen Kameraparameter beschrieben. Zudem wird der Spindelantrieb für den Unterarm geometrisch beschrieben und die Abhängigkeit von Winkel zu Spindellänge numerisch gelöst. Darauffolgend werden in **Abschnitt 5.2** die entwickelte Ladeprozedur und deren Methodiken und Eigenschaften beschrieben, mit der der automatische Einsteckvorgang durchgeführt wird. Dieser wird in einzelne Teilschritte unterteilt.

### 5.1 Steuerungsaufbau

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Umsetzung des Ladeprozesses im bereits in Abschnitt 2.5 beschriebenen *Robot Operating System* eingegangen. Für die Bildverarbeitung wird anschließend die Kamera mit vorgeschaltetem IR-Passfilter kalibriert. Abschließend wird auf die Positions- und Geschwindigkeitsregelung des Unterarms eingegangen, da für diese eine numerische Lösung gewählt wird.

#### 5.1.1 Aufbau im ROS

Die Steuerung der Roboterkinematik und das Umsetzen der im folgenden Abschnitt 5.2 beschriebenen Schritte der Bildverarbeitung und Posenberechnung wird innerhalb des Open-Source Frameworks ROS implementiert. Hierfür wird die Version *Melodic Orenia* auf dem Betriebssystem Ubuntu 18.04 verwendet. In **Abbildung 5.1** wird der Aufbau schematisch mithilfe eines RQT-Plots dargestellt. Dabei werden die einzelnen Nodes als ovale Felder und die ausgetauschten Topics als Rechteckfelder dargestellt. Die Main-Nodes werden grün markiert. Sie werden im Folgenden kurz erläutert.

Beginnend wird als Input das Kamerabild mittels der Node `/usb_cam` [PT20] in der Topic `/usb_cam/image_raw` an den Node `/charging` weitergeben. Der Node `/charging` beinhaltet den Gesamtprozess und die Ladeprozedur für den automatischen Steckvorgang, der in Abschnitt 5.2 näher erläutert wird. Zum Starten der Ladeprozedur wird zu Beginn ein MQTT Befehl über die `/mqtt_bridge` [Hay16] benötigt. Dieses kann vom Fahrzeug oder per Versenden innerhalb des Netzwerkes erfolgen. Das Planen der Trajektorie und das Ausführen der Bewegungen wie das Verfahren in die Home-Position oder eine PTP-Vorpositionierung erfolgt über den `/mo-`

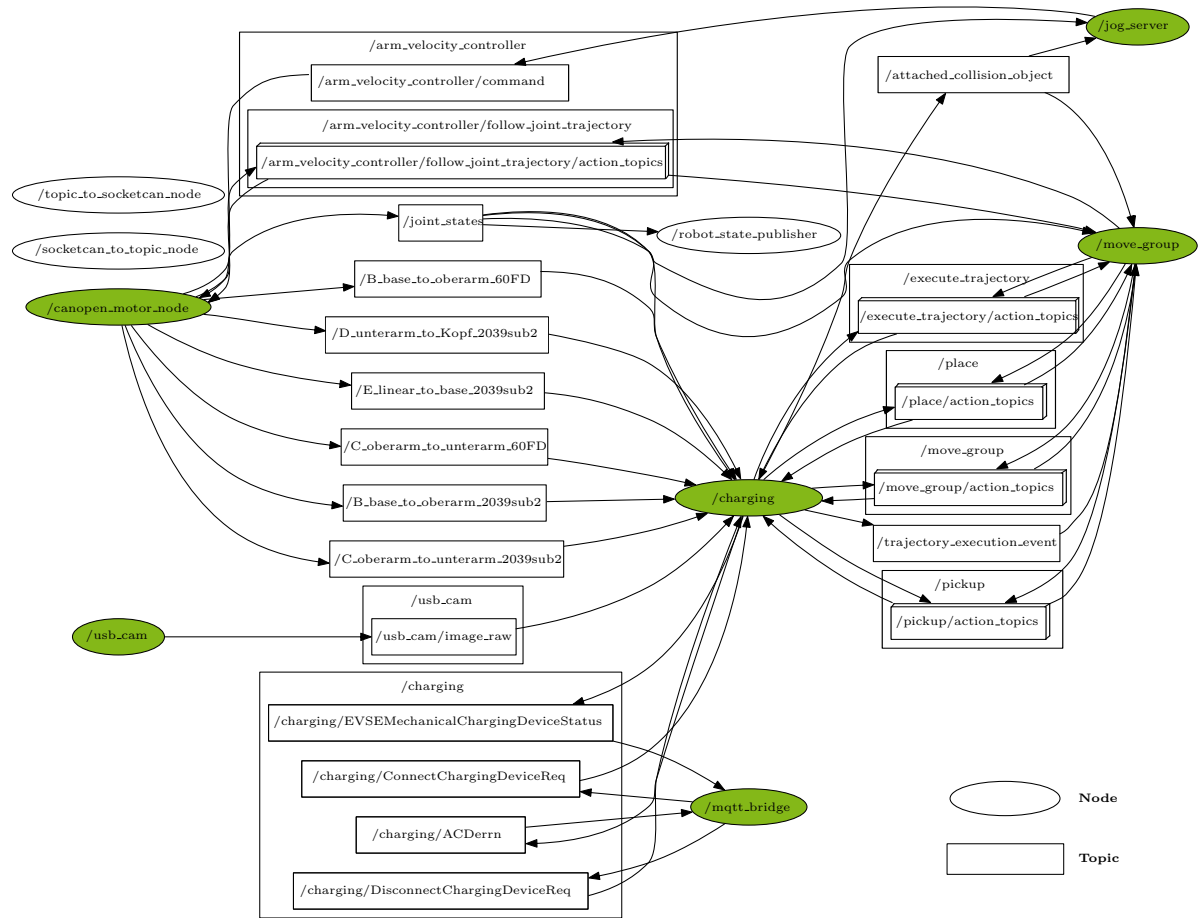


Abbildung 5.1: RQT-Graph des Steuerungsaufbaus in ROS

*ve\_group* [Col14] Node. Für das Visual Servoing werden die ermittelten Kamerageschwindigkeiten  $\mathbf{v}_c$  an den */jog\_server* übertragen und von dem aus die Geschwindigkeiten der einzelnen Bewegungsachsen über den */arm\_velocity\_controller* an den */canopen\_motor\_node* [Lue21] weitergegeben. Von hier werden die Daten an die Motortreiberkarten übertragen. Seitens der */canopen\_motor\_node* werden zudem an den */charging* Node die drehmomentbildenden Anteile der Motorströme  $I_q$  gesendet, sodass die zulässigen Drehmomente überwacht und begrenzt werden können.

Durch die Umsetzung im ROS wird eine Steuerung entwickelt, die auf einem Open-Source Framework basiert. Innerhalb der hier vorgestellten Entwicklung wird auf mehrere bereits veröffentlichte Packages zurückgegriffen, die stetig weiterentwickelt und optimiert werden. Der in Abbildung 5.1 gezeigte Aufbau bietet eine geeignete Möglichkeit, weitere Bildverarbeitungen oder Methodiken zu implementieren und das System zu erweitern.

### 5.1.2 Kamerakalibrierung

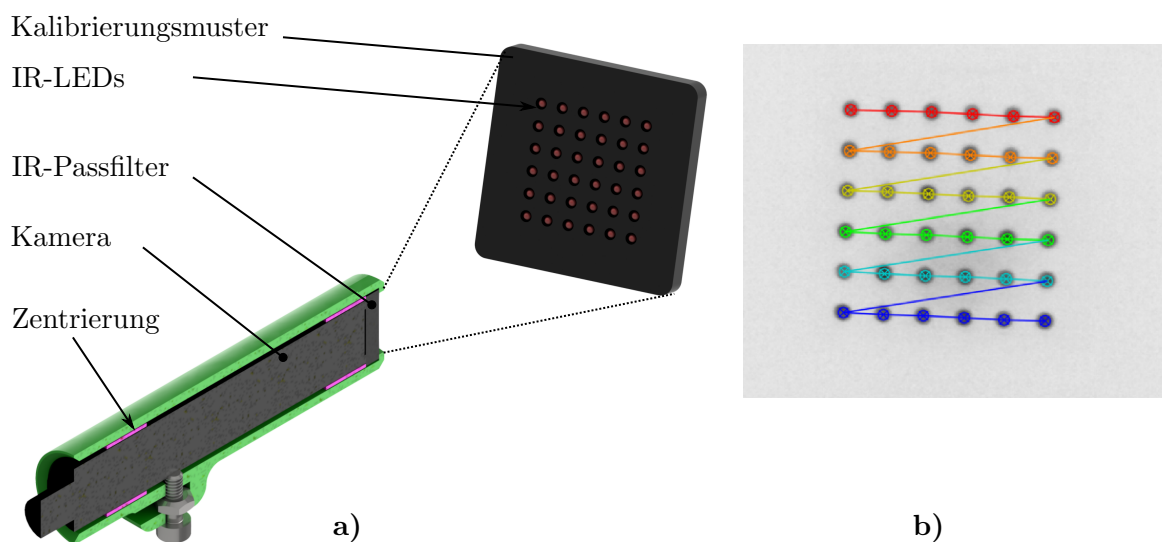
Für eine ausreichend genaue Posenbestimmung ist das Bestimmen der intrinsischen Kameraparameter erforderlich. Nach [BL15] ist es von erheblicher Bedeutung, eine Kamerakalibrierung

zum Extrahieren von 3D-Daten von erkannten Objekten durchzuführen. Für den vorliegenden Anwendungsfall wird die verwendete Kamera für die Kalibrierung aus dem CCS-Stecker (siehe Abb. 4.6) entnommen, da der Sichtbereich ansonsten durch den Stecker selbst eingeschränkt wird. Die Kamera ist in einem 3D gedruckten Einsatz montiert und wird über Ringe vor dem Infrarotpassfilter positioniert und zentriert. Somit kann eine Kalibrierung des Systems stattfinden, ohne dass der Aufbau von Kamera und Filter anschließend erneut demontiert werden muss.

In **Abbildung 5.2 a)** wird der Aufbau für die Kalibrierung dargestellt. Hierfür wird das ROS-Package [BM20] verwendet, welches auf die OpenCV Kamerakalibrierung nach [Zha00] für das Lochkamera-Model zurückgreift. Da eine feste Brennweite vorliegt und sich der Fokusbereich nicht ändert, ist eine Kamerakalibrierung nach dem Verfahren geeignet [RE21]. Die Kalibrierung wird in der Regel anhand eines Schachbrettmusters oder einer rechteckigen Anordnung von Kreisen durchgeführt. Wie in **Abbildung 5.2 a)** dargestellt, wird in diesem Fall ein Muster mit 6x6 IR-LEDs ( $\varnothing 3$  mm) im Abstand von 6,8 mm verwendet, die auf einer 3D gedruckten Halterung montiert werden. Zudem wird ein Papier mit dem selben Muster als Projektionsfläche aufgeklebt, um die Umrandungen der LEDs auf eine Ebene zu projizieren und um den Einfluss von Ungenauigkeiten des 3D-Drucks zu verringern. In **Abbildung 5.2 b)** ist dargestellt, wie das Muster erkannt und die Kalibrierung bei händische Bewegung der Kamera durchgeführt wird. Dabei wird das Graustufenbild invertiert, damit die projizierten Blobs in schwarz dargestellt werden und diese vom Algorithmus erkannt werden können.

Die Kalibrierung der Kamera ergibt die intrinsischen Kameraparameter in Form von

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1742,68 & 0 & 783,02 \\ 0 & 1745,68 & 713,74 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$



**Abbildung 5.2:** Kamerakalibrierung

a) Aufbau des Kalibrierungsvorhabens

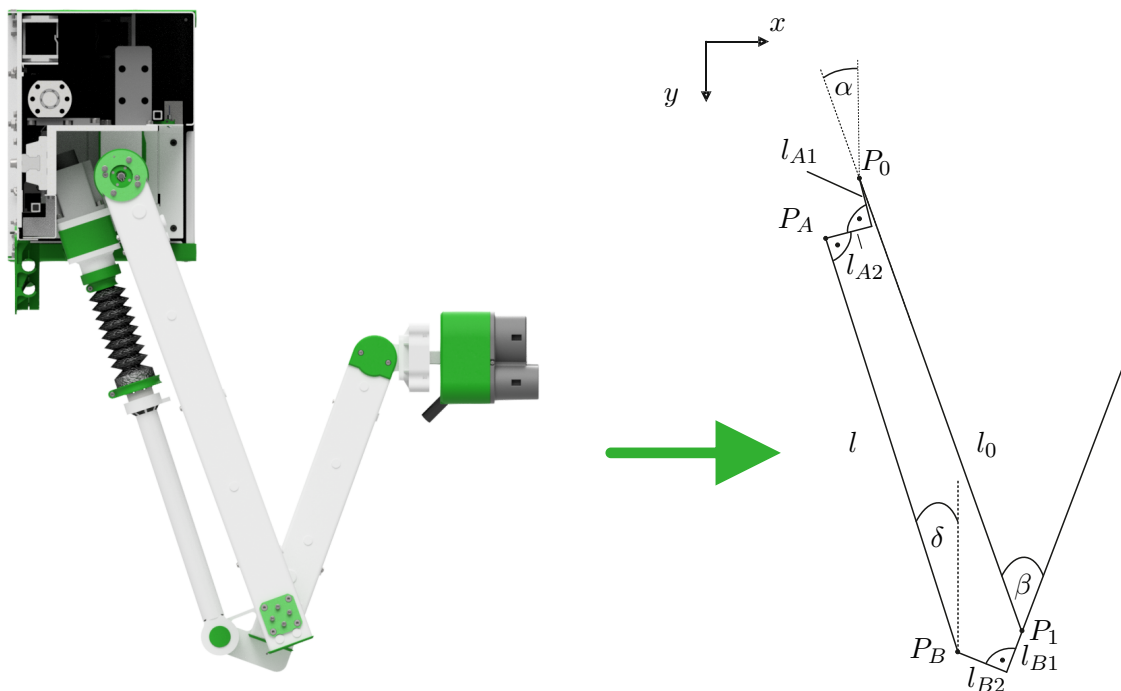
b) Erkennung des Musters während der Kalibrierung (Invertiertes Graustufenbild)

und einem radialen Verzerrungsparameter erster Ordnung (*Plumb Bob Model*) von:  $k_{ud} = k_1 = 0,055$ . Dies entspricht einer geringen tonnenförmigen Verzerrung. Tangentiale Verzerrungsparameter oder radiale höherer Ordnung werden seitens der hier verwendeten *VISP*-Bibliothek nicht mitberücksichtigt. Zudem wird die Approximation  $k_{du} = -k_{ud} = -k_1$  verwendet, die bei der Verwendung von *VISP* als geeignet bezeichnet wird [Vis20a].

Eine Hand-Auge-Kalibrierung wird zunächst vernachlässigt. Durch das Positionieren der Kamera im Stecker und aufgrund der kurzen Zielentfernung zwischen Stecker und Inlet wird angenommen, dass eine Auge-Hand-Kalibrierung keine wesentliche Verbesserung bezüglich des Steckerfolgs oder der wirkenden Kräfte und Momente liefert. In mehreren Untersuchungen wie [QLL<sup>+</sup>21] oder auch [PSLW20] befindet sich die Kamera außerhalb des Steckers, weshalb eine Hand-Auge-Kalibrierung durchgeführt wird. In dem hier vorliegenden Fall wird versucht, auf eine weitere Kalibrierung zu verzichten. Es wird angenommen, dass geringe abweichende Steckbewegungen durch die elastische Ausgleichseinheit kompensiert werden können.

### 5.1.3 Spindeltrieb des Unterarms

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, wird der Unterarm über eine Längenänderung der Linearspindel bewegt. Da die Linearspindel drehbar um die Schulterachse und drehbar am Ellbogen gelagert ist, ist eine Funktion  $l(\beta)$  abhängig von den Längen und dem Eingabewinkel  $\beta$  zu bestimmen. Die geometrischen Abhängigkeiten werden in **Abbildung 5.3** dargestellt. Dabei ist der Winkel  $\alpha$  der Winkel zum Verfahren des Oberarms und bezieht sich auf den Winkel zwischen der eingezeichneten Vertikalachse  $y$  und dem ausgelenkten Oberarm mit der Länge  $l_0$ . Der Winkel  $\delta$  ist ein Hilfswinkel für die geometrischen Beziehungen und bezieht sich auf den Winkel



**Abbildung 5.3:** Schematische Abhängigkeiten für die Spindellänge und der resultierenden Bewegung des Unterarms [Wie20]

zwischen der Vertikalachse  $y$  und der Spindel mit der Länge  $l$ . Der Winkel  $\delta$  ist abhängig von den Winkeln  $\alpha$  und  $\beta$ . Die definierten Längen der Roboterkinematik werden in **Tabelle 5.1** aufgeführt.

**Tabelle 5.1:** Geometrische Längen der Roboterkinematik

Länge	$l_0$	$l_{A1}$	$l_{A2}$	$l_{B1}$	$l_{B2}$
Wert [mm]	513	74	30	55	45

Zu Beginn wird der Nullpunkt (0,0) in die Schulterachse in den Punkt  $P_0$  gelegt. Anschließend wird mithilfe der Gleichungen

$$\begin{pmatrix} \sin(\delta) \\ \cos(\delta) \end{pmatrix} l_{A1} + \begin{pmatrix} -\cos(\delta) \\ \sin(\delta) \end{pmatrix} l_{A2} = P_B + \begin{pmatrix} -\sin(\delta) \\ -\cos(\delta) \end{pmatrix} l \quad (5.2)$$

der Punkt  $P_A$  zum einen vom Ursprung  $P_0$  und zum anderen ausgehend vom Punkt  $P_B$  über die Spindellänge  $l$  beschrieben. Durch Umstellen der  $x$ -Komponente ergibt sich für die Länge  $l$  die Gleichung

$$l = \frac{\sin(\delta) \cdot l_{A1} - \cos(\delta) \cdot l_{A2} - P_{Bx}}{-\sin(\delta)}, \quad (5.3)$$

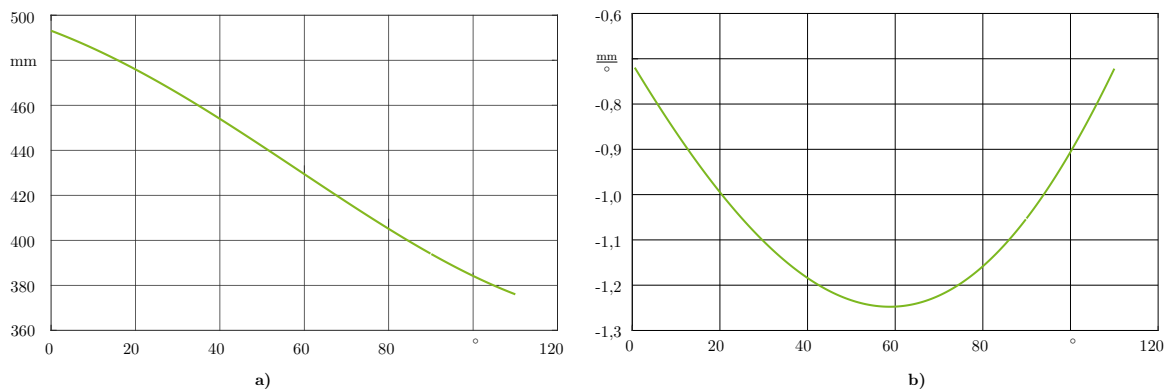
in der  $P_{Bx}$  die  $x$ -Komponente des Punktes  $P_B$  darstellt [Wie20]. Dieser wird über die geometrischen Abhängigkeiten charakterisiert durch

$$P_B = P_1 + \begin{pmatrix} -\sin(\beta - \alpha) \\ \cos(\beta - \alpha) \end{pmatrix} l_{B1} + \begin{pmatrix} -\cos(\beta - \alpha) \\ -\sin(\beta - \alpha) \end{pmatrix} l_{B2} \quad \text{mit} \quad P_1 = \begin{pmatrix} \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha) \end{pmatrix} l_0. \quad (5.4)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 5.3 in den  $y$ -Anteil der Gleichung 5.2 kann  $\delta$  mittels

$$\delta = 2 \arctan \left( \frac{\sqrt{(P_{Bx})^2 + (P_{By})^2 - (l_{A2})^2} - P_{Bx}}{P_{Bx} - l_{A2}} \right) + 2\pi n \quad \text{mit} \quad n = 0 \quad (5.5)$$

abhängig von  $P_{Bx}$  und  $P_{By}$  formuliert werden. Da die Gleichung 5.5 lediglich für einen Winkelbereich einer Umdrehung gültig sein muss, wird der Summand  $2\pi n$  zu Null. Die gesuchte Spindellänge  $l(\beta)$  in Abhängigkeit von  $\beta$  kann mithilfe der Gleichung 5.5 eingesetzt in 5.3 herge-



**Abbildung 5.4:** Funktionsverläufe für den Spindelantrieb des Unterarms [Wie20]

- a) Funktionsverlauf für  $l(\beta)$
- b) Funktionsverlauf für  $dl(\beta)/d\beta$



stellt werden. Die Gleichung ist nichtlinear und wird numerisch gelöst [Wie20]. Die Funktion  $l(\beta)$  kann somit ausgedrückt werden durch

$$l(\beta) = - \frac{55 \sin(\beta) - 55 \cos\left(2 \arctan\left(\frac{T_0}{T_1}\right)\right) - 45 \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + 74 \sin\left(2 \arctan\left(\frac{T_0}{T_1}\right)\right)}{\sin\left(2 \arctan\left(\frac{T_0}{T_1}\right)\right)} \quad (5.6)$$

$$T_0 = 55 \cos(\beta) - 45 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) - \sqrt{\left(55 \cos(\beta) - 45 \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + 513\right)^2 + \left(55 \sin(\beta) - 45 \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right)^2 - 3023 + 513}$$

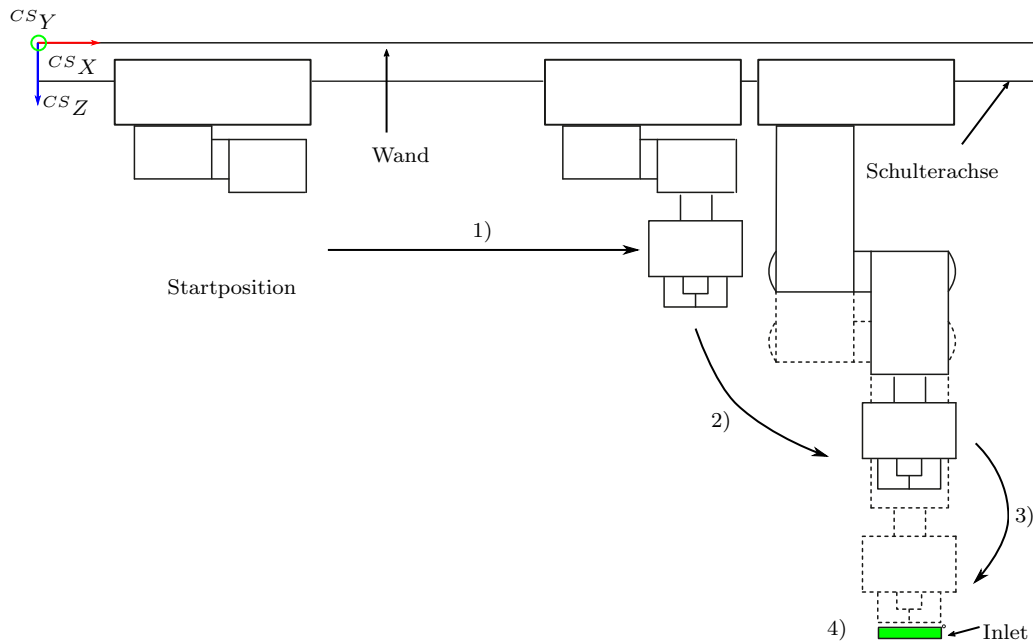
$$T_1 = 55 \sin(\beta) - 45 \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + 55$$

Der Winkel  $\alpha$  hat demnach keinen Einfluss auf die Länge  $l$  und kann als eine Konstante angenommen werden. Für den Unterarm wird der Winkelbereich auf  $\beta \in [0^\circ 110^\circ]$  eingeschränkt, da sich die Drehrichtung der Spindel ansonsten ändern muss und der Unterarm beim Umkehrpunkt instabil wird. Die Spindellänge  $l$  abhängig vom Winkel  $\beta$  wird in **Abbildung 5.4 a)** dargestellt. Für den Winkel  $\beta = 90^\circ$  ist  $l(\beta)$ , wie auch in **Abbildung 5.4 a)** zu erkennen ist, nicht definiert, da der Term  $T_0$  zu 0 wird. Wie zuvor beschrieben, verfährt der Roboterarm mittels Geschwindigkeitsregelung. Demnach wird die Ableitung  $\frac{dl}{d\beta}$  benötigt, welche in **Abbildung 5.4 b)** dargestellt und im Anhang als **Gleichung B.1** aufgeführt wird. [Wie20]

Mithilfe der beiden Funktionsverläufe im definierten Winkelbereich kann so seitens der Steuerung ein Winkel  $\beta$  beziehungsweise eine Winkeländerung  $\frac{d\beta}{dt}$  verarbeitet und in eine Längenänderung der Spindel umgerechnet werden. Vor der Übergabe an den Motortreiber wird die Spindelsteigung und die Umrechnung in die benutzerdefinierten Einheiten mit berücksichtigt.

## 5.2 Automatische Ladeprozedur

In diesem Abschnitt wird die Prozedur des automatischen Steckens beschrieben. In **Abbildung 5.5** wird der Ablauf schematisch aus der Vogelperspektive dargestellt. Sobald sich das elektrische Fahrzeug vor dem Laderoboter positioniert und die Ladeklappe selbstständig geöffnet hat, fordert das Fahrzeug via WLAN-Verbindung mit der Ladestation einen Ladevorgang an. Zu diesem Zeitpunkt ist gewährleistet, dass das Fahrzeug sich nicht mehr bewegen kann. Nach DIN EN ISO 15118-2 darf erst dann der Laderoboter aktiviert werden. Schritt 1) beinhaltet demnach das Herunterfahren des Kopfes aus der Ausgangsposition und das Ausrichten des Steckers und der darin montierten Kamera nach vorne in Richtung Inlet beziehungsweise Fahrzeug. Dieser Schritt 1) umfasst nun das Suchen nach den Markierungen in Form von IR-LEDs. Das Suchen erfolgt durch lineares Verfahren entlang der Linearführung. Sobald die Markierungen erkannt und als plausibel bewertet werden, wird eine Pose berechnet und der Laderoboter bewegt sich im Schritt 2) auf das Inlet mithilfe einer *Point-To-Point* (PTP) Bewegung zu. Diese Vorsteuerung übernimmt anfangs eine Grobpositionierung vor dem Inlet. Um zu überprüfen, ob sich das korrekte Fahrzeug vor dem Ladesystem befindet, wird eine Identifikationsprüfung durchgeführt.



**Abbildung 5.5:** Ablauf der automatischen Ladeprozedur nach [BKK21]

- 1) Stecker nach vorne ausrichten und parallel zum Fahrzeug nach dem Inlet suchen,
- 2) In Startposition fahren mittels PTP(Point-To-Point-Bewegung) und Identifizierung sicherstellen, 3) Visual Servoing, 4) Einstecken, Laden und Ausstecken

Hierzu findet ein Informationsaustausch durch ein Blinken der LEDs in definierten Zeitschritten statt. Erst in Schritt 3) erfolgt eine Regelung in Form eines Visual Servoings, bei dem sich der Stecker ausgerichtet vor dem Inlet positioniert und für den abschließenden Schritt 4) bereit ist, um einstecken zu können. Schritt 4) umfasst demnach das Einstecken, Laden und Ausstecken. Im Folgenden werden die Einzelschritte näher erläutert und es wird auf das entwickelte Verfahren eingegangen. Vereinzelt wird das Vorgehen bereits in [BKK21] aufgeführt.

### 5.2.1 Suchen der Markierungen und PTP-Vorpositionierung

Im ersten Schritt hat das Finden der IR-LEDs Priorität, um sicherzustellen, dass das zu ladende Fahrzeug in Reichweite geparkt hat und die Ladeklappe geöffnet ist. Hierzu bewegt sich der Laderoboter als erstes aus seiner *Home-Position*, in der der Ladestecker nach oben geklappt ist (siehe Abb. 4.5), in die *Suchposition*. Hierbei wird der Stecker am Handgelenk horizontal nach vorne gedreht, sodass mithilfe der Kamera im Stecker die IR-LEDs sichtbar sein sollten. Anschließend verfährt der Laderoboter mit einer Geschwindigkeit von 12 mm/s entlang der Linearführung parallel zum Fahrzeug bis zu 600 mm und sucht nach den Markierungen. Das Suchen erfolgt über eine *Blob Detection*, bei der ein Bereich mit ähnlicher Graustufe im Graustufenbild mithilfe des *Freeman Chain Codes* (siehe Abbildung 2.15)) gesucht wird. Da diese Bereiche nicht ideal rund sein können, wird eine Genauigkeit bezüglich eines idealen Kreises von 80% anhand von ersten Vorversuchen empirisch ermittelt. Zudem wird ein Schwellwert für die minimale Graustufe im Bereich von  $[0, 255] \in \mathbb{N}_0$  auf  $g_{\min} = 160$  gesetzt, um die schwarzlastigen Bereiche beim Suchen auszuschließen. Sobald mindestens vier Blobs detektiert werden können, ist eine Plausibilitätsprüfung durchzuführen, um sicherzustellen, dass eine Pose anhand der entsprechend richtigen Markierungen berechnet werden kann. Die Plausibilitätsprüfung erfolgt dabei angelehnt an das Vorgehen nach [WBRB15].

Von den detektierten Blobs werden die Mittelpunkte  $\mathbf{p}_i \in \mathcal{P}$  mit  $\#\mathcal{P} \geq 4$  bestimmt. Anhand der Mittelpunkte ist anschließend die Kombination der sichtbaren Mittelpunkte zu wählen, die mit höchster Wahrscheinlichkeit der Anordnung der IR-LEDs im Fahrzeug entsprechen. Hierfür werden die Abstände der detektierten Punkte  $\mathbf{p}_i$  mit den vordefinierten Abständen der LEDs im Inlet nach Tabelle 4.2 ins Verhältnis zueinander gesetzt. Die vorbestimmten Abstände  $l_{i,j,\text{ref}} = \|\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j\|$  werden zu Beginn einmalig berechnet, während die Abstände der detektierten Mittelpunkte  $l_{ij} = \|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i\|$  bei jeder Bildaufnahme ermittelt werden. Es sind folgend die Längenverhältnisse  $r_i$  für jede Viererkombination  $\mathbf{p}_{mnoq} \subseteq \mathcal{P}$

$$\mathbf{p}_{mnoq} = \{\{\mathbf{p}_m, \mathbf{p}_n, \mathbf{p}_o, \mathbf{p}_q\} | \{\mathbf{p}_m, \mathbf{p}_n, \mathbf{p}_o, \mathbf{p}_q\} \subseteq \mathcal{P} \wedge m \neq n \neq o \neq q\} \quad (5.7)$$

zu berechnen. Dabei wird als Eingrenzung hinzugefügt, dass alle Punkte unterschiedlich sein müssen. Die Verhältnisse  $r_i$  werden definiert zu

$$\begin{aligned} r_1(\mathbf{p}_{mnoq}) &= \frac{\frac{l_{mq}}{l_{mn}} \cdot \frac{l_{mo}}{l_{mn}}}{\frac{l_{03,\text{ref}}}{l_{01,\text{ref}}} \cdot \frac{l_{02,\text{ref}}}{l_{01,\text{ref}}}} \quad , \quad r_2(\mathbf{p}_{mnoq}) = \frac{\frac{l_{mn}}{l_{no}} \cdot \frac{l_{oq}}{l_{qn}}}{\frac{l_{01,\text{ref}}}{l_{12,\text{ref}}} \cdot \frac{l_{23,\text{ref}}}{l_{31,\text{ref}}}} \\ r_3(\mathbf{p}_{mnoq}) &= \frac{\frac{l_{no}}{l_{oq}} \cdot \frac{l_{mo}}{l_{mn}}}{\frac{l_{12,\text{ref}}}{l_{23,\text{ref}}} \cdot \frac{l_{02,\text{ref}}}{l_{01,\text{ref}}}} \quad , \quad r_4(\mathbf{p}_{mnoq}) = \frac{\frac{l_{oq}}{l_{qm}} \cdot \frac{l_{oq}}{l_{qn}}}{\frac{l_{23,\text{ref}}}{l_{30,\text{ref}}} \cdot \frac{l_{23,\text{ref}}}{l_{31,\text{ref}}}} \end{aligned} \quad (5.8)$$

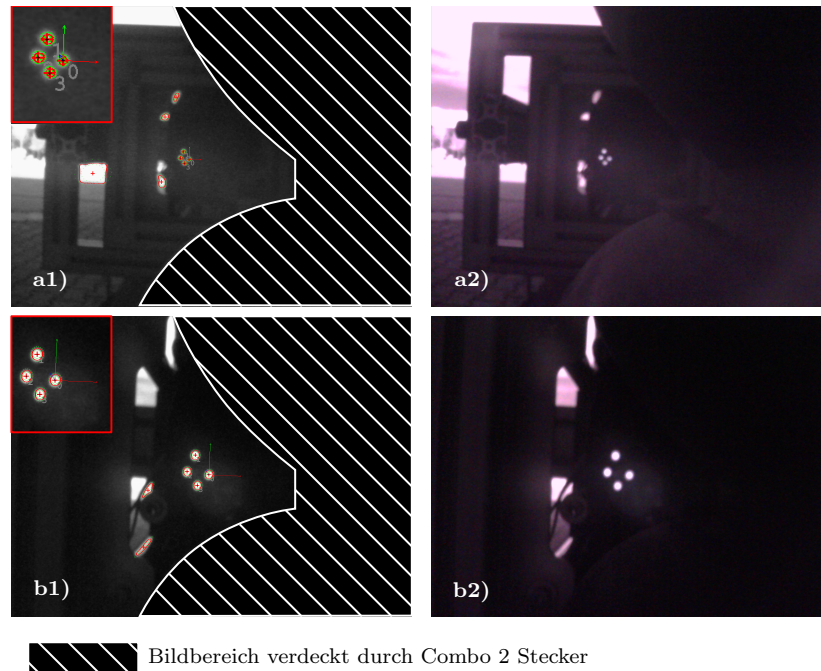
bei denen sich im Zähler die Längenverhältnisse der detektierten Mittelpunkte und im Nenner diese der Referenzpunkte befinden. Es werden dabei einzelne Seitenlängen des Vierecks mit einander multipliziert und mit der entsprechenden Referenz ins Verhältnis gesetzt. Die Länge  $l_{01,\text{ref}}$  entspricht hier beispielsweise der Länge  $a$  in Abbildung 4.7. Der Wertebereich der Verhältnisse  $r_i$  wird dabei auf  $0 < r_i \leq 2$  mit  $r_i \in \mathbb{R}$  eingegrenzt. Liegt das Verhältnis über zwei, kann diese Punktekombination  $\mathbf{p}_{mnoq}$  als unplausibel betrachtet und ausgeschlossen werden. Anhand der vier ermittelten Verhältnisse kann eine Plausibilität  $pl$  mithilfe der Gleichung

$$pl(\mathbf{p}_{mnoq}) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 1 - |1 - r_i(\mathbf{p}_{mnoq})|. \quad (5.9)$$

bestimmt werden. Durch die Eingrenzung des Wertebereichs für  $r_i$  ergibt sich für die Plausibilität ein Wertebereich von  $0 \leq pl(\mathbf{p}_{mnoq}) \leq 1$  mit  $pl(\mathbf{p}_{mnoq}) \in \mathbb{R}$ . Dabei entspricht der Wert eins der 100% Übereinstimmung und Sicherstellung der richtigen Detektion. Aufgrund von Abbildungsfehlern und der möglichen winkligen Ausrichtung des Inlets oder einer Fehlpositionierung des Fahrzeugs ist ein Wert von eins äußerst unwahrscheinlich. Aus diesem Grund wird die Auswahl der höchsten Plausibilität  $\mathbf{p}_{mnoq}^*$  und somit der zu betrachteten Marker durch die Formulierung

$$\mathbf{p}_{mnoq}^* = \{\mathbf{p}_{mnoq} | pl(\mathbf{p}_{mnoq}) = \max_{\mathbf{p}_{mnoq}} (pl(\mathbf{p}_{mnoq})) \wedge pl(\mathbf{p}_{mnoq}) > 0,80\}. \quad (5.10)$$

bestimmt. Diese umfasst zum einen, dass die Konfiguration mit der höchsten Plausibilität gewählt wird und zum anderen, dass dieser Wert mindestens über 0,80 liegen muss.



**Abbildung 5.6:** Plausibilitätsprüfung anhand unterschiedlicher Entfernungen

- a) Mehrere detektierte Blobs und richtige Auswahl durch Plausibilitätsprüfung aus einer Entfernung von  ${}^cZ_M = 550$  mm (rechts: Raw-Bild)  
 b) Detektierte LEDs mit Plausibilitätsprüfung, Entfernung:  ${}^cZ_M = 200$  mm (rechts: Raw-Bild)

In **Abbildung 5.6 a)** wird die Plausibilitätsprüfung während des Suchens nach den Markern gezeigt. In a1) ist zu erkennen, dass mehrere hellere Flächen aus einer Entfernung von 550 mm zwischen Kamera und Inlet als Blobs erkannt und diese im Bild markiert werden. Jedoch können mithilfe der Plausibilitätsprüfung die richtigen vier Blobs ausgewählt werden (hier durch ein Koordinatensystem in LED 0 dargestellt). In **b1)** wird das Vorgehen aus einer Entfernung von 200 mm gezeigt. Auch hier werden die vier richtigen IR-LEDs in Form der Blobs erkannt und auf deren Plausibilität überprüft. Ein zusätzlicher Aspekt der hier eingesetzten Bilderkennung wird in **Abbildung 5.6** aufgeführt. Durch die Positionierung der Kamera im Inlet zwischen dem AC- und dem DC-Teil des Combo 2 Steckers wird ein erheblicher Anteil von  $\approx 49\%$  des Bildes verdeckt. Dieser Einfluss ist unter anderem in späteren Kapiteln zu untersuchen.

Im Anschluss an die bestandene Plausibilitätsprüfung wird die Pose zwischen Kamera und Inlet bestimmt. Hierfür wird der nichtlineare *LOWE* Ansatz [CMS<sup>+</sup>12] verwendet. Der Vorteil dieses Ansatzes ist die Fehlerminimierung durch den numerisch iterativen Levenberg-Marquardt Algorithmus, wodurch eine hohe Genauigkeit erreicht wird. Damit der Ansatz konvergiert, wird eine lineare Initialisierung gefordert. Diese kann durch einen linearen Ansatz durchgeführt werden. In dem hier beschriebenen Anwendungsfall wird zunächst mit einem linearen Lagrange-Ansatz die Pose initialisiert. Auf diese beiden Ansätze kann in der frei verfügbaren *VISP*-Bibliothek [MSC05] zurückgegriffen werden.

Nach der Detektion der IR-LEDs und einer erfolgreichen Posenbestimmung bewegt sich in Schritt 2) (siehe Abb. 5.5) der Roboterarm zunächst vor das Inlet mit einem Zielabstand zwischen

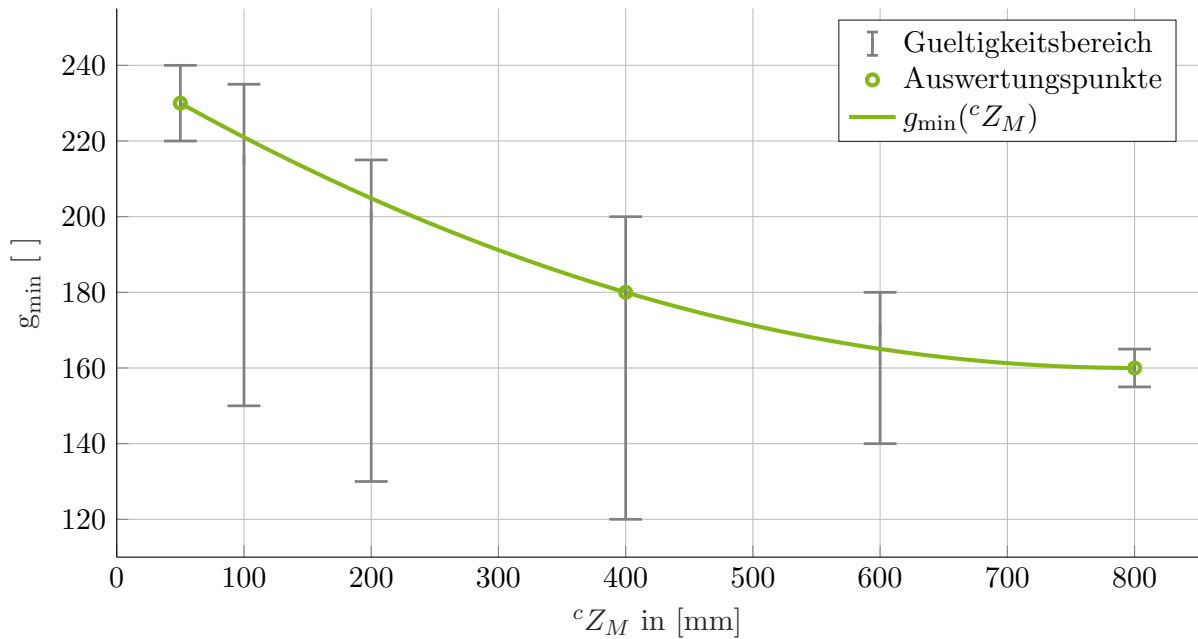
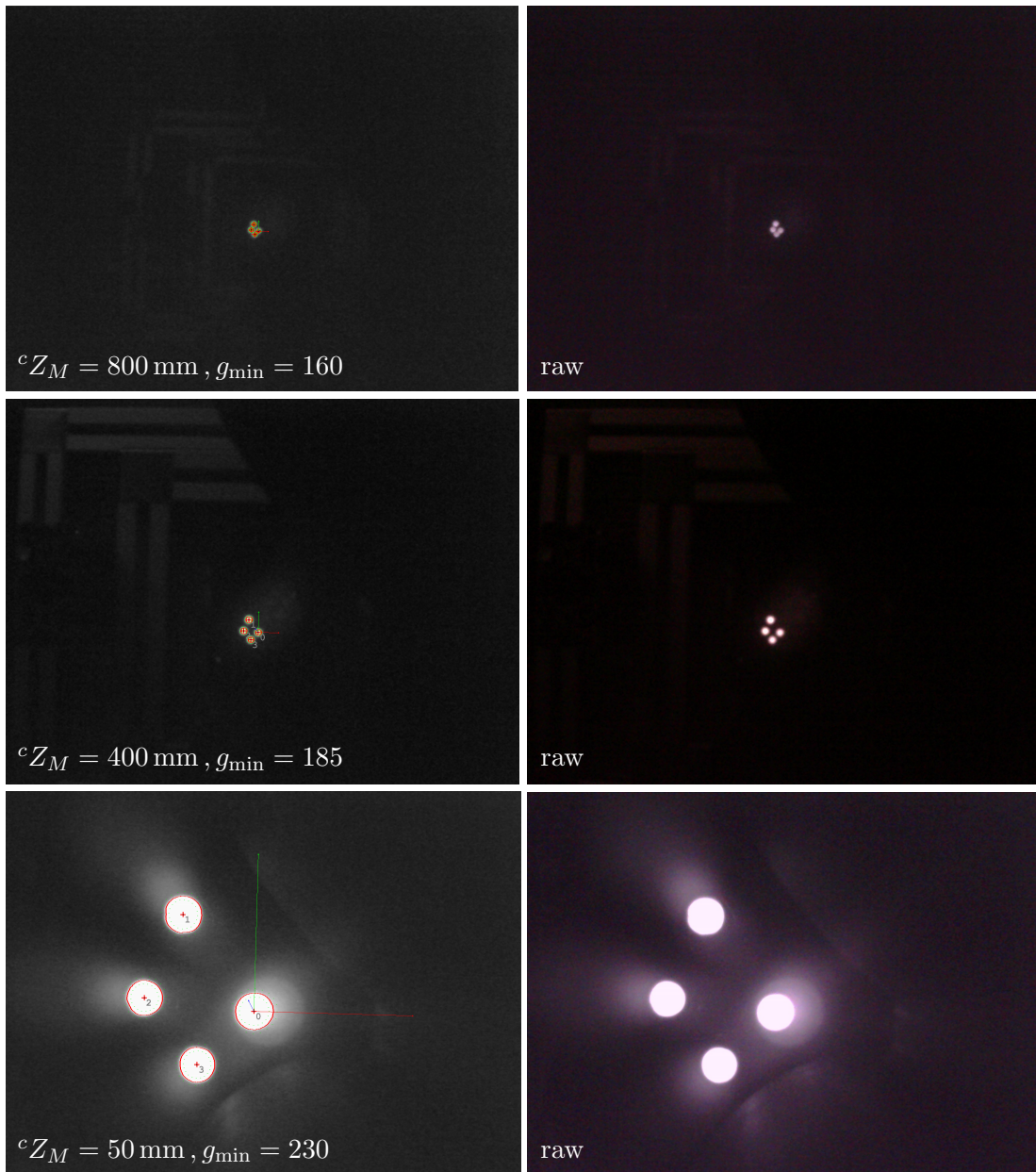


Abbildung 5.7: Dynamische Graustufenfunktion

Kamera und Inlet von 130 mm. Der Grund für diese PTP-Bewegung ist, dass eine Geschwindigkeitsregelung in Form eines Visual Servoings im eingefahrenen Zustand der Armkinematik nur bedingt möglich ist. Im Ausgangszustand kann keine Bewegung in  ${}^{cs}Y$ -Richtung durchgeführt werden, ohne dass sich der Arm nach vorne bewegt. So muss sich der Arm zu Beginn der Prozedur vorpositionieren, um sich anschließend in die Zielpose mithilfe einer Geschwindigkeitsregelung zu bewegen. Für die Vorpositionierung wird die erste Posenbestimmung verwendet und hierbei von dem ermittelten relativen Abstand  $\Delta {}^cZ_M = 130$  mm subtrahiert. Die Orientierung wird zunächst ignoriert. Unter der Annahme, dass die Genauigkeit mit abnehmender Entfernung zwischen Kamera und Inlet zunimmt, wird die Orientierung für die Vorpositionierung zunächst vernachlässigt.

Während der Bewegungsausführung wird eine Kraftüberwachung durch die Strommessung der Antriebe durchgeführt. Falls im Anschluss an die PTP-Vorpositionierung nicht mehr alle vier Markierungen detektiert werden oder die Plausibilitätsprüfung nicht gültig ist und die Markierungen nicht innerhalb von 5 s wiedererkannt werden, wird der automatische Einsteckvorgang abgebrochen. Der Roboterarm harrt in der Position aus und wartet bis zu 5 s auf ein Wiederfinden der Markierungen. Der Arm fährt ansonsten in diesem Fall zurück in die Home-Position. Diese Überprüfung dient zudem der Sicherheit und der Gewährleistung, dass sich kein Objekt zwischen dem Stecker und dem Inlet befindet. Da sich die Graustufen beim Heranfahren ändern und die Pixelanteile der LEDs im Verhältnis zum Gesamtbild zunehmen, wird eine dynamische Anpassung des Graustufenschwellwerts für die Blob Detektion  $g_{\min}({}^cZ_M)$  abhängig von der Entfernung  ${}^cZ_M$  zwischen Kamera und Markern bzw. Inlet implementiert. Diese wird empirisch durch Abtasten mehrerer Abstandspunkte ermittelt, mit dem Ziel zu untersuchen, innerhalb welchen Bereiches die vier IR-LEDs erkannt werden und die Pose stabil (ohne zu springen) ermittelt wird. Die Bereiche werden in grau in **Abbildung 5.7** dargestellt. Für diese dynamische



**Abbildung 5.8:** Aufnahmen der Blob Detektion bei dynamischem Graustufenschwellwert  $g_{\min}$  und variablem Abstand  ${}^cZ_M$  nach [BKK21]

Anpassung des Graustufenwertes wird ein quadratischer Ansatz gewählt, für den drei Punkte notwendig sind. Da die möglichen Bereiche bei den Entfernungen von 50 mm und 800 mm am geringsten sind, wird hier der Mittelpunkt des Gültigkeitsbereichs gewählt. Als dritter Wert wird bei mittlerer Entfernung von 400 mm ein Auswertungspunkt von 180 gewählt, sodass bei einer quadratischen Funktion basierend auf den drei Punkten kein Minimum im Bereich von  $50 \text{ mm} \leq {}^cZ_M \leq 80 \text{ mm}$  entsteht. Somit wird die folgende quadratische Abhängigkeit

$$g_{\min} = 0,0001238 \cdot {}^cZ_M^2 - 0,1986 \cdot {}^cZ_M + 239,6 \quad (5.11)$$

ermittelt. Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass der mögliche Graustufenbereich sowohl bei großen Entfernungen, wie beispielsweise 800 mm, als auch bei sehr kleinen Entfernungen,

wie 50 mm, im Vergleich zum mittleren Bereich deutlich kleiner wird. Durch das Dynamisieren mittels Gleichung 5.11 kann so gewährleistet werden, dass bei jeder Entfernung eine nahezu gleichbleibende Erkennung stattfindet. Als Startwert ist ein Schwellwert von 160 zu verwenden, da dieser im größtmöglichen Bereich von 100 mm bis 800 mm zu einer ersten Erkennung führt.

In **Abbildung 5.8** werden Beispiele der Bilderkennung und dem zugehörigen Raw-Bild anhand verschiedener Entfernungen dargestellt. Im obersten Bild liegt eine Entfernung von 800 mm vor und es ist zu erkennen, dass die IR-LEDs in Form von Blobs nur noch geringfügig von einander abzugrenzen sind. Dies ist auch der Grund, warum diese nur noch in einem geringen Graubereich als einzelne Blobs detektiert werden können. Im mittleren Bild liegt eine Entfernung von 400 mm vor und die IR-LEDs sind deutlich von einander abzugrenzen. Zudem liegen kaum Reflexionen vor, sodass bei dieser Entfernung innerhalb eines größeren Bereiches die Blobs detektiert werden können. Wie in der unteren Abbildung erkennbar ist, treten bei einer Entfernung von 50 mm vermehrt Bildfehler in Form von Reflektionen an der Linse und der Steckerkontur auf. Auch hier wird der Detektionsbereich eingegrenzt, um die runden Konturen und somit den korrekten Mittelpunkt richtig erkennen zu können.

In **Abbildung A.2** im Anhang wird der Fall bei  ${}^cZ_M = 50$  mm und  $g_{\min} = 200$  dargestellt. Hier kann bei LED 0 bereits eine fehlerhafte Verzerrung festgestellt werden, da der Graustufenwert außerhalb des empirisch ermittelten Bereichs liegt. Durch diese fehlerhafte Erkennung können Abweichungen in der Posenbestimmung entstehen.

### 5.2.2 Genauigkeitsbetrachtung für die PTP-Vorpositionierung

Nach der PTP-Bewegung des Laderoboters ist es notwendig, dass die LEDs erkannt werden. Ohne das Erkennen der LEDs kann die Prozedur des automatischen Einsteckvorgangs nicht fortgesetzt werden. Somit ist zu betrachten, welche Genauigkeitsanforderung für die Posenbestimmung vorliegt. Wie bereits in **Abbildung 5.6** dargestellt, wird etwa die Hälfte des Bildes durch den Stecker selbst verdeckt. Dies kann dazu führen, dass es bei minimalen Abweichungen in der Posenbestimmung zum Verdecken der LEDs und dem anschließenden Abbruch der Prozedur führen kann. In **Abbildung 5.9** wird der Raum in pink dargestellt, in dem die LEDs bei einem Abstand von 130 mm zwischen Inlet und Kamera erkannt werden können. Das ergibt einen Abstand zwischen Inlet und Stecker von 127,2 mm, da die Kamera hinter dem 2 mm dicken IR-Passfilter und um 0,8 mm vertieft sitzt. Der Raum kann mithilfe des diagonalen Bildwinkels von  $54^\circ$  der Kamera ermittelt werden. Auch hier ist deutlich der verdeckte Bereich durch den Stecker selbst zu erkennen. Wird der Bereich in weitere Entfernung projiziert, können die IR-LEDs ebenfalls detektiert werden.

Die maximale Höhe des sichtbaren Raums aus der kurzen Entfernung ist betragsmäßig mit 79,5 mm relativ gering, wenn die Distanz der LED-Anordnung von 10,4 mm der beiden LED-Mittelpunkte eins und vier in Betracht gezogen werden. Ist die Posenbestimmung zu ungenau, kann es zum Verlieren der LEDs nach der PTP-Vorpositionierung führen. Wird in der Posenberechnung die Entfernung fehlerhaft bestimmt, wird der Raum bei weiterer Entfernung vergrößert,

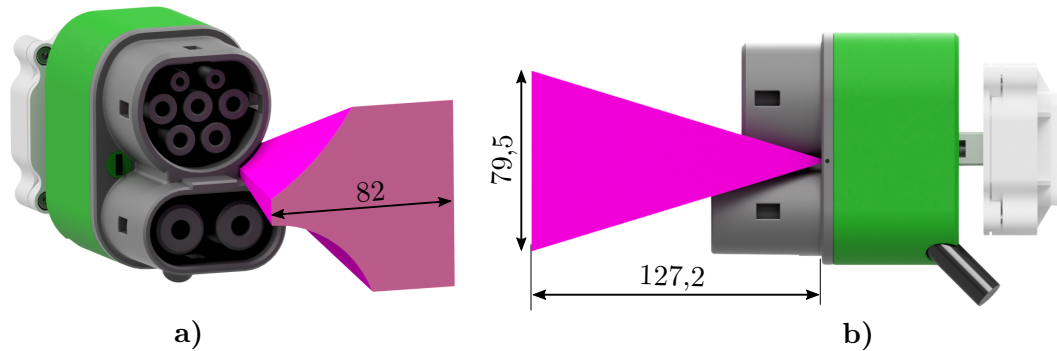


Abbildung 5.9: Genauigkeitsbetrachtung für die PTP-Vorpositionierung

aber auch bei einem kürzeren Abstand erheblich verkleinert. Dies ist in der späteren Versuchsreihe zu evaluieren. Ebenfalls festzuhalten ist die Einbuchtung auf Höhe der Kamera im erkannten Raum. Da der AC- und DC-Anteil des Steckers einen großen Anteil verdecken, wird im Bereich der Einbuchtung vereinfacht die LED eins oder auch drei verdeckt. Auch dieses Problem ist in der Versuchsreihe zu untersuchen.

### 5.2.3 Identifikationsprüfung

Bis zu diesem Zeitpunkt kann weder von der Fahrzeugseite, noch von dem Ladesystem gewährleistet werden, dass das korrekte Fahrzeug anvisiert wird. Die korrekte Zuordnung kann alleinig über die WLAN-Verbindung nicht verifiziert werden. Um die Zuordnung von Ladesystem und Fahrzeug zu überprüfen, wird nach erfolgreicher PTP-Bewegung eine Identifikationsprüfung durchgeführt. Das Fahrzeug sendet zunächst via WLAN einen achtstelligen alphanumerischen

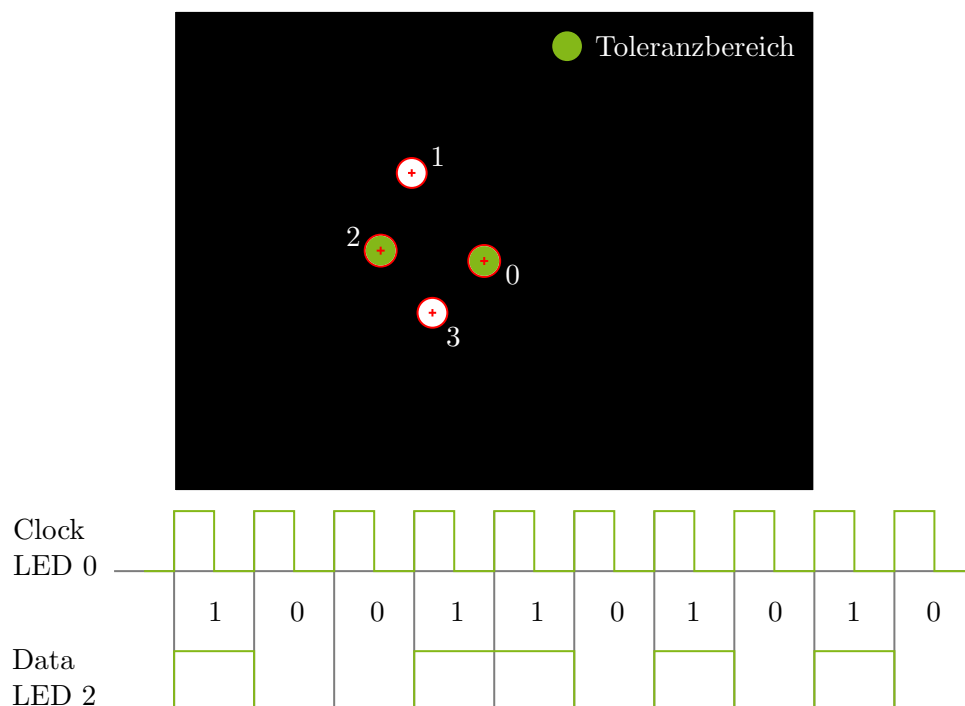


Abbildung 5.10: Datenübertragung mittels Clock-Data

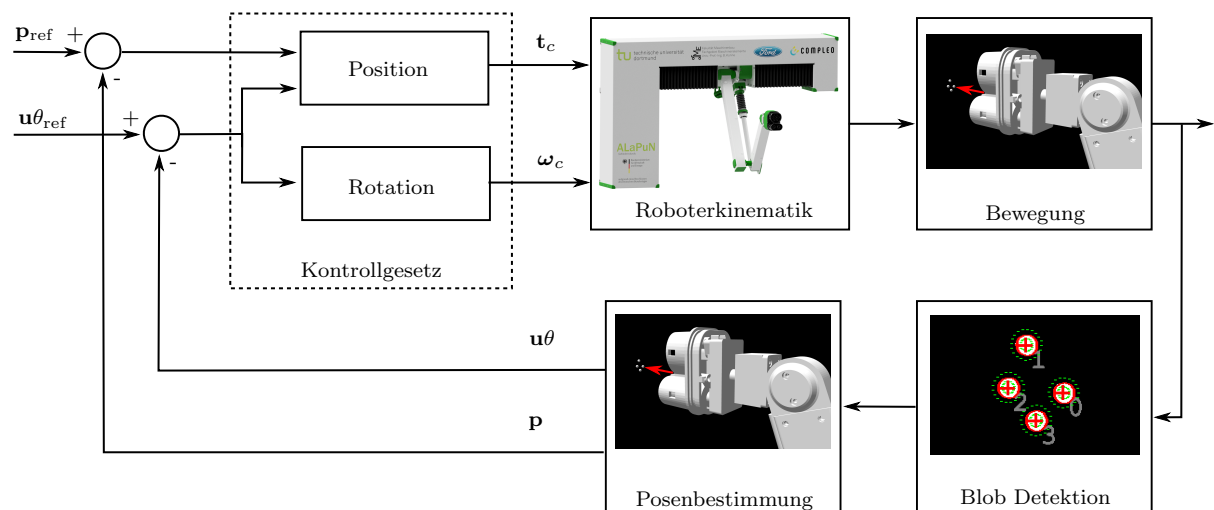


Code an das automatische Ladesystem. Im Anschluss wird der Code visuell übertragen und überprüft, ob es derselbe ist wie der übertragende via WLAN. Hierfür wird das Verwenden von aktiven Markern in Form der IR-LEDs durch eine visuelle Kommunikation genutzt. Die IR-LEDs können als Transmitter und die Kamera im Stecker als Receiver dienen. Der Code wird vom Fahrzeug mittels ASCII-Kodierung in eine Binärschreibweise transferiert. Der Binärcode wird anschließend mit Hilfe der LED 0 als Clock und LED 2 als Data gepulst. Dafür werden zu Beginn die Bildpositionen der Blob-Mittelpunkte von LED 0 und 2 gespeichert und anschließend überprüft, ob diese leuchten oder nicht. Aufgrund von Bildfehlern durch minimale Bewegungen des Fahrzeugs oder des Roboterarms darf sich der Mittelpunkt im Bereich des Toleranzbereiches bewegen. Dieser wird schematisch in **Abbildung 5.10** dargestellt. Um sicherzustellen, dass der vollständige Code in richtiger Reihenfolge erkannt wird, wird vor dem eigentlichen ASCII-Code ein Startcode mit (0 0 0 0 0 1 0) gesendet. Sobald dieser Code erkannt wird, erfolgt die eigentliche Codeübermittlung. Die maximale Bitrate hängt dabei von der Bildrate der Kamera ab. Es werden jedoch immer mindestens 2 Bilder pro Bit benötigt, wie im Ablauf in Abb. 5.10 zu erkennen ist. Die Kamera erfasst den Binärcode, sodass dieser in einen String dekodiert werden kann. So wird überprüft, ob das Fahrzeug das richtige ist oder ob sich ein nicht zugehöriges Fahrzeug vor dem automatischen Ladesystem positioniert hat.

Im folgenden Abschnitt wird die Geschwindigkeitsregelung mittels Visual Servoing aufgeführt, mit der sich der Roboterarm auf das Inlet zu bewegt, um die Steckposition und die Steckorientierung zu erreichen.

### 5.2.4 Visual Servoing

Im Anschluss an die Vorpositionierung und die erfolgreiche Identifikationsprüfung erfolgt in Schritt 3) die Durchführung des Visual Servoings (VS). Hierbei wird auf einen 2 1/2 D Ansatz zurückgegriffen, der in Abschnitt 2.4.2 beschrieben wird. In **Abbildung 5.11** wird das Kontrollschema dargestellt. Das Kontrollgesetz nach [MCB99] umfasst die Geschwindigkeitsregelung  $\mathbf{v}_c = (\mathbf{t}_c, \boldsymbol{\omega}_c)$  im Koordinatensystem der Kamera.



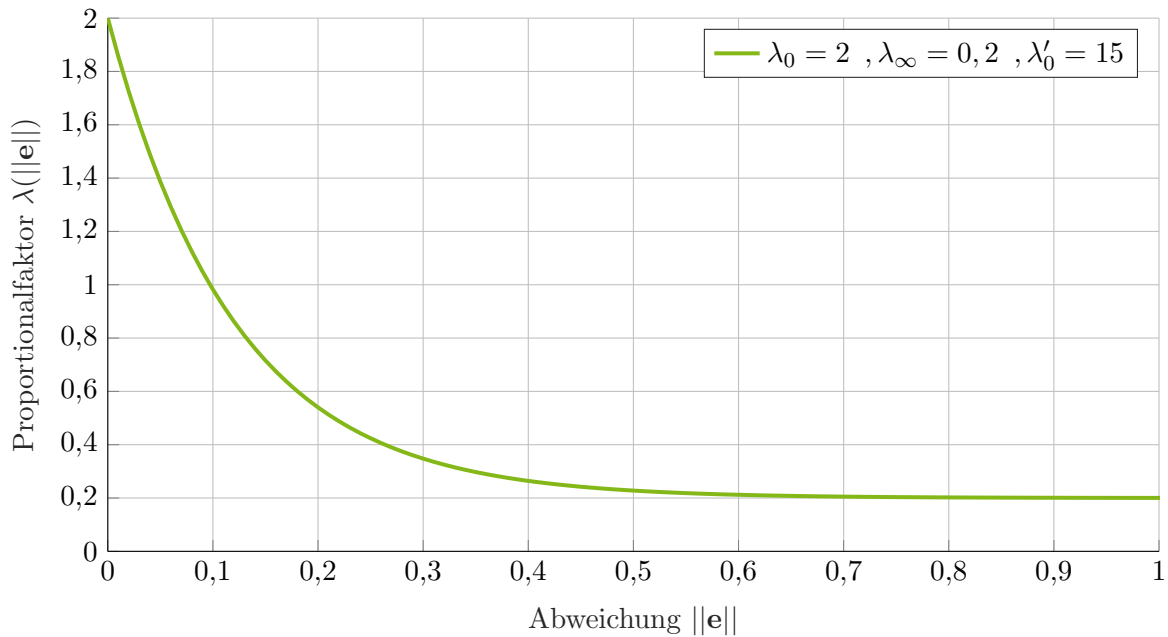
**Abbildung 5.11:** Block Diagramm des 2 1/2 D Visual Servoings nach [MCB99] und [BKK21]

Das VS wird in dem vorliegenden Anwendungsfall in zwei Einzelschritte unterteilt. Da die Vorpositionierung ohne Berücksichtigung der Orientierung des Inlets erfolgt, wird im ersten Schritt ein VS ohne ein vollständiges Annähern an das Inlet zur Steckposition, sondern lediglich mit der Korrektur des Winkels durchgeführt. Begründet wird dieser Schritt mit dem eingeschränkten Blickfeld der Kamera durch die Abschattung des Steckers selbst. Je geringer die Entfernung zum Inlet ist, desto schneller können bei kleinen Bewegungen die IR-LEDs verloren bzw. abgeschattet werden, sodass eine weitere Regelung nicht möglich ist. So wird im ersten Schritt zunächst auf eine Zielentfernung von  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 85$  mm geregelt mit den Genauigkeitsanforderungen aus **Tabelle 5.2**. Dabei ist im Bereich der Translation eine geringere Genauigkeit als für das Orientieren erforderlich, da ein nachträgliches Kippen des Kopfes zum Korrigieren der Pose zu einem schnelleren Verlust der Punkte führen kann. Die Werte sind anhand erster Versuche empirisch bestimmt und dienen als Basis für die ersten Versuchsreihen.

**Tabelle 5.2:** Zielposen und Genauigkeitsanforderungen für beide Visual Servoing

Achse	Zielpose VS1	Genauigkeit VS1	Zielpose VS2	Genauigkeit VS2
$X$	0 mm	$\pm 8,5$ mm	0 mm	$\pm 0,12$ mm
$Y$	0 mm	$\pm 13,8$ mm	0 mm	$\pm 0,12$ mm
$Z$	85 mm	$\pm 13,8$ mm	60 mm	$\pm 1,2$ mm
$\theta_X$	$0^\circ$	$\pm 2,5^\circ$	$0^\circ$	$\pm 2,5^\circ$

Nach dem Erreichen der Zielpose innerhalb der Genauigkeitsanforderungen für das VS1 folgt das zweite VS2 zum Erreichen der Steckposition vor dem Inlet. Die Zielpose befindet sich bei  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 60$  mm vor dem Inlet. Das entspricht einer Entfernung zwischen Frontfläche des Inlets und Steckergrund von 56,4 mm, da auch hier die Dicke des IR-Passfilters von 2 mm, die Vertiefung der Kamera von 0,8 mm und die Vertiefung der Projektionsfläche von 0,8 mm mitbetrachtet werden müssen. Dieser Abstand zwischen Inlet und Stecker wird gewählt, da der DC-Anteil des Steckers nach DIN EN 62196-3 eine Länge von 48,5 mm aufweist. Wird der Zielabstand wesentlich geringer gewählt, kann es zu Berührungen zwischen Stecker und Inlet führen, was zu Regelabweichungen oder sogar zu Beschädigungen durch Verkanten oder Fehlpositionierungen führen kann. Die Genauigkeit für die Position wird für die beiden Achsen  $X$  und  $Y$  auf 0,12 mm festgelegt. Auch wenn laut Fangraumanalyse aus Abschnitt 2.2 diese Genauigkeit bezüglich einer ausreichenden Selbstzentrierung deutlich höher als notwendig ist, wird zunächst eine hohe Wiederholgenauigkeit angestrebt. Für die Genauigkeit in  $Z$ -Richtung wird eine geringere Genauigkeit gewählt, da hier eine lineare Steckbewegung mögliche Fehler kompensiert. Auch wenn laut Fangraumanalyse die Genauigkeit der Orientierung in der  $X$ -Achse im Bereich von  $-7,6^\circ \leq \theta_X \leq 13^\circ$  liegt, wird hier zunächst eine Genauigkeit von  $2,5^\circ$  gefordert, um die notwendigen Steckkräfte gering zu halten. Dieser Aspekt ist bei einer späteren Steckkraftuntersuchung zu evaluieren.



**Abbildung 5.12:** Dynamischer Proportionalfaktor  $\lambda(\|e\|)$  mit  $\lambda_0 = 2$ ,  $\lambda_\infty = 0,2$  und  $\lambda'_0 = 15$

Um die Konvergenzzeit zu reduzieren, wird ein adaptiver Proportionalfaktor  $\lambda(\|e\|)$  verwendet. Nach [KC14] wird der Proportionalfaktor  $\lambda$  so angepasst, dass dieser abhängig von der in der Projektionsebene normalisierten Abweichung  $e$  zur Zielpose ist. Mit Hilfe der Gleichung

$$\lambda(\|e\|) = (\lambda_0 - \lambda_\infty) \exp\left(-\frac{\lambda'_0}{\lambda_0 - \lambda_\infty} \|e\|\right) + \lambda_\infty \quad (5.12)$$

wird diese Abhängigkeit beschrieben [KC14]. Das Vorgehen ist in *VISP* implementiert. Nach [Vis20b] wird für die Berechnung von  $\|e\|$  die Unendlich-Norm verwendet. Die Parameter sind empirisch zu ermitteln und umfassen:

- $\lambda_0 = \lambda(0)$  für  $\|e\| = 0$
- $\lambda_\infty = \lim_{\|e\| \rightarrow \infty} \lambda(\|e\|)$
- $\lambda'_0$  ist die Steigung von  $\lambda$  bei  $\|e\| = 0$

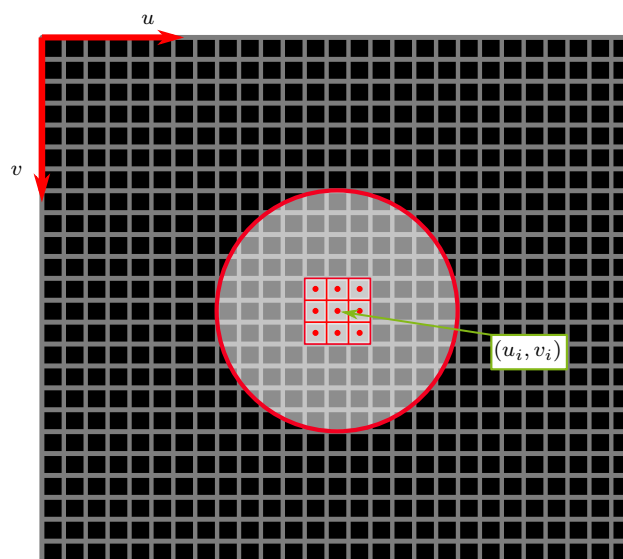
Anhand von Vorversuchen und dem vorgeschlagenen empirischen Vorgehen nach [Vis20b] zur Bestimmung von  $\lambda_0$ ,  $\lambda_\infty$  und  $\lambda'_0$  werden die Parameter  $\lambda_0 = 2$ ,  $\lambda_\infty = 0,2$  und  $\lambda'_0 = 15$  gewählt. In **Abbildung 5.12** wird der Verlauf für  $\lambda(\|e\|)$  dargestellt. Der Verlauf zeigt, dass bei kleiner werdender Abweichung  $\|e\|$  der Multiplikator zunimmt und somit die ermittelte Kamerageschwindigkeit  $v_c$  steigt.

Während beider VS-Durchführungen wird die Bewegung des Roboterarms unterbrochen, sobald mindestens eine der vier LEDs nicht mehr sichtbar ist. Somit wird gewährleistet, dass sich kein Objekt zwischen Inlet und Roboterarm befindet.

### 5.2.5 Genauigkeitsbetrachtung für das Visual Servoing

Um gewährleisten zu können, dass die Genauigkeitsanforderung des Visual Servoings aus Tabelle 5.2 entscheidend ist, ist zu validieren, ob die Genauigkeit der verwendeten Kamera und der Posenbestimmung höher als die geforderte des VS2 ist. Auch wenn bei dem hier verwendeten 2 1/2 D VS2 die Positionsabweichung in  ${}^cX$  und  ${}^cY$  in der Bildebene erfolgt, wird im Folgenden lediglich die Genauigkeit der Posenbestimmung bestimmt. Untersuchungen, bei denen die Differenz zwischen Posenbestimmung und Fehlerabschätzung ermittelt werden, ergeben bei einem Zielabstand von  ${}^cZ_M = 60$  mm eine Abweichung zwischen der Fehlerabschätzung des VS2 und der Posenbestimmung im Bereich von  $10^{-3}$  mm. Diese Diskrepanz wird als vernachlässigbar angenommen. Für die Genauigkeitsuntersuchung des Abbruchkriteriums des VS2 wird eine Fehlerberechnung durchgeführt, bei der die Mittelpunkte der Blobs beziehungsweise der detektierten LEDs um ein Pixel abweichen. So kann bestimmt werden, wie sich die ermittelte Pose maximal ändert, bei einer Abweichung der Mittelpunkte durch einen Pixelsprung. Hierfür werden mithilfe der Kameramatrix die Mittelpunkte der vier LEDs in der Zielpose des VS2 (siehe Tabelle 5.2) auf die Bildebene projiziert. In **Abbildung 5.13** wird schematisch ein erkannter Blob in der Bildebene dargestellt. Der Blob hat den Mittelpunkt  $(u_i, v_i)$ . Durch Addieren und Subtrahieren eines Pixels in  $u$ - und  $v$ -Richtung für alle LEDs bzw. Blobmittelpunkte  $(u_i \pm 1, v_i \pm 1)$  für  $\forall i \in \{0, 1, 2, 3\}$  werden die Abweichung zwischen abweichender und idealer Pose für alle Kombinationen bestimmt. Wie in **Abbildung 5.13** dargestellt, umfasst dies für einen Blobmittelpunkt einen Variationsumfang von neun Punkten.

In **Tabelle 5.3** werden die betragsmäßig größten translatorischen und rotatorischen Fehler aufgeführt. Die translatorischen Fehler sind alle deutlich geringer als das Abbruchkriterium beim VS2. Lediglich der rotatorische Fehler von bis zu  $3,9^\circ$  ist größer als die Zielgenauigkeit des VS2 von  $2,5^\circ$ . Dies kann schlimmstenfalls bedeuten, dass das VS frühzeitig beendet wird, obwohl lediglich durch das Bildrauschen die Pose fehlerbehaftet abweicht. Diese Fehlorientierung



**Abbildung 5.13:** Genauigkeitsbetrachtung der Kamera bzw. Posenbestimmung durch Abweichung des Mittelpunkts um einen Pixel

des Steckers zum Inlet kann in diesem Fall mithilfe der Ausgleichseinheit kompensiert werden. Dennoch wird im Folgenden überprüft, in wie weit ein Bildrauschen auftritt und ob der Einfluss dieses Fehlers minimiert werden kann.

**Tabelle 5.3:** Genauigkeit der Posenbestimmung mit verwendeter Kamera

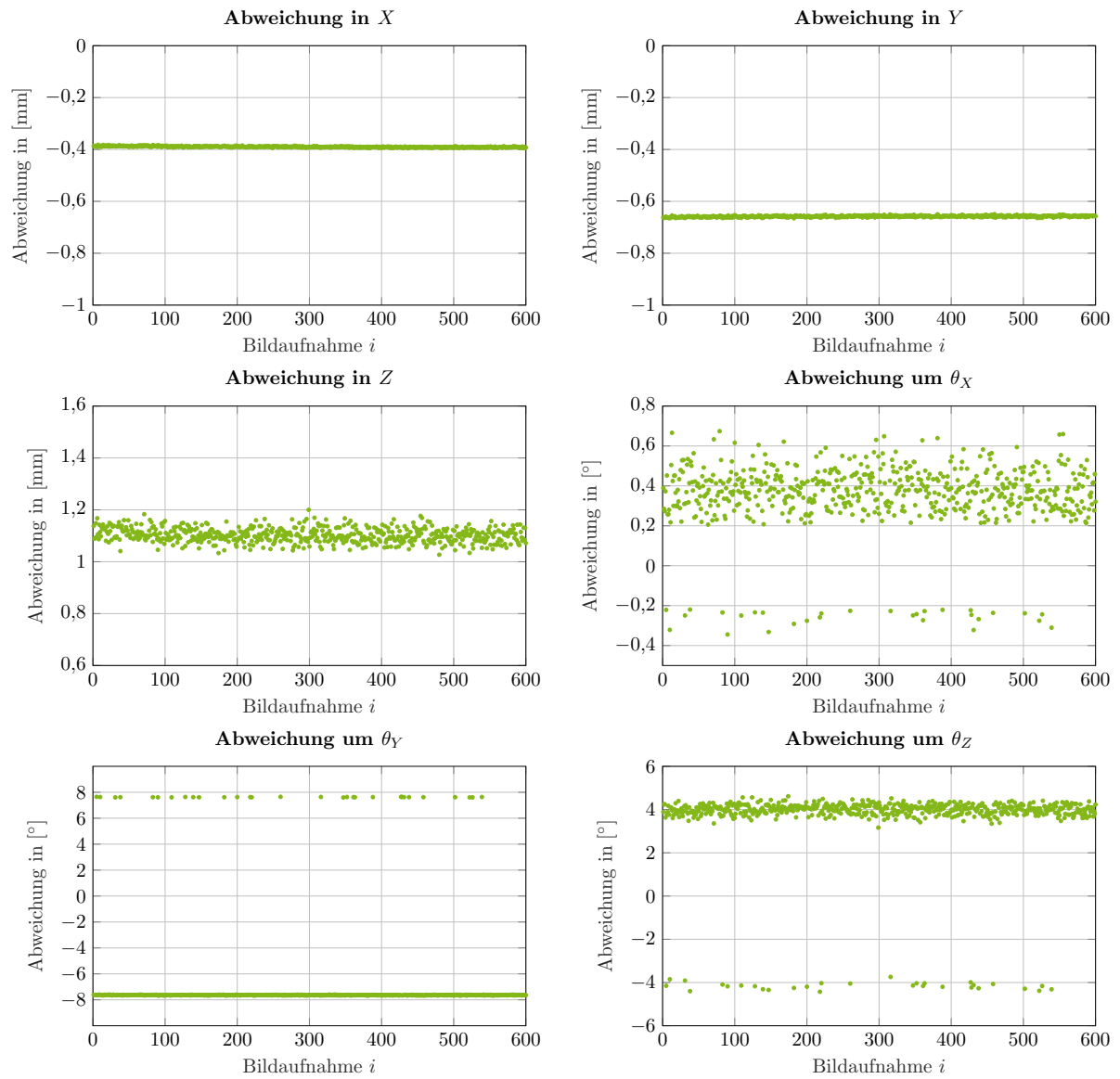
Abweichung	Betragsmäßiger größter Fehler
$\Delta X$	0,052 mm
$\Delta Y$	0,057 mm
$\Delta Z$	1,1 mm
$\Delta\theta_X$	3,9°
$\Delta\theta_Y$	10,3°
$\Delta\theta_Z$	0,4°

Hierfür wird der Stecker in der Zielpose des VS2 vor das Inlet händisch positioniert und orientiert. Die absolute Genauigkeit kann demnach nicht bewertet werden. Im Anschluss werden 600 Posenbestimmungen durchgeführt, um untersuchen zu können, in welchem Ausmaß sich die Pose mit jeder neuen Bildaufnahme ändert und wie stark diese variiert. Die absolute Genauigkeit kann hier nicht bewertet werden, da das Inlet von Hand vor dem Stecker ausgerichtet wird. In **Abbildung 5.14** werden die Abweichungen zur Zielpose VS2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Rauschen der Abweichung in  $X$ - und in  $Y$ -Richtung deutlich kleiner als die Genauigkeit des VS2 mit  $\pm 0,12$  mm ist und die absolute Abweichung sehr konstant ist. Die Abweichung in  $X$ -Richtung bewegt sich in einem Delta von 0,0131 mm. Für  $Y$  ergibt sich ein Delta von 0,0158 mm. Diese Abweichungen sind vernachlässigbar.

Für die Entfernung  ${}^cZ_M$  zwischen Markern bzw. Inlet und Kamera ist in **Abbildung 5.14** eine höhere Streuung (gleiche Achsenskalierung wie  $X$  und  $Y$ ) im Bereich von 0,1731 mm zu erkennen. Wie zuvor in **Tabelle 5.3** aufgeführt, ist ein Bildrauschen für die Abweichung in  $Z$ -Richtung anfälliger als für die translatorischen Richtungen  $X$  und  $Y$ . Der Grund ist, dass eine geringe Pixeländerung bereits eine größere Änderung für die Entfernung hervorruft. Dennoch befindet sich die Streuung in einem Maß, das kleiner als das Abbruchkriterium des VS2 ist.

Für die Winkelabweichung  $\theta_X$  ist zu erkennen, dass die ermittelten Winkel um einen Mittelwert von  $0,35^\circ$  streuen. Dabei bewegen sich die Punkte in einem Bereich zwischen maximaler und minimaler Abweichung von  $1,0185^\circ$ . Diese ist geringer als die Genauigkeitsanforderung von  $\pm 2,5^\circ$  (siehe **Tabelle 5.3**). Auffällig ist, dass es in vereinzelt Posen einen Nulldurchgang in der Winkelabweichung  $\theta_X$  gibt. Dies ist hier bei 30 von 600 Punkten (5%) aufgetreten. Diese Nulldurchgänge können im Visual Servoing eine kurzzeitige Geschwindigkeitsumkehrung hervorrufen. Dies ist in den späteren Versuchen zu beobachten.

Auch wenn die zuvor vorgestellte Kinematik die rotatorischen Freiheitsgrade  $\theta_Y$  und  $\theta_Z$  lediglich elastisch ausgleichen kann, werden die ermittelten Abweichungen der Pose durch das Bildrauschen in **Abbildung 5.14** mit aufgeführt. Es wird deutlich, dass bei den selben Bildaufnahmen wie bei der Abweichung um  $\theta_X$  Nulldurchgänge entstehen. In diesen 30 Punkten haben sich

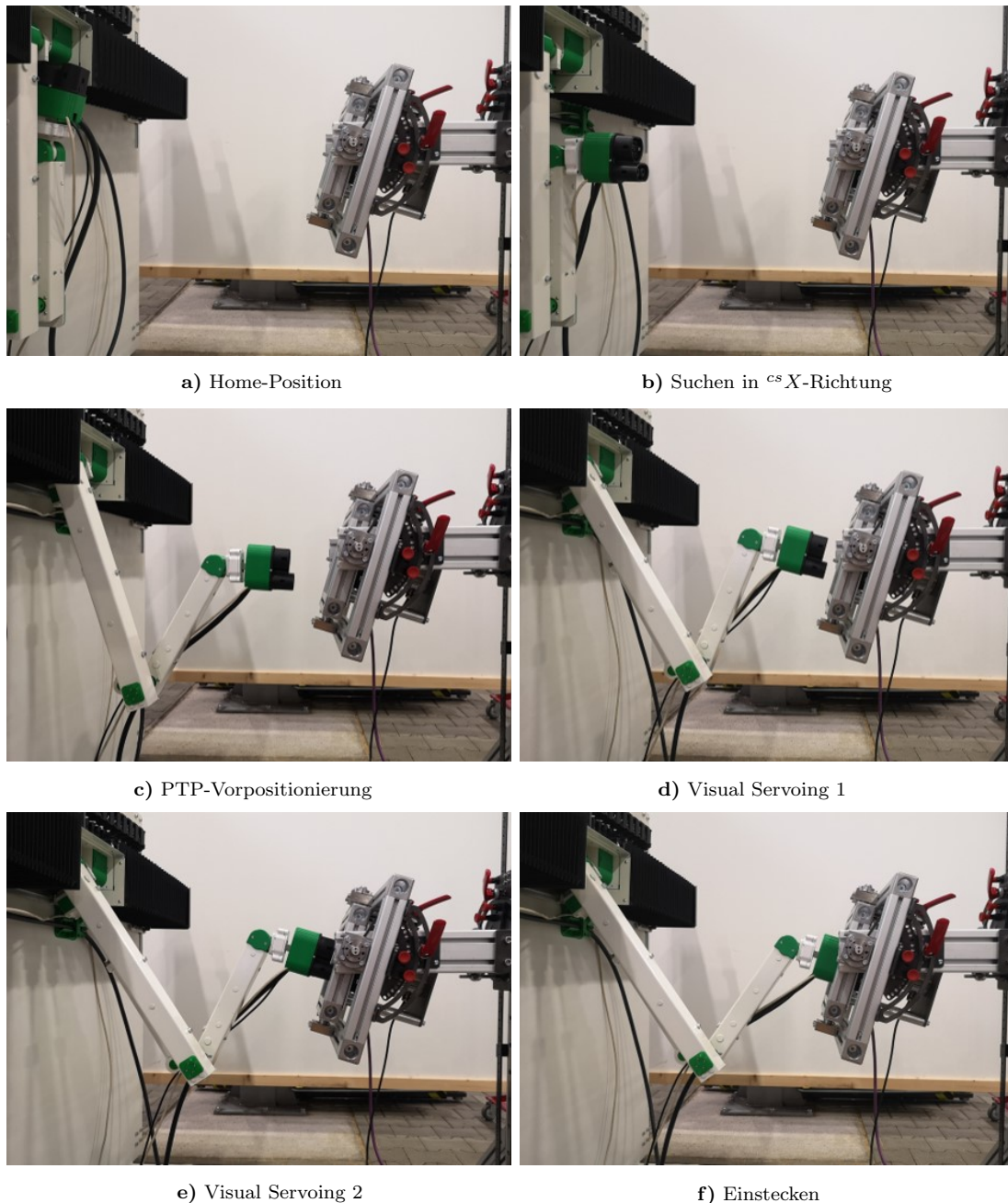


**Abbildung 5.14:** Posenrauschen bei Zielpose von VS2 (Händisches Positionieren des Inlets vor dem Stecker)

die Mittelpunkte der Blobs so verschoben, dass der Orientierungsanteil der Pose eine größere Abweichung aufweist. Die Abweichung um  $\theta_Y$  streut in einem Bereich von bis zu  $15,3^\circ$ . Für  $\theta_Z$  liegt dieser bei  $9,0416^\circ$  und somit sogar deutlich höher als der theoretisch berechnete Wert aus Tabelle 5.3. Zunächst können die beiden rotatorischen Abweichungen um  $Y$  und  $Z$  vernachlässigt werden, da diese für die Regelung irrelevant sind.

### 5.2.6 Steckvorgang, Laden und Beenden des Prozesses

Der Steckvorgang erfolgt über eine kartesisch geplante lineare Bewegung entlang der  ${}^cZ$ -Achse des Kamerakoordinatensystems. Die Pose wird zu dem Zeitpunkt des erfolgreichen Beendens des VS2 ermittelt, sodass eine lineare Steckbewegung in  ${}^cZ$ -Richtung der Kamera und somit auch Stecker durchgeführt werden kann. Eine Annahme, die hier getroffen wird, ist, dass der Stecker und die Ausgleichseinheit ohne Abweichung fluchten. Bei einem Durchhängen des Steckers auf-



**Abbildung 5.15:** Ablaufschritte der automatischen Ladeprozedur

grund der elastischen Nachgiebigkeit der Ausgleichseinheit entsteht eine rotatorische Abweichung zwischen der Ist- und der Soll-Position des Roboterarms. Dies kann zu erhöhtem Kraftaufwand führen und ist in der späteren Untersuchung zu beobachten. Die Steckbewegung wird linear so durchgeführt, bis der Mikroschalter im modifizierten Stecker (siehe Abbildung 4.6) einen Kontakt detektiert. Die Bewegung wird zur Sicherheit auf maximal 800 mm begrenzt. Sobald der Steckvorgang erfolgreich abgeschlossen ist, erfolgt das Laden des elektrischen Fahrzeugs.

Während des Ladevorgangs bleibt die IR-LED 0 weiterhin sichtbar. Mithilfe der Betrachtung des Grauwert-Histogramms wird geprüft, ob die LED leuchtet. Liegt die summierte Anzahl der Pixel mit einem Grauwert zwischen 150 bis 255 unter einem Grenzwert von 2000, gilt die LED

als ausgeschaltet. Der Wert 2000 und der Bereich wird hier als Sicherheit gewählt, damit geringe Graustufenabweichungen keine Fehler hervorrufen. Falls es zu Kommunikationsabbrüchen via WLAN zwischen Fahrzeug und Ladesystem kommt, kann über ein Ausschalten der LEDs seitens des Fahrzeugs ein Abbruch des Ladevorgangs signalisiert werden. Diese Methode liefert eine zusätzliche Kommunikationsmöglichkeit, die zur Fehlerbehebung genutzt werden kann.

Das Ausstecken erfolgt analog wie das Einstecken mittels linearer Bahnplanung, bei der der Roboterarm sich 100 mm zurückbewegt. Abschließend verfährt dieser in seine Home-Position. In **Abbildung 5.15** werden die vorgestellten Ablaufschritte des automatischen Ladeprozesses bildlich am montierten Laderoboter dargestellt. In a) ist die Home-Position zu erkennen, in der der Stecker nach oben geneigt und eingefahren ist. In b) ist die Suchposition zu erkennen, von der aus der in  ${}^c X$ -Richtung verfahren wird und versucht wird, die IR-LEDs zu detektieren. In c) ist die abgeschlossene PTP-Vorpositionierung dargestellt, bei der der Laderoboter sich horizontal ausgerichtet vor dem Inlet positioniert. Von da aus wird das erste VS durchgeführt, welches in d) abgebildet ist. Dabei wird im Abstand von  ${}^c Z_M = 85$  mm auf den Neigungswinkel des Inlets reagiert. Im VS2, dargestellt in e), wird anschließend auf die Zielpose im Abstand von  ${}^c Z_M = 60$  mm geregelt. Abschließend steckt das Ladesystem automatisch ein (f)), sodass das Fahrzeug geladen werden kann.



## 6 Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung mit IR-LEDs und weiteren Strategien

In diesem Kapitel wird das Vorgehen der Inlet-Posenbestimmung detailliert untersucht. Im vorherigen Kapitel 5 wird die Entwicklung der Ladeprozedur aufgeführt und es wird deutlich, dass die Genauigkeit der Inlet-Posenbestimmung und die Zuverlässigkeit beziehungsweise Robustheit für die erfolgreiche automatische Ladeprozedur von entscheidender Wichtigkeit ist. In den folgenden Abschnitten wird die Posenbestimmung hinsichtlich der im folgenden Kapitel 7 erfolgenden Evaluierungsversuche mittels zu definierender Kriterien betrachtet. Zudem wird die Untersuchung um zwei weitere Strategien erweitert, um zu erarbeiten, welche die qualitativen Vor- und Nachteile der Strategien sind. Die zwei weiteren Strategien umfassen dabei zum einen das Verwenden eines AprilTags als ein auf dem Inlet aufgeklebter passiver Marker und zum anderen ein Inlet ohne jede weitere Modifikation und dem Verwenden eines trainierten neuronalen Netzwerks zur Inleterkennung und dessen Posenbestimmung.

Zunächst werden in **Abschnitt 6.1** das Vorgehen und die Bewertungskriterien festgelegt. Anschließend folgt in **Abschnitt 6.2** die Beschreibung des Versuchsaufbaus, für die der Versuchstand erläutert und eine weitere Kamerakalibrierung ohne IR-Passfilter durchgeführt wird. Diese ist für die Erkennung des AprilTags und die des Inlets mithilfe des neuronalen Netzwerks notwendig. Im Anschluss werden in **Abschnitt 6.3** der Versuchsplan und die Auswertung beschrieben. Die Untersuchungsergebnisse für das Verwenden von IR-LEDs als aktive Marker werden in **Abschnitt 6.4** aufgeführt. Dabei wird detailliert auf die Vor- und Nachteile der Strategie eingegangen und mögliche Probleme für das automatische Stecken identifiziert. Darauf folgend wird die Strategie zur Inlet-Posenbestimmung mittels AprilTag als passiver Marker in **Abschnitt 6.5** eingeführt. Die Untersuchungen werden analog durchgeführt und ausgewertet. Als dritte Strategie wird das Verwenden eines neuronalen Netzwerks in **Abschnitt 6.6** vorgestellt und erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse in **Abschnitt 6.7** diskutiert und eingeordnet.

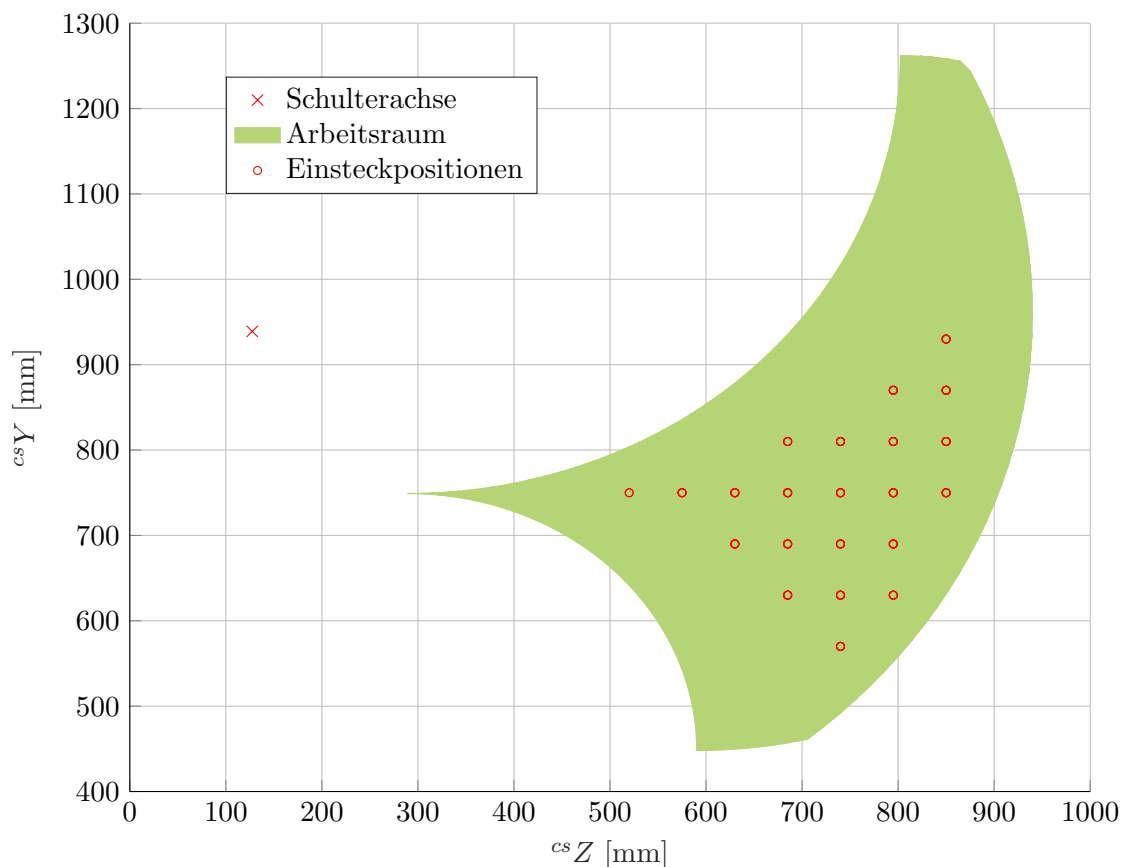
### 6.1 Vorgehen und Bewertungskriterien

Im Folgenden wird das Vorgehen anhand des Arbeitsraums des Ladesystems dargestellt. Somit wird der Bezug zur entwickelten Kinematik hergestellt, sodass die translatorischen und rotatorischen Größen für den Versuchsplan abgesteckt werden können. Zudem werden die Bewertungskriterien definiert.

### 6.1.1 Vorgehen im Arbeitsraum des Ladesystems

Für die Definition des Vorgehens und der Bewertungskriterien wird zunächst der Arbeitsraum des hier entwickelten Ladesystems betrachtet. In **Abbildung 6.1** wird der Arbeitsraum in der  ${}^{cs}YZ$ -Ebene dargestellt. Der räumliche  ${}^{cs}X$ -Anteil des Arbeitsraums hat eine Tiefe von 600 mm und wird durch das lineare Verfahren des Roboterarms entlang der Wand realisiert. Die Schulterachse des Roboterarms befindet sich in diesem Fall auf einer Höhe über dem Boden von  ${}^{cs}Y = 962$  mm mit einem Wandabstand von  ${}^{cs}Z = 127,5$  mm. Im realen Anwendungsfall kann die Höhe jedoch frei gewählt werden. In der Suchposition des Roboterarms ist der Kopf horizontal mit  ${}^{cs}\theta_x = 0^\circ$  mit Blick zum Fahrzeug ausgerichtet. Dabei befindet sich der PE-Kontakt des Steckers hier auf einer Höhe von  ${}^{cs}Y = 750$  mm. Nach Anforderungsliste (s. Tab. 4.1) ist dies die definierte ideale Steckhöhe.

Der dargestellte Arbeitsraum umfasst nicht den vollständigen Bewegungsumfang des Roboterarms, sondern den Raum, in dem ein Einstecken möglich ist. Eine Bedingung ist beispielsweise, dass der Ellbogen nicht weiter als die Drehachse des Kopfes hervorstehen darf. Diese Eingrenzung ist erforderlich, damit das Fahrzeug durch den Roboterarm nicht beschädigt werden kann, sondern sich die Kamera bzw. der Stecker zu jeder Zeit am nächsten am Fahrzeug befindet. Zudem wird für den dargestellten Arbeitsraum das Schwenken des Kopfes nicht mitberücksichtigt, sondern eine horizontale Orientierung mit  ${}^{cs}\theta_X = 0^\circ$  angenommen. Somit wird das anfängliche



**Abbildung 6.1:** Arbeitsraum des Roboterarms in  ${}^{cs}YZ$ -Ebene und die Positionen der späteren Steckversuche im Ladesystem Koordinatensystem ( ${}^{cs}$ )

*Hochklappen* des Kopfes in der Home-Position nicht mitbetrachtet. Hier fängt der Arbeitsraum bei ca.  ${}^{cs}Z = 300$  mm von der Wand entfernt an.

Für die Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung und gleichzeitig der späteren Evaluierungsversuche in **Kapitel 7** werden verschiedene Positionen im Arbeitsraum definiert, die in Abbildung 7.1 als rote Punkte dargestellt werden. Die gleich verteilten Positionen werden in einem Gitterabstand von 55 mm in  ${}^{cs}Y$ -Richtung und von 60 mm in  ${}^{cs}Z$ -Richtung abgetastet und müssen die Bedingung erfüllen, dass eine Vorpositionierung im Abstand von 150 mm horizontal ( $\Delta{}^{cs}Y = 0$ ) vor dem Inlet angefahren werden kann. Dabei werden 20 mm zu dem eigentlich notwendigen 130 mm Abstand hinzugefügt, um mögliche Fehler in der PTP-Vorpositionierung und der ersten Posenbestimmung kompensieren zu können. Als zweite Bedingung wird das mögliche Erreichen der Zielposition des VS1 im Abstand von 120 mm vorgegeben. Auch hier wird ein Puffer für die Kompensation von Fehlern vorgesehen. Mithilfe dieser Bedingungen wird die Position als „einsteckbar“ bezeichnet, da eine PTP-Vorpositionierung nach dem Finden der IR-LEDs möglich ist und eine anschließende Regelung im Visual Servoing stattfinden kann.

Wie in Kapitel 5 beschrieben und evaluiert, lässt sich der Untersuchungsbereich der Genauigkeit in die drei folgenden Bereiche unterteilen. Im Wesentlichen wird eine ausreichend hohe Genauigkeit der Inleterkennung während des ersten Suchens des Inlets benötigt. Dieser lässt sich anhand des Arbeitsraums aus Abbildung 6.1 und den definierten Positionen im Bereich von  $520 \text{ mm} \leq {}^{cs}Z \leq 850 \text{ mm}$  wie folgt eingrenzen. Die Kamera befindet sich in der Suchposition bei einer Wandentfernung von  ${}^{cs}Z \approx 270$  mm. Somit wird der zu untersuchende Bereich der Inletdetektierung während des ersten Suchens auf  $250 \text{ mm} \leq {}^cZ_M \leq 580 \text{ mm}$  beschränkt. Wie zuvor beschrieben, werden hierfür lediglich die translatorischen Genauigkeiten berücksichtigt. Zum Zeitpunkt des Suchens und der anschließenden PTP-Vorpositionierung wird bisher die Orientierung vernachlässigt.

Der zweite wesentliche zu untersuchende Bereich befindet sich bei der Entfernung von  ${}^cZ_M = 130$  mm nach der PTP-Vorpositionierung. Da anschließend an die erreichte Vorpositionierung das erste VS mit dem Ziel die Einsteckorientierung von Ladestecker zu Inlet einzustellen folgt, ist bei dieser Entfernung neben der Genauigkeit der Translation auch die der Rotation entscheidend. Das gleiche gilt für den dritten Untersuchungsbereich, in dem die Zielentfernungen von  ${}^cZ_M = 85$  mm (VS2) und  ${}^cZ_M = 60$  mm (VS2) eingestellt werden. Auch hier ist entscheidend, dass eine hohe Genauigkeit sowohl translatorisch als auch für die Orientierung erreicht wird, da diese Genauigkeit für die Positionierung zwischen Stecker und Inlet vor dem abschließenden Einsteckvorgang und somit auch die wirkenden Kräfte und Momente signifikant ist. Im Folgenden werden die zu untersuchenden translatorischen und rotatorischen Bereiche definiert.

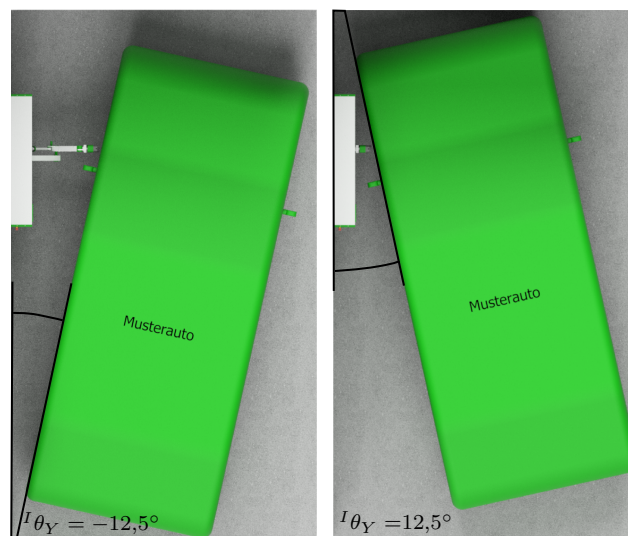
Die translatorischen Untersuchungsbereiche auf Basis des Sichtfeldes der Kamera werden anhand von Vorversuchen mit den IR-LEDs als aktive Marker abhängig von der Entfernung  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  identifiziert. Dabei wird sich zunächst lediglich auf eine horizontale Ausrichtung beschränkt. Auch wenn somit nicht der gesamte Arbeitsraum abgedeckt werden kann, schränkt diese Vorgehens-

weise die Aussagekraft über die Qualität der Inlet-Posenbestimmung nicht ein. Die Ergebnisse werden in **Tabelle 6.1** zusammengefasst. Für die Translationen in  $X$ - und  $Y$ -Richtung kann kein symmetrischer Untersuchungsbereich aufgeführt werden, da das Sichtfeld durch die Kontur des Steckers eingeschränkt ist. Die translatorischen Bereiche werden durch das nacheinander erfolgende Variieren der Achsenbewegung und der weiterhin bestehenden Markererkennung ermittelt. Wie in Abschnitt 5.2 bereits beschrieben, wird  $\approx 49\%$  des Bildes abgeschattet.

**Tabelle 6.1:** Bereiche für die Genauigkeitsuntersuchungen der Inletdetektionsstrategien

Translation in [mm]			Rotation in [°]		
${}^cZ_{M,\text{ref}}$	${}^cX_{M,\text{ref}}$	${}^cY_{M,\text{ref}}$	${}^c\theta_{X_{M,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Y_{M,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Z_{M,\text{ref}}}$
60	-10, 3	-4, 1	$180\pm 7,5$	$\pm 7,5$	$\pm 5$
85	-20, 5	-6, 3	$180\pm 15$	$\pm 12,5$	$\pm 5$
130	-30, 8	-9, 6	$180\pm 15$	$\pm 12,5$	$\pm 5$
250	-60, 16	-18, 10	$180\pm 15$	$\pm 12,5$	$\pm 5$
415	-100, 28	-30, 16	$180\pm 15$	$\pm 12,5$	$\pm 5$
580	-140, 40	-40, 22	$180\pm 15$	$\pm 12,5$	$\pm 5$

Für die Variation der Orientierung zwischen Kamera ( $c$ ) und Inlet ( $I$ ) ist der zu untersuchende Winkelbereich für  ${}^I\theta_X$ ,  ${}^I\theta_Y$  und  ${}^I\theta_Z$  festzulegen. Für  ${}^I\theta_X$  und  ${}^I\theta_Z$  werden die in der Anforderungsliste definierten Winkelbereiche von  ${}^I\theta_X = \pm 15^\circ$  und  ${}^I\theta_Z = \pm 5^\circ$  gewählt. Bezüglich  ${}^I\theta_Y$  wird ein realitätsnahes Parkszenario in einem Parkhaus betrachtet, bei dem das Fahrzeug maximal schräg orientiert ist. In **Abbildung 6.2** wird der Fall des Parkens in einem Parkhaus betrachtet. Dabei handelt es sich um einen Parkplatz nach den *Anlagen des ruhenden Verkehrs - Hamburg (2005)*, der die Dimensionen (LxB) von 5000 mm x 2900 mm bei einseitiger Begrenzung durch eine Wand hat. Die Größe des modellierten Automobils entspricht dem nach [Man18] durchschnittlichen Neuwagen aus dem Jahr 2017, welcher 4403 mm lang und 1802 mm breit (ohne Außenspiegel) ist. In Abb. 6.2 wird das schräge Parken dargestellt, bei dem das Fahrzeug mit



a) Schräges Parken, so  ${}^I\theta_Y \neq 0^\circ$

**Abbildung 6.2:** Mögliche Inletorientierungen für  ${}^I\theta_Y$  und  ${}^I\theta_Z$  beim schrägen Parken

einem Winkelversatz von  $\pm 12,5^\circ$  zur Wand beziehungsweise zum Ladesystem positioniert ist. Demnach ist  ${}^I\theta_Y \neq 0^\circ$ . Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Berücksichtigung eines größeren Winkelbereichs für den Versuchsumfang nicht notwendig ist. Das Fahrzeug grenzt sowohl an die seitlichen Parkplatzgrenzen als auch an die Umhausung des Ladesystems.

Die Rotationen um  $X$  und  $Y$  werden in einer Entfernung von  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 60$  mm eingeschränkt, da es bei einer vollumfänglichen Betrachtung von  ${}^c\theta_{X_{M,\text{ref}}} = 180^\circ \pm 15^\circ$  und  ${}^c\theta_{Y_{M,\text{ref}}} = \pm 12,5$  mm zu einer Kollision zwischen Stecker und Inlet kommt.

### 6.1.2 Bewertungskriterien

Für die Bewertung werden die folgenden Kriterien zu Hilfe gezogen. Wie zuvor beschrieben, können die Anforderungen an die Inlet-Posenbestimmung abhängig von der Ladeprozedur definiert werden. In **Tabelle 6.2** werden die Kriterien tabellarisch aufgelistet. Das Kriterium 1) besagt, dass die Markierung am Inlet (IR-LEDs oder AprilTag) oder das Inlet selbst (neuronales Netzwerk) im gesamten Untersuchungsbereich zu detektieren ist. Das ist die Grundvoraussetzung für das erfolgreiche Zufahren auf das Inlet und die PTP-Vorpositionierung. Am Beispiel der IR-LEDs setzt dies voraus, dass die Blobs im Bild aus jeder Entfernung detektiert werden können und die Plausibilität für die Posenbestimmung mit  $\geq 80\%$  ausreichend hoch ist.

**Tabelle 6.2:** Bewertungskriterien für die Untersuchung der Strategien der Inlet-Posenbestimmung

Krit.	Beschreibung
1)	Markierung/Inlet wird im gesamten Untersuchungsbereich erkannt
2)	Ausreichende Genauigkeit bei der ersten Posenbestimmung bezüglich der PTP-Vorpositionierung
3)	Ausreichende Genauigkeit für den Einsteckvorgang (nach Fangraumanalyse - s. Tab. 2.2)

Wird die Markierung beziehungsweise das Inlet erfolgreich detektiert, folgt die erste Posenbestimmung. Das zweite Kriterium umfasst die ausreichend genaue Posenbestimmung, damit der Laderoboter in der darauffolgenden PTP-Vorpositionierung vor das Inlet verfahren kann und die Markierung beziehungsweise das Inlet weiter erkennbar ist. Ist die Posenbestimmung aus der weiteren Entfernung im translatorischen Bereich zu ungenau, verliert der Laderoboter nach der Vorpositionierung das Ziel aus dem Sichtfeld und die Ladeprozedur wird abgebrochen.

Als drittes Kriterium wird die ausreichende Genauigkeit der Inlet-Posenbestimmung für das Einstecken definiert. Nach erfolgreicher Vorpositionierung folgen das VS1 und VS2 mit dem Ziel, das Abbruchkriterium für den Einsteckvorgang zu erreichen. Für die Definition der ausreichenden Genauigkeit wird sich zunächst auf die Größenordnung der Fangraumanalyse in Tabelle 2.2 bezogen. Zudem muss die Streuung der ermittelten Posen im Rahmen der Genauigkeitsanforderung liegen, um eine stabile Posenbestimmung gewährleisten zu können. Werden diese Kriterien erfüllt, ist ein wiederholtes erfolgreiches Stecken im Arbeitsraum als möglich anzunehmen.

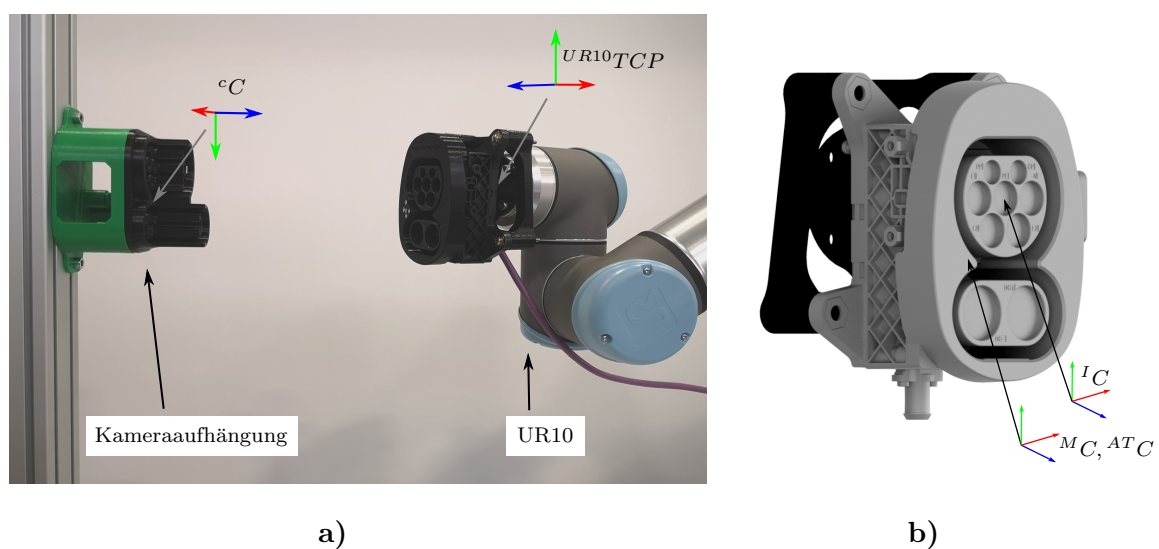
Mithilfe dieser Bewertungskriterien wird zum einen evaluiert, ob die IR-LEDs als aktive Marker für die zuvor entwickelte Ladeprozedur geeignet sind und/oder ob Probleme identifiziert werden können. Zudem bieten diese Kriterien die Möglichkeit, einen qualitativen Vergleich der hier betrachteten Strategien zu ziehen und diese gegenüberzustellen. Zu guter Letzt liefern diese Untersuchungen die Basis für die in Kapitel 7 durchgeführten Steckversuche.

## 6.2 Versuchsaufbau

Folgend wird der Versuchsstand vorgestellt, an dem die Untersuchungen der verschiedenen Strategien durchgeführt werden. Dieser wird in **Abschnitt 6.2.1** beschrieben. Zudem wird auf mögliche Abweichungen eingegangen, die maßgeblichen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse haben. Zudem wird die Kamerakalibrierung einer vom Bautyp gleichen Endoskopkamera ohne vorgeschalteten IR-Passfilter in **Abschnitt 6.2.2** beschrieben. Diese wird für die beiden Vergleichsstrategien benötigt.

### 6.2.1 Versuchsstand

Für die Untersuchung der Strategien der Inlet-Posenbestimmung wird ein Versuchsaufbau mit einer hohen Genauigkeit gefordert. Zudem wird aufgrund der voraussichtlich hohen Anzahl an Versuchen angestrebt, die Versuchsdurchführung zu automatisieren. Demnach zur Folge wird wie in **Abbildung 6.3 a)** dargestellt ein kollaborierender Roboter UR10 des Herstellers *Universal Robots* verwendet. Laut Datenblatt (weitere wesentliche Daten siehe im Anhang **Tabelle C.1**) erreicht dieser Roboter eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,1$  mm. Die absolute Genauigkeit wird vom Hersteller nicht angegeben, ist jedoch deutlich geringer als die Wiederholgenauigkeit anzunehmen. Um die größtmögliche absolute Genauigkeit, ohne eine erneute absolute Fehleranalyse durchzuführen, zu erreichen, werden die vom Hersteller mitgelieferten korrigierten Kalibrierda-



**Abbildung 6.3:** Versuchsstand für die Genauigkeitsuntersuchung der Posenbestimmung

- a) Versuchsaufbau mit Kameraaufhängung und dem kollaborierendem Roboter UR10
- b) Inletaufhängung mit den zwei verschiedenen Ursprüngen der Koordinatensysteme

ten verwendet. Die Steuerung des UR10 wird ebenfalls im ROS durchgeführt. Hierfür wird auf Packages basierend auf [And15] zurückgegriffen.

In **Abbildung 6.3 b)** wird der Adapter für die Inletaufhängung separat dargestellt. Dadurch verschiebt sich der TCP (*Tool Center Point*), der beim UR10 am Montageflansch definiert ist, um die in **Tabelle 6.3** aufgeführten translatorischen Werte. Die Ausrichtung des TCPs bleibt gleich. In der Tabelle werden drei Koordinatensysteme für die Verschiebung des TCPs aufgeführt. Dabei handelt es sich zum einen um das der IR-LEDs ( $M$ ) und zum anderen um die der beiden weiteren zu untersuchenden Strategien. Der Index ( $AT$ ) steht hierbei für den AprilTag als passiven Marker, dessen Koordinatensystem an derselben Position mit derselben Orientierung am Inlet wie das der IR-LEDs ( $M$ ) festgelegt wird. Für das neuronale Netzwerk wird das Koordinatensystem des Inlets ( $I$ ) betrachtet. Nähere Beschreibungen folgen in Abschnitt 6.6.

**Tabelle 6.3:** Verschiebung des TCPs durch Inletaufhängung am UR10

Koordinatensystem	Translation in [mm]			Rotation in [°] (RPY)		
	$X$	$Y$	$Z$	$\theta_X$	$\theta_Y$	$\theta_Z$
${}^M C, {}^{AT} C$	-24,8	-27,4	93,2	0	0	0
${}^I C$	0	0	91,75	0	0	0

In **Abbildung 6.3 a)** ist zu erkennen, dass die Kamera im CCS-Stecker und dessen Halterung am Robotertisch befestigt wird. Durch manuelles Verfahren des Roboterarms wird das montierte Inlet in die eingesteckte Position gefahren. So kann das Inlet bzw. der Roboterarm zur Kamera referenziert werden. Durch das Speichern der Pose des UR10 an dieser Stelle werden von hier aus die relativen Zielposen angefahren. Dabei wird die Rotation der Achsen anhand der Reihenfolge RPY bzw.  $XY'Z''$  bezogen auf das Koordinatensystem der Marker, des AprilTags oder auch dem Inlet durchgeführt. Um mögliche Kollisionen zwischen Inlet und Stecker bei der Rotation um  $Y$  zu vermeiden, wird am 3D gedruckten Stecker ein Ausbruch vorgenommen (siehe **Abb. 6.3 a)**). Die Kontur des Steckers auf der Seite der Kamera bleibt vollständig bestehen, um weiterhin das Sichtfeld einzuschränken und somit gleiche Sichtverhältnisse wie bei der zuvor beschriebenen Entwicklung aus Kapitel 5 beizubehalten.

Hierbei ist anzumerken, dass durch den verwendeten Versuchsaufbau Ungenauigkeiten durch die folgenden aufgelisteten Punkte entstehen, die in den späteren Untersuchungen zu berücksichtigen sind:

- Abweichende Absolutgenauigkeit des UR10
- Positions- und Ausrichtungsfehler der Kamera im Stecker, aber auch des Inlets in Bezug zum TCP des UR10
- Fehlerbehaftete Kamerakalibrierung
- Abweichung zwischen Kamerakoordinatensystem  ${}^c C$  und realem Projektionszentrum in der Kamera
- Abweichende Referenzierung von UR10 zu Stecker

Anhand dieser Auflistung wird deutlich, dass die Analyse der absoluten Genauigkeit für die folgenden Untersuchungen nur eingeschränkt möglich ist. Die Untersuchung liefert demnach einen qualitativen Nachweis der Posenbestimmung im Arbeitsraum mit der hier entwickelten Prozedur, mit der Vor- und Nachteile identifiziert und mit der die Streuung der Ergebnisse und somit mögliche Fehlerpotentiale ermittelt werden können.

### 6.2.2 Kalibrierung ohne IR-Passfilter

Für den Versuchsaufbau und die Untersuchung des AprilTags und des hier verwendeten neuronalen Netzwerks wird eine zweite baugleiche Endoskopkamera verwendet, die positionsgetreu an der gleichen Stelle im Stecker (siehe 4.6) installiert wird. Es wird lediglich der IR-Passfilter entfernt. Durch das Entfernen des Filters und das Verwenden einer anderen Kamera ist eine neue Kalibrierung notwendig. Für die Kalibrierung wird das gleiche gedruckte Muster mit 6x6 Punkten mit einem Durchmesser von  $\varnothing 3$  mm und einem Abstand von 6,8 mm verwendet. Somit wird die Kamera im selben Abstand und im selben Fokusbereich kalibriert. In **Abbildung 6.4** wird das Erkennen des Musters dargestellt.

Mithilfe der Kamerakalibrierung kann die folgende Kameramatrix  $\mathbf{K}_{oIR}$  ohne IR-Passfilter der Form von

$$\mathbf{K}_{oIR} = \begin{bmatrix} 1729,39 & 0 & 805,71 \\ 0 & 1732,37 & 693,12 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

und den Verzerrungsparametern  $k_1 = -0,0128$ ,  $k_2 = -0,2436$  und  $k_3 = -0,1153$  ermittelt werden. Wie in Abschnitt 6.5 näher beschrieben, wird empfohlen, das Kamerabild mithilfe der drei Verzerrungsparameter zu korrigieren. Aus diesem Grund werden hierbei mehr Parameter als nur  $k_1$  betrachtet.

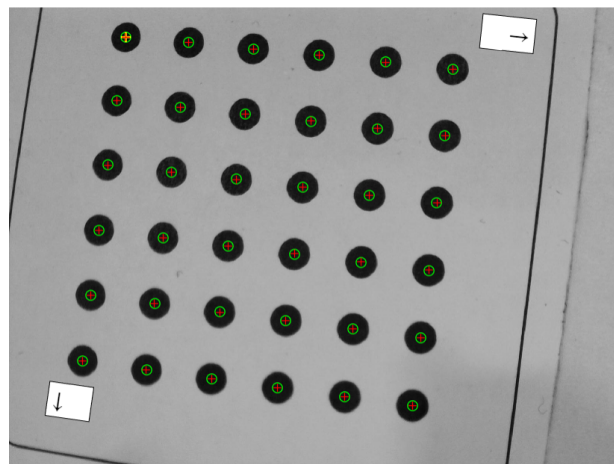


Abbildung 6.4: Kamerakalibrierung ohne IR-Passfilter

## 6.3 Versuchsplan und Auswertung

Im Folgenden wird der Versuchsplan in **Abschnitt 6.3.1** vorgestellt. Anschließend wird die Versuchsauswertung in **Abschnitt 6.3.2** aufgeführt.



### 6.3.1 Versuchsplan

Für den Versuchsplan werden die zuvor ermittelten Untersuchungsbereiche aus Tabelle 6.1 betrachtet. Da das Variieren der translatorischen und rotatorischen Größen abhängig von der Entfernung  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  ist, wird ein Versuchsplan mittels Abtasten diverser Posen in den Untersuchungsbereichen durchgeführt. In **Tabelle 6.4** werden die jeweiligen translatorischen und rotatorischen Variationen aufgeführt. Insgesamt umfasst das Abtasten der Posen eine Anzahl von 5040 verschiedenen zu untersuchenden Posen.

Die Reihenfolge der Variation der Größen erfolgt nach dem folgenden Schema, welches exemplarisch für den Versuchsplan bei  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 60$  mm in **Tabelle D.1** dargestellt wird. Dabei wird zunächst  ${}^c\theta_{Y_{M,\text{ref}}}$  variiert, anschließend  ${}^c\theta_{X_{M,\text{ref}}}$ , dann  ${}^c\theta_{Z_{M,\text{ref}}}$ , dann  ${}^cY_{M,\text{ref}}$  und abschließend  ${}^cX_{M,\text{ref}}$ .

**Tabelle 6.4:** Versuchsplan für den Vergleich der Inletdetektionsstrategien

Translation in [mm]			Rotation in [°]		
${}^cZ_{M,\text{ref}}$	${}^cX_{M,\text{ref}}$	${}^cY_{M,\text{ref}}$	${}^c\theta_{X_{M,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Y_{M,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Z_{M,\text{ref}}}$
60	{-10/-5/0/3}	{-4/0/1}	{-172,5/180/172,5}	{-7,5/-5/0/5/7,5}	{-5/0/5}
85	{-20/-10/0/5}	{-6/0/3}	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}
130	{-30/-15/0/8}	{-9/0/6}	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}
250	{-60/-30/0/16}	{-18/0/10}	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}
415	{-100/-50/0/28}	{-30/0/16}	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}
580	{-140/-70/0/40}	{-40/0/22}	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}

Für die Versuchsdurchführung wird nach der Referenzierung das Inlet in eine Startpose  ${}^c\mathbf{T}_{M,AT,I}$  zwischen Kamera und dem zu untersuchenden Koordinatensystems  $M, AT$  oder  $I$  von (0 mm, 0 mm, 300 mm, 180°, 0°, 0°) gefahren. Somit stehen sich das Inlet und der Stecker ausgerichtet bei einer Entfernung von 300 mm gegenüber. Die Drehung um die  ${}^cX$ -Achse von 180° charakterisiert die Grundausrichtung der Koordinatensysteme (siehe Abbildung 6.3) zueinander. Von dieser Startpose werden alle zu untersuchenden Posen nacheinander angefahren, wobei zwischen zwei Posen immer wieder die Startpose angefahren wird. Die Reihenfolge der Rotationsdurchführung erfolgt nach RPY bzw  $XY'Z''$ . Die Reihenfolge der Rotationen ist entscheidend für die finale Orientierung.

Für die Aufnahme der bildbasierten Posen werden zehn Posen mit einer Abtastrate von 1 s gespeichert. So können bis zu zehn verschiedene Posen ermittelt werden. Bei der Untersuchung der IR-LEDs wird bei jeder Posenbestimmung geprüft, ob die Plausibilitätsprüfung bestanden wird. Wird die Mindestplausibilität nicht erreicht, wird bis zu 2 s auf eine erneute Posenbestimmung abgewartet. Andernfalls wird die Pose als unbestimmt gewertet.

### 6.3.2 Auswertung

Für die Auswertung und die zugehörige Ermittlung der Abweichung zwischen ermittelter Pose und Soll-Pose wird die jeweilige Differenz  $\Delta\mathbf{t}(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  und  $\Delta\mathbf{R}(\Delta\theta_X, \Delta\theta_Y, \Delta\theta_Z)$  bestimmt. Da die vom Algorithmus ermittelte Pose bei der Rotation  ${}^c\theta_X$  bei  ${}^c\theta_{X,\text{ref}} = 180^\circ$  sowohl einen

positiven als auch negativen Wert annehmen kann, werden die Daten wie folgt vor der Differenzbildung umgerechnet.

$${}^c\theta_{X,\text{ref}} = \begin{cases} {}^c\theta_{X,\text{ref}} - 180^\circ & \text{wenn } {}^c\theta_{X,\text{ref}} \geq 0^\circ \\ {}^c\theta_{X,\text{ref}} + 180^\circ & \text{wenn } {}^c\theta_{X,\text{ref}} < 0^\circ \end{cases} \quad (6.2)$$

$${}^c\theta_X = \begin{cases} {}^c\theta_X - 180^\circ & \text{wenn } {}^c\theta_X \geq 0^\circ \\ {}^c\theta_X + 180^\circ & \text{wenn } {}^c\theta_X < 0^\circ \end{cases} \quad (6.3)$$

Im Anschluss an diese Umrechnung werden die folgenden Differenzen gebildet.

$$\Delta X = {}^cX_M - {}^cX_{M,\text{ref}} \quad (6.4)$$

$$\Delta Y = {}^cY_M - {}^cY_{M,\text{ref}} \quad (6.5)$$

$$\Delta Z = {}^cZ_M - {}^cZ_{M,\text{ref}} \quad (6.6)$$

$$\Delta\theta_X = {}^c\theta_{X_M} - {}^c\theta_{X_{M,\text{ref}}} \quad (6.7)$$

$$\Delta\theta_Y = {}^c\theta_{Y_M} - {}^c\theta_{Y_{M,\text{ref}}} \quad (6.8)$$

$$\Delta\theta_Z = {}^c\theta_{Z_M} - {}^c\theta_{Z_{M,\text{ref}}} \quad (6.9)$$

Für eine Beurteilung der Abweichungen und Analyse der verschiedenen Strategien werden zunächst die gemittelten Abweichungen ( $\overline{\Delta X}$ ,  $\overline{\Delta Y}$ ,  $\overline{\Delta Z}$ ,  $\overline{\Delta\theta_X}$ ,  $\overline{\Delta\theta_Y}$ ,  $\overline{\Delta\theta_Z}$ ) bei der jeweiligen Referenzentfernung  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  bestimmt. Zudem werden die Standardabweichungen  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$ ,  $\sigma_{\theta_X}$ ,  $\sigma_{\theta_Y}$  und  $\sigma_{\theta_Z}$  über die Versuche bei  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  bestimmt. Durch die Betrachtung dieser beiden Kenngrößen wird das Verhalten der mittleren Genauigkeit und des Maßes der Streuung im Arbeitsraum des automatischen Ladesystems analysiert. Somit können erste Rückschlüsse über mögliche Probleme, aber auch Vor- und Nachteile der einzelnen Strategien gezogen werden.

## 6.4 IR-LEDs als aktive Marker

Für die folgende Untersuchung wird das in Abbildung 4.7 beschriebene modifizierte Inlet mit den vier IR-LEDs genutzt. Es wird weiterhin der in dieser Arbeit verwendete Ablauf der Posenbestimmung angewendet. Zunächst erfolgt eine Blob Detection, für die der Graustufenschwellwert abhängig von der Distanz  ${}^cZ_M$  zwischen Kamera und Markern mittels Gleichung 5.11 angepasst wird. Weiterhin wird eine Plausibilität von mindestens 80% gefordert. Anschließend erfolgt eine Posenbestimmung mittels des P4P Algorithmus. Folgend werden die Ergebnisse der Versuchsdurchführung dargestellt, beschrieben und anhand der definierten Bewertungskriterien ausgewertet.

### Bewertungskriterium 1) - IR-LEDs im Untersuchungsraum detektierbar?

In **Tabelle 6.5** werden die Abweichungen ( $\overline{\Delta X}$ ,  $\overline{\Delta Y}$ ,  $\overline{\Delta Z}$ ,  $\overline{\Delta\theta_X}$ ,  $\overline{\Delta\theta_Y}$ ,  $\overline{\Delta\theta_Z}$ ) und Standardabweichungen ( $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$ ,  $\sigma_{\theta_X}$ ,  $\sigma_{\theta_Y}$ ,  $\sigma_{\theta_Z}$ ) chronologisch dem Abstand  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  nach aufgelistet. Zudem wird in der Spalte *Anzahl* aufgeführt, wie viele Posen bei einer wiederholten Bildaufnahme von zehn Mal bei einem Versuch  $n$  mindestens fünf Mal bestimmt werden können. Dabei ist festzu-

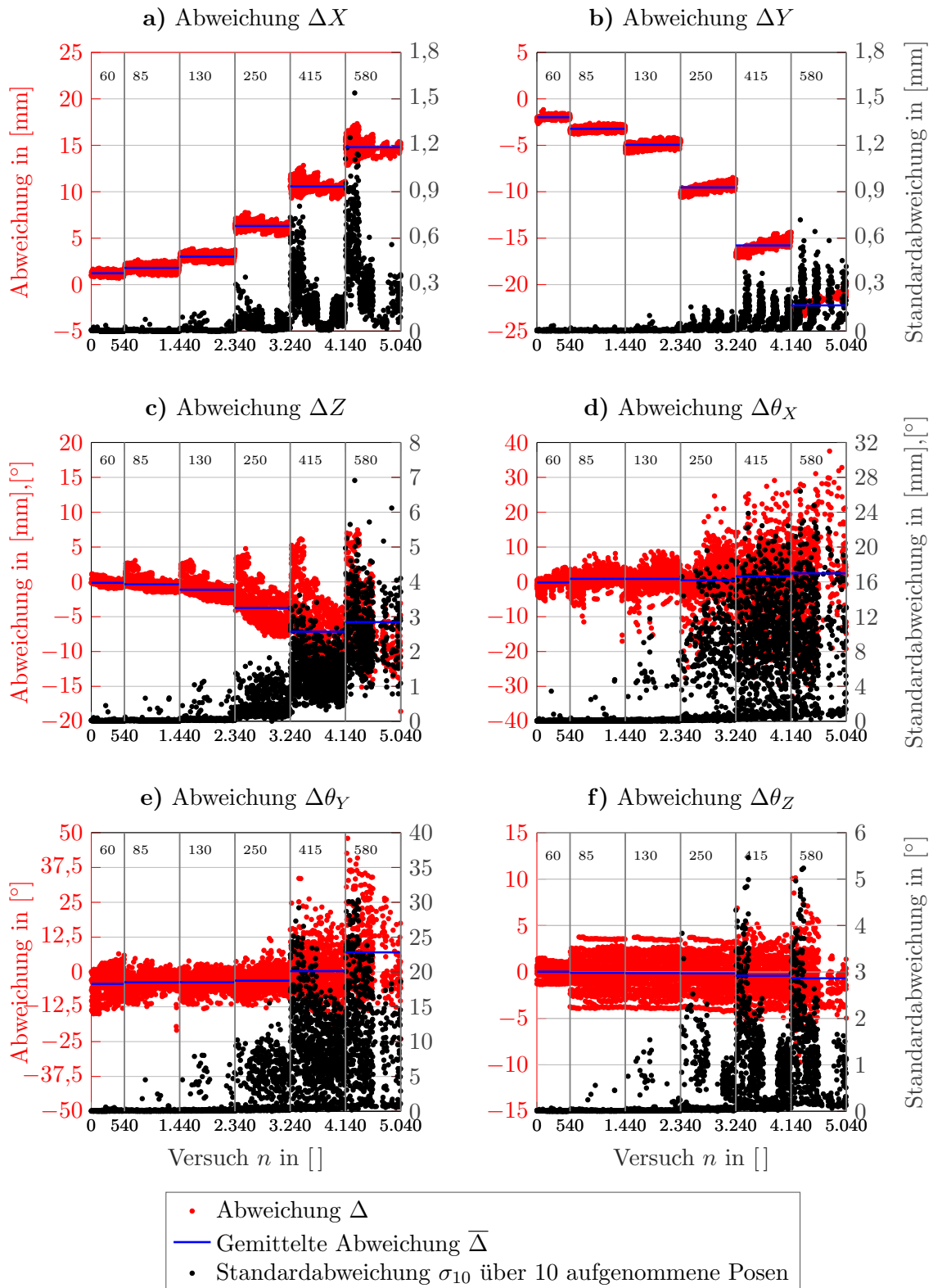
halten, dass bei jeder Entfernung einige Posen nicht bestimmt werden können. Die fehlerhafte Bestimmung erscheint zufällig. Für die Referenzabstände  ${}^cZ_{M,\text{ref}} < 580$  mm können die Punkte unabhängig von einander wiederholt werden, was zu einer korrekten Posenbestimmung führt. Es ist demnach anzunehmen, dass nach der ersten Posenbestimmung ein fehlerhafter Graustufenschwellwert  $g_{\text{min}}$  berechnet wird und anschließend die IR-LEDs nicht weiter erkannt werden. Die Ausfallrate im Bereich  ${}^cZ_{M,\text{ref}} < 580$  mm befindet sich maximal bei 1,0% für den Abstand  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 85$  mm. Bei der Referenzentfernung von  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 580$  mm werden lediglich bei 539 von 900 (59,8%) Versuchen mehr als fünf von zehn wiederholten Posenbestimmungen erfolgreich durchgeführt. Aus diesem Abstand werden vermehrt nicht mehr alle vier Blobs gleichzeitig erkannt, sodass im Intervall von 1 s keine Pose ermittelbar ist. Bei dieser Entfernung wird die Inlet-Posenbestimmung instabiler. Werden alle Versuche als erfolgreich gezählt, bei denen mindestens eine Pose ermittelt werden kann, werden im Abstand  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 580$  mm insgesamt 892 von 900 Posen erfolgreich bestimmt. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die IR-LEDs im gesamten Untersuchungsbereich detektierbar sind und dass eine Pose bestimmt werden kann. Dies ist die Grundvoraussetzung für die in Kapitel 5.2 entwickelte Ladeprozedur.

**Tabelle 6.5:** Gemittelte Abweichungen zwischen Referenzpose und bestimmter Pose für die IR-LEDs und die Standardabweichungen vom Mittelwert

${}^cZ_{M,\text{ref}}$	Translation in [mm]						Rotation in [°]						Anzahl
	$\overline{\Delta X}$	$\sigma_X$	$\overline{\Delta Y}$	$\sigma_Y$	$\overline{\Delta Z}$	$\sigma_Z$	$\overline{\Delta\theta_X}$	$\sigma_{\theta_X}$	$\overline{\Delta\theta_Y}$	$\sigma_{\theta_Y}$	$\overline{\Delta\theta_Z}$	$\sigma_{\theta_Z}$	
60	1,22	0,22	-1,98	0,19	-0,14	0,52	-0,16	1,61	-4,26	4,99	0,03	0,65	538/540
85	1,80	0,33	-3,22	0,23	-0,34	0,84	0,88	2,40	-3,69	2,91	-0,08	1,68	891/900
130	3,02	0,33	-4,95	0,33	-1,13	1,19	0,86	2,87	-3,66	2,91	-0,12	1,69	893/900
250	6,32	0,42	-9,54	0,42	-3,74	2,57	0,51	5,66	-3,12	3,50	-0,14	1,66	893/900
415	10,58	0,62	-13,15	0,59	-7,15	4,50	1,59	8,62	0,29	7,55	-0,39	1,87	892/900
580	14,80	0,80	-22,23	0,68	-5,78	4,93	2,45	11,61	7,03	11,61	-0,68	2,59	539/900

In **Abbildung 6.5** werden die Abweichungen über den vollständigen Versuchsumfang von 5040 Versuchen für alle Freiheitsgrade dargestellt. Die horizontale Achse führt die Versuche  $n$  auf, die bezüglich der Referenzabstände  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  (siehe Daten in Tabelle 6.5) unterteilt wird. Die roten Punkte bilden die über die zehn aufgenommen Posen bei einem Versuch  $n$  die gemittelte Abweichung ab. Die schwarzen Punkte zeigen dabei die Standardabweichung der zehn aufgenommen Posen bei einem Versuch  $n$ . Es ist in a) - c) zu erkennen, dass die translatorischen Abweichungen mit zunehmendem Abstand  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$ , aber auch zunehmenden Sichtfeld in  ${}^cX$ - und  ${}^cY$ -Richtung betragsmäßig zunehmen. Dabei ist ebenfalls festzustellen, dass die Standardabweichungen  $\sigma_{10}$  (schwarze Punkte) betragsmäßig zunehmen. Dies ist ein Indiz für eine zunehmend instabilere Posenbestimmung. Für  $\Delta X$  und  $\Delta Y$  befinden sich die Standardabweichungen  $\sigma_{10}$  in einem Bereich von  $< 2$  mm. Es ist anzunehmen, dass diese Größenordnung an Streuung unkritisch für die PTP-Vorpositionierung ist. Die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird im folgenden Abschnitt im Rahmen des zweiten Bewertungskriteriums näher betrachtet.

In den Abbildungen 6.5 d) - f) werden die rotatorischen Abweichungen aufgeführt. Für die Rotationen um  $X$  und  $Y$  ist ebenfalls festzustellen, dass mit zunehmendem Abstand und Sichtfeld die Abweichungen zunehmen und besonders die Standardabweichungen  $\sigma_{10}$  ansteigen. Dabei steigen die Werte für  $\sigma_{10}$  bei  $\theta_X$  auf bis zu  $26,4^\circ$  und bei  $\theta_Y$  auf bis zu  $30,32^\circ$  an. Da der Untersuchungs-



**Abbildung 6.5:** Abweichung zwischen ermittelter und Soll-Pose bei den einzelnen Abständen  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = \{60, 85, 130, 250, 415, 580\}$ . Die Standardabweichung bezieht sich auf die zehn aufgenommenen Posen pro Untersuchungspunkt.

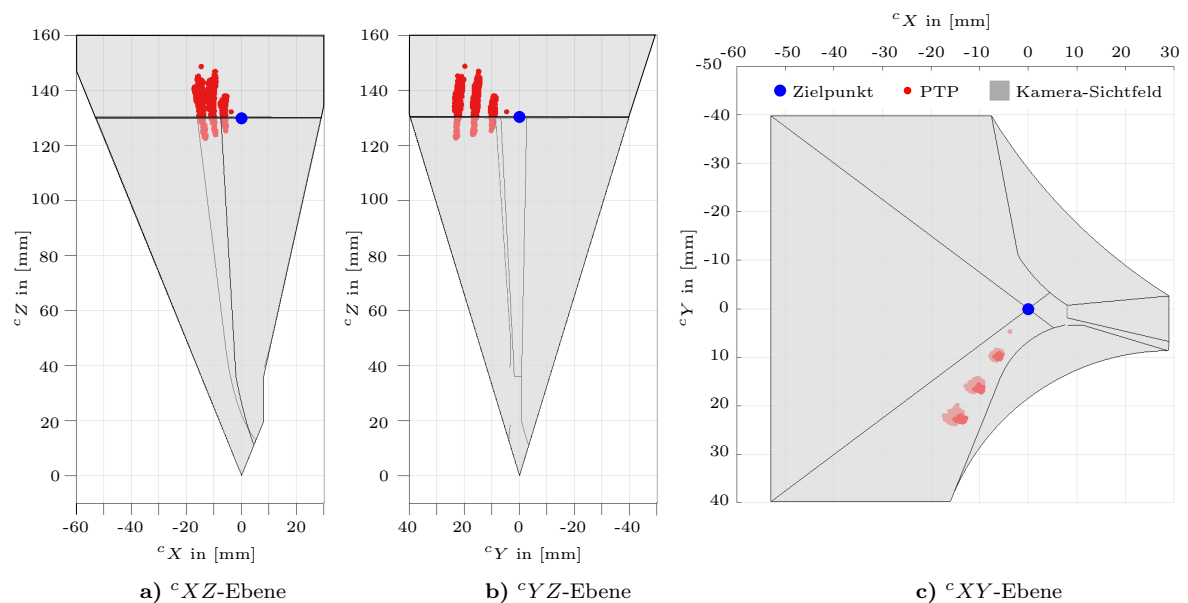
bereich lediglich  ${}^c\theta_{X,\text{ref}} = \pm 15^\circ$  und  ${}^c\theta_{Y,\text{ref}} = \pm 12,5^\circ$  umfasst, kann somit bestätigt werden, dass der rotatorische Teil der Inlet-Posenbestimmung im Bereich  ${}^cZ_M > 130$  mm zu vernachlässigen und für die PTP-Vorpositionierung nicht zu betrachten ist.

Anhand des ersten Bewertungskriteriums wird die Grundvoraussetzung einer möglichen Detektion und Posenbestimmung mithilfe der IR-LEDs im Untersuchungsbereich erfüllt. Auch wenn eine zunehmende Ungenauigkeit sowohl translatorisch als auch rotatorisch bei zunehmendem Abstand und Sichtfeld festzustellen ist, ist eine Posenbestimmung möglich. Im Folgenden wird untersucht, ob die Inlet-Posenbestimmung im Untersuchungsbereich  $250 \text{ mm} \leq {}^c Z_{M,\text{ref}} \leq 580 \text{ mm}$  ausreichend genau für die PTP-Vorpositionierung ist.

### Bewertungskriterium 2) - Erfolgreiche PTP-Vorpositionierung möglich?

Die in Abschnitt 5.2.1 beschriebene PTP-Vorpositionierung erfolgt nach dem erfolgreichen Suchen und Finden der IR-LEDs im ersten Schritt der automatischen Ladeprozedur. Die Genauigkeitsanforderung an die Inlet-Posenbestimmung kann so definiert werden, dass der Laderoboter mittels Posenbestimmung sich im Abstand von 130 mm vor dem Inlet positioniert und die IR-LEDs im Sichtfeld weiterhin vollständig sichtbar sein sollen. Befinden sich die IR-LEDs nach erfolgreichem Durchführen der PTP-Vorpositionierung außerhalb des Sichtfelds, kann sich der Roboterarm nicht weiter auf das Inlet zubewegen und der Vorgang wird abgebrochen. Um zu beurteilen, ob die Genauigkeit der Inlet-Posenbestimmung nach dem Suchen und Finden der IR-LEDs ausreichend ist, wird im Folgenden das Kamera-Sichtfeld aus Abbildung 5.9 betrachtet.

In **Abbildung 6.6** wird das Kamera-Sichtfeld in den verschiedenen Kamera-Ebenen dargestellt. Hierbei wird in  ${}^c Z$ -Richtung bei einer Länge von 130 mm die Zielentfernung durch eine Linie angedeutet, da dies die Zielentfernung nach der PTP-Vorpositionierung ist. Der Zielpunkt (0,0,130) wird im Kamerakoordinatensystem  ${}^c C$  in blau dargestellt. In rot werden die PTP-Zielpositionen angezeigt, die auf Basis der Inlet-Posenbestimmungen ermittelt werden. Sie stellen die Position des Marker-Koordinatensystems  ${}^M C$  dar, welches im Mittelpunkt der LED 0 liegt. In a)



**Abbildung 6.6:** Genauigkeitsuntersuchung der Inlet-Posenbestimmung für die PTP-Vorpositionierung mit IR-LEDs

und b) ist zu erkennen, dass die Entfernung teilweise zu nah und teilweise zu weit in der Posenbestimmung ermittelt wird. Auch wenn die Positionen in der Entfernung teils im Bereich  $> 130$  mm liegen, bleiben diese weiterhin sichtbar. Festzustellen ist in c), dass die Punkte in der  ${}^cXY$ -Ebene alle im Kamera-Sichtfeld sind. Auch wenn die roten Punkte lediglich die LED 0 widerspiegeln, befinden sich die restlichen drei IR-LEDs weiter links im Kamera-Sichtfeld und werden somit durch den Stecker nicht abgeschattet. Auf Basis dieser Untersuchung ist anzunehmen, dass die Inlet-Posenbestimmung mithilfe der IR-LEDs ausreichend genau ist, um eine PTP-Vorpositionierung erfolgreich durchführen zu können und die Marker im Anschluss alle weiterhin zu erkennen sind.

### Bewertungskriterium 3) - Einstecken möglich?

Mit den beiden vorherigen Bewertungskriterien kann die Eignung der Strategie für das Suchen der IR-LEDs zu Beginn der Ladeprozedur und für das erfolgreiche PTP-Vorpositionieren beurteilt werden. Mit dem dritten Bewertungskriterium wird anhand der Abweichungen in Tabelle 6.5 bewertet, ob die Inlet-Posenbestimmung im nahen Bereich  ${}^cZ_{M,\text{ref}} \leq 130$  mm ausreichend genau ist und ob diese eine geringe Streuung aufweist. Die absolute Genauigkeit ist in diesem Fall aufgrund der möglichen in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Ungenauigkeiten im Versuchsaufbau nur eingeschränkt zu betrachten. Die Standardabweichungen  $\sigma$  und  $\sigma_{10}$  charakterisieren, wie stabil die Posenbestimmung aus der Entfernung ist und ob ein Einstecken wiederholgenau durchgeführt werden kann.

Die gemittelten Abweichungen  $\overline{\Delta X} = 1,22$  mm und  $\overline{\Delta Y} = -1,98$  mm bei einer Referenzentfernung von  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 60$  mm sind laut Fangraumanalyse in Tabelle 2.2 ausreichend für das automatische Einstecken. Der Stecker kann sich nach dieser Untersuchung ausreichend selbstzentrieren. Die Standardabweichungen befinden sich mit  $\sigma_X = 0,22$  und  $\sigma_Y = 0,19$  auf einem ausreichend niedrigen Niveau und charakterisieren damit eine geringe Streuung bei unterschiedlichen Orientierungen und Positionen der IR-LEDs im Sichtfeld. Bezüglich der Rotation um  $X$  ist die gemittelte Abweichung mit  $\overline{\Delta\theta_X} = -0,16^\circ$  ebenfalls ausreichend. Die Standardabweichung mit  $\sigma_{\theta_X} = 1,16^\circ$  ist dabei jedoch deutlich höher. Hierfür ist bei den späteren Steckversuchen zu überprüfen, ob fehlerhaftes Steckverhalten durch eine fehlerhafte Orientierung zwischen Stecker und Inlet hervorgerufen werden. Die Stabilität der Posenbestimmung bei der Zieldistanz von  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 60$  mm wird bereits in Abbildung 5.14 anhand der Untersuchung des Posenrauschens als ausreichend bewertet.

Sowohl die gemittelten Abweichungen  $\overline{\Delta X}$ ,  $\overline{\Delta Y}$ ,  $\overline{\Delta Z}$  und  $\overline{\Delta\theta_X}$  als auch deren Standardabweichungen steigen betragsmäßig mit zunehmender Entfernung an. Da für das VS1 mit dem Zielabstand von  ${}^cZ_M$  geringere Genauigkeitsanforderungen gelten als für das VS2, sind die betragsmäßig zunehmenden Ungenauigkeiten bei  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 85$  mm und  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 130$  mm als unkritisch zu bewerten.

Insgesamt erfüllt die Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit den IR-LEDs alle Bewertungskriterien. Es ist demnach anzunehmen, dass die entwickelte Ladeprozedur und der hier ver-

wendeten Strategie der Posenbestimmung wiederholte erfolgreiche Steckversuche erzielen kann. Dies ist in Kapitel 7 zu evaluieren. Im Folgenden wird der AprilTag als passiver Marker zur Inlet-Posenbestimmung untersucht.

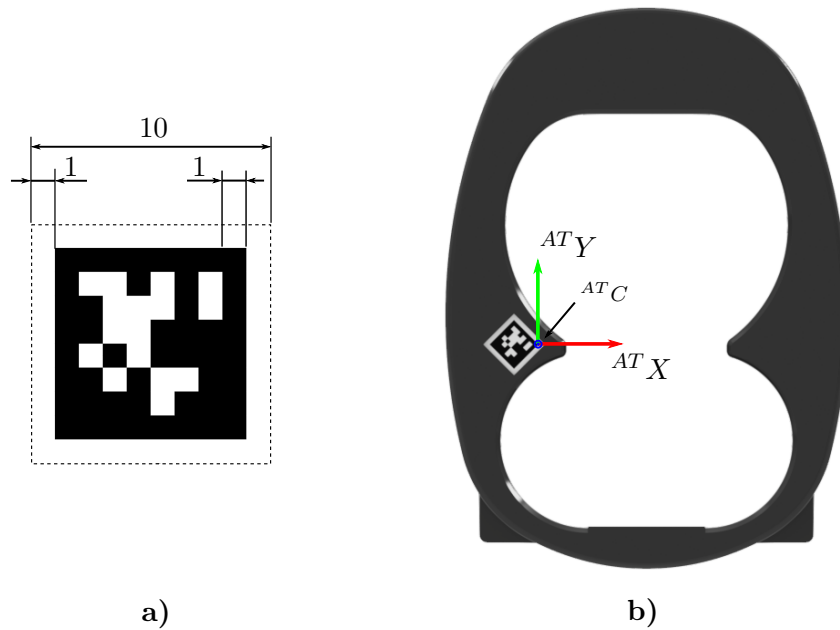
## 6.5 AprilTag als passiver Marker

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, kann als passiver Marker ein *fiducial marker* zur Posenerkennung verwendet werden. Dies wird bereits vielseitig im Bereich der Augmented Reality [FK12] oder auch für mobile Roboter [GG17] eingesetzt. Obwohl mit einem fiducial marker nur eine geringe Menge an Informationen übertragen werden kann, ist dieser auch bei einer geringen Kameraauflösung oder auch bei Rotationen sehr gut automatisch zu erkennen und zu lokalisieren. Zudem bietet ein zweidimensionaler planarer Marker gegenüber den LEDs den Vorteil, dass der Marker kostengünstig auf einem handelsüblichen Papierdrucker ausgedruckt werden kann und er die Möglichkeit bietet, eine Posenbestimmung mit sechs Freiheitsgraden durchzuführen, ohne dass mehrere LEDs in definiertem Abstand an einem modifizierten Inlet zu montieren sind. [Ols11]

Als passiver Marker wird in diesem Fall der AprilTag ausgewählt. Nach [Ols11] ist der AprilTag bezüglich der Genauigkeit bei gleichem Abstand und Winkel besser als seine Vorgänger wie beispielsweise der ARToolkit [KB99]. Nach [AABM19] präferieren seitdem viele Forscher den AprilTag, auch wenn Lokalisierungsprobleme auftreten können, die auf Faktoren wie Blickwinkel, Abstand oder auch die Kamerarotation um die Sichtachse zurückzuführen ist. Auf Basis umfangreicher Analysen nach [AABM19] treten die größten Ungenauigkeiten in der Posenbestimmung bei zunehmender Distanz, bei einem abweichenden Schnittpunkt zwischen  $^cZ$ -Achse und dem Mittelpunkt des AprilTags und bei einem Gierwinkel der Kamera von  $\neq 0^\circ$  auf. Der Gierwinkel entspricht in dem hier vorliegenden Anwendungsfall dem Winkel  ${}^l\theta_Y$  aus dem vorherigen Kapitel. Die höchste Genauigkeit wird demnach erreicht, wenn die Ebene des AprilTags parallel zur Sensorebene der Kamera liegt [AABM19].

### 6.5.1 Auswahl und Positionierung des AprilTags

Für die folgenden Untersuchungen wird ein AprilTag der Klasse 36h11 ausgewählt, da dieser den Untersuchungen nach [YHD21] zufolge die höchste Genauigkeit im Bereich der Posenbestimmung unter der Verwendung von AprilTags aufweist. Die Größe des AprilTags hat nach [KFW20] keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Posenbestimmung, jedoch sinkt bei kleiner werdenden Tags der maximale Detektionsabstand. Die Auswahl der Außenabmessungen des Tags ist in diesem Anwendungsfall durch die Geometrie des Inlets begrenzt und wird so gewählt, dass der AprilTag die zu den IR-LEDs vergleichbare maximale quadratische Größe mit der Kantenlänge von 10 mm inklusive einem jeweils 1 mm breiten weißen und schwarzen Rahmen einnimmt. Die Auswahl der Größe stellt sicher, dass die IR-LEDs und der AprilTag innerhalb des selben Versuchsplans sichtbar sind. In **Abbildung 6.7 a)** wird der AprilTag der Klasse 36h11 und der ID: 0 mit den jeweiligen Abmessungen dargestellt. Dieser wird auf ein Etikettenpapier aufgedruckt und kann somit aufgeklebt werden. Die Positionierung des Tags



**Abbildung 6.7:** AprilTag an analoger Position wie IR-LEDs  
 a) AprilTag der Klasse 36h11 und ID: 0  
 b) Anordnung des AprilTags auf Inletfront

erfolgt an der selben Stelle wie die der IR-LEDs mit dem hier gewählten und transformierten Koordinatensystem  ${}^{AT}C$ . Dies wird in b) dargestellt. Auch der AprilTag wird um 0,8 mm vertieft aufgeklebt, damit die Entfernung zwischen Kamera und Markierung bei gleicher Einstellung am Versuchsstand identisch zu der bei Verwenden von IR-LEDs ist (siehe Abschnitt 6.2.1).

Die Untersuchung der Posenbestimmung erfolgt mit dem Open-Source Package *apriltag\_ros* von [MBH<sup>+</sup>19], [BMHB18] und [WO16], welches im ROS verwendet werden kann. Durch das Verwenden der intrinsischen Kameraparameter kann eine Pose anhand des eingelesenen Kamerabilds ermittelt werden. Dabei werden die standardmäßig eingestellten Parameter für die AprilTag-Erkennung verwendet. Um eine möglichst hohe Genauigkeit erreichen zu können, sollte das Eingangsbild mithilfe der ermittelten Verzerrungsparameter aus Abschnitt 6.2.2 korrigiert werden.

### 6.5.2 Untersuchungsergebnisse

Die Versuchsdurchführung für die Genauigkeitsuntersuchung der Posenbestimmung mit dem AprilTag erfolgt analog wie mit den IR-LEDs. Es ist bereits hier zu betonen, dass ein Vergleich beider Strategien lediglich qualitativ im Rahmen von Vor- und Nachteilen methodisch korrekt ist. Durch das Verwenden zweier vom Bautyp gleicher Kameras, die unabhängig von einander kalibriert sind, können absolute Genauigkeiten nur eingeschränkt verglichen werden. Auch wenn das gleiche Verfahren zur Kalibrierung verwendet wird, ist der Fehler als unterschiedlich anzunehmen. Ein zweiter wesentlicher Effekt, der hier zu betrachten ist, sind die Randbedingungen. Auch wenn beide Versuchsreihen im selben Labor durchgeführt werden, ist die Genauigkeit der Posenbestimmung mit dem AprilTag stärker vom Umgebungslicht abhängig als die Posenbestimmung mit den IR-LEDs. Zudem wird der UR10 mit dem montierten Inlet und der Stecker



mit der neu eingebauten Kamera neu zueinander referenziert, wobei nach den in Abschnitt 6.2.1 aufgeführten Punkten eine weitere Ungenauigkeit mitzubersichtigen ist. Die folgenden Untersuchungen dienen der Identifizierung von qualitativen Vor- und Nachteilen gegenüber den IR-LEDs und von möglichen Problemen.

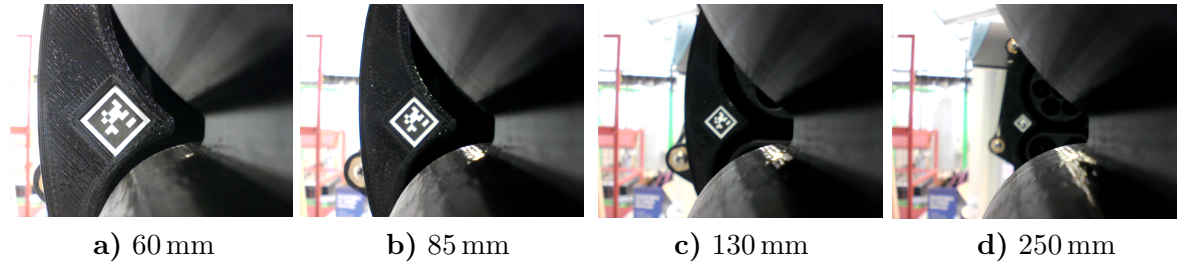
### Bewertungskriterium 1) - AprilTag im Untersuchungsraum detektierbar?

**Tabelle 6.6:** Gemittelte Abweichungen zwischen Referenzpose und bestimmter Pose für den AprilTag und die Standardabweichungen vom Mittelwert

${}^c Z_{AT,ref}$	Translation in [mm]						Rotation in [°]						Anzahl
	$\overline{\Delta X}$	$\sigma_X$	$\overline{\Delta Y}$	$\sigma_Y$	$\overline{\Delta Z}$	$\sigma_Z$	$\overline{\Delta \theta_X}$	$\sigma_{\theta_X}$	$\overline{\Delta \theta_Y}$	$\sigma_{\theta_Y}$	$\overline{\Delta \theta_Z}$	$\sigma_{\theta_Z}$	
60	3,18	0,28	-0,85	0,48	1,32	0,80	1,82	1,17	0,45	1,62	-0,07	0,64	540/540
85	2,04	0,61	-1,28	0,56	2,26	1,47	0,43	2,32	0,43	3,01	0,02	1,81	900/900
130	0,13	1,07	-1,78	0,77	6,08	2,59	5,21	5,59	-2,51	5,53	-0,27	1,67	871/900
250	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	0/900
415	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	0/900
580	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	0/900

In **Tabelle 6.6** werden die gemittelten Abweichungen  $\overline{\Delta}$  und die Standardabweichungen  $\sigma$  chronologisch nach der Referenzentfernung  ${}^c Z_{AT,ref}$  geordnet aufgeführt. Es ist festzustellen, dass eine erfolgreiche Posenbestimmung bis zu einer Entfernung von lediglich  ${}^c Z_{AT,ref} = 130$  mm durchgeführt werden kann. In **Abbildung 6.8** werden Bildaufnahmen mit sichtbarem AprilTag aus verschiedenen Entfernungen dargestellt. Dabei wird deutlich, wie der AprilTag mit zunehmender Entfernung unschärfer abgebildet wird, bis dieser bei einer Entfernung von  ${}^c Z_{AT,ref} = 250$  mm nicht mehr detektiert werden kann. Unter der Berücksichtigung der hier verwendeten Kamera ist festzuhalten, dass bei Verwenden der IR-LEDs eine wesentlich größere Entfernung bei gleichzeitiger erfolgreicher Markererkennung und Posenbestimmung als bei dem hier untersuchten AprilTag abgedeckt werden kann. Das zunehmend unscharfe Bild verhindert das Erkennen des AprilTags, da die Kontur des Tags nicht mehr eindeutig festzustellen ist. Die IR-LEDs bleiben hingegen weiterhin als runde Blobs sichtbar (siehe Abbildung 5.8). Ein wesentlicher Vorteil der IR-LEDs ist demnach die geringere Abhängigkeit von der Schärfe des Bildes und somit auch von der Komplexität der Kameraoptik. Während bei den IR-LEDs ein Detektieren der Marker bis weit außerhalb des fixen Fokusbereichs erfolgen können, ist das Erkennen des AprilTags bereits bei einer Entfernung von 250 mm nicht mehr möglich. Das Bewertungskriterium 1) aus Tabelle 6.2 wird demnach nicht vollständig erfüllt. Ein Detektieren des AprilTags im Rahmen der Suche zu Beginn der Ladeprozedur ist erfolglos, sodass keine PTP-Vorpositionierung stattfinden kann.

Bei der Entfernung von  ${}^c Z_{M,ref} = 130$  mm werden lediglich 871 von 900 untersuchten Posen erkannt. Bei 29 Posen (3,22%) wird bei zehn wiederholten Posenbestimmungen mehr als fünf Mal kein AprilTag erkannt. Bei näherer Betrachtung sind dies alle Posen, bei denen das Inlet und der aufgeklebte AprilTag um  $15^\circ$  ( $\theta_{X_{At,ref}} = -165^\circ$ ) nach oben geneigt ist. Davon befinden sich 26 Posen um  ${}^c X_{M,ref} = -30$  mm und 3 Posen um  ${}^c X_{M,ref} = -15$  mm versetzt. Demnach liegt der Zusammenhang vor, dass eine Detektion des AprilTags bei einer Entfernung von  ${}^c Z_{M,ref} = 130$  mm und einem nach oben geneigten Inlet in Kombination mit dem sich außerhalb des Mittelpunkts



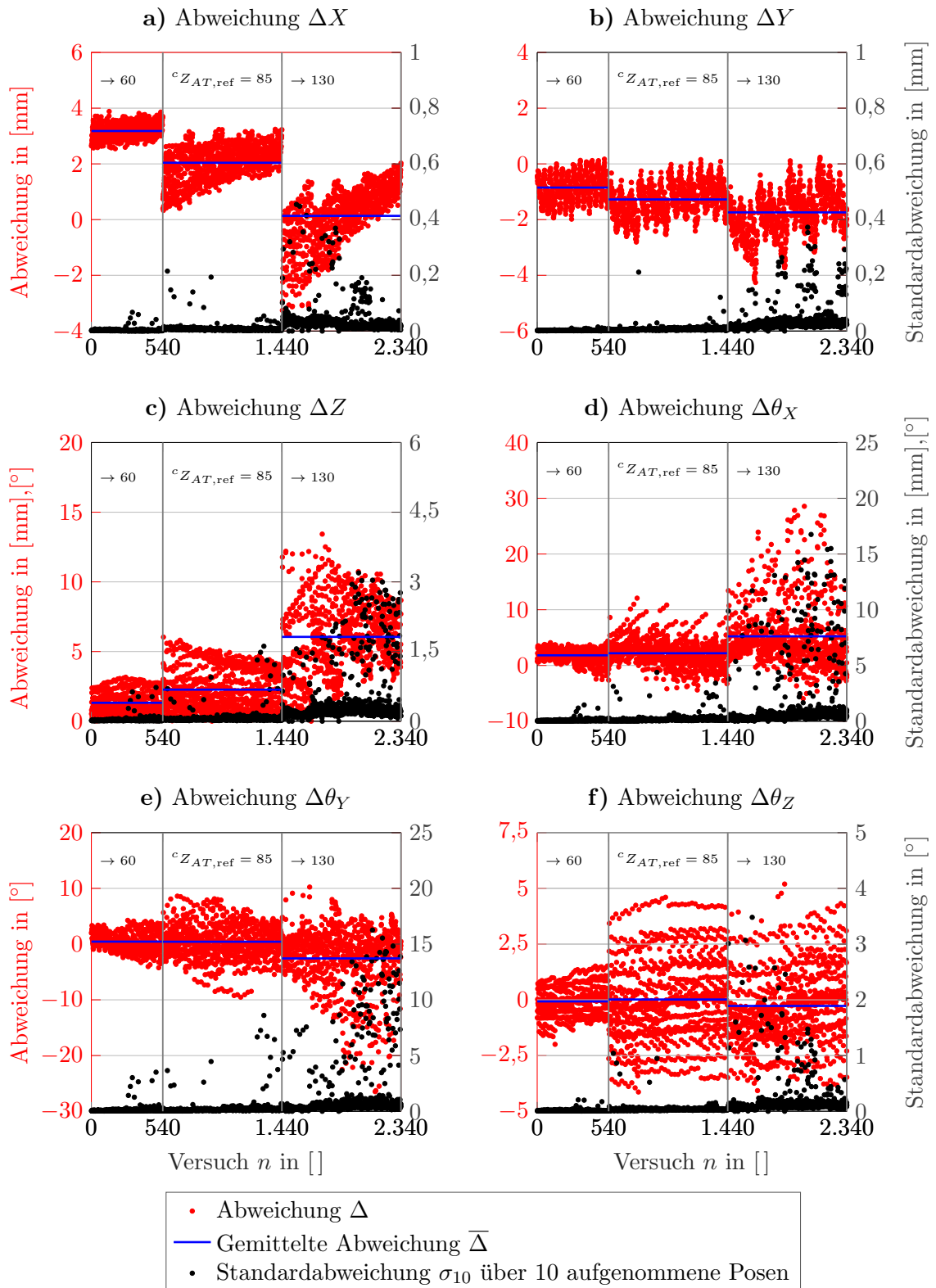
**Abbildung 6.8:** Bildaufnahmen (RAW) des AprilTags bei unterschiedlicher Entfernung  ${}^cZ_{AT,ref}$  und  ${}^cX_{AT,ref} = {}^cY_{AT,ref} = 0$  mm und  $\theta_{X_{AT,ref}} = 180^\circ$ ,  $\theta_{Y_{AT,ref}} = \theta_{Z_{AT,ref}} = 0^\circ$

befindenden AprilTags erschwert wird. Anzunehmen ist eine Abhängigkeit vom Umgebungslicht. Der AprilTag wird bei  $\theta_{X_{At,ref}} = -165^\circ$  von den Deckenleuchten in der Versuchshalle angestrahlt und eine erfolgreiche Detektion wird erschwert. Durch Abschalten der Deckenleuchte können die AprilTags wiedererkannt werden, die zuvor nicht detektiert werden konnten. Festzuhalten ist demnach, dass die Detektion des AprilTags von den Lichtbedingungen abhängig ist und dies einen wesentlichen Nachteil gegenüber den Untersuchungsergebnissen bezüglich der IR-LEDs darstellt.

Anhand der aufgeführten Standardabweichungen in Tabelle 6.6 wird deutlich, dass die Standardabweichungen für alle Freiheitsgrade bis auf  $\sigma_{\theta_z}$  mit zunehmender Distanz  ${}^cZ_{AT,ref}$  ansteigen. Demnach ist anzunehmen, dass die Posenbestimmung mit zunehmendem Abstand zwischen Kamera und AprilTag und demnach vom Betrag zunehmendem Sichtfeld in  ${}^cX_{M,ref}$  und  ${}^cY_{M,ref}$  instabiler wird und somit eine ansteigende Streuung festzustellen ist. In **Abbildung 6.9** werden die Abweichungen über den vollen Versuchsumfang von 2340 Versuchen für alle Freiheitsgrade dargestellt. Über die horizontale Achse werden die Versuche  $n$  aufgetragen, in der eine Unterteilung über die Abstände  ${}^cZ_{AT,ref}$  bezüglich der Daten in Tabelle 6.6 aufgeführt wird. Die roten Punkte zeigen die über die zehn aufgenommen Posen bei einem Versuch  $n$  gemittelte Abweichung. Die schwarzen Punkte charakterisieren dabei die Standardabweichung der zehn aufgenommen Posen bei einem Versuch  $n$ . Es ist festzuhalten, dass die Posenbestimmung mit zunehmendem Abstand instabiler wird und auch bei der wiederholten Posebestimmung bei einem Versuch  $n$  die Standardabweichung  $\sigma_{10}$  zunimmt. Auf eine detaillierte Analyse der Abhängigkeiten bei einer Variation aller Faktoren wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da die notwendigen Informationen anhand der vorherigen Analyse erhoben werden können. Die Inlet-Posenbestimmung kann im Rahmen dieses Versuchsaufbaus das Bewertungskriterium 1) nicht erfüllen.

### **Bewertungskriterium 2) - Erfolgreiche PTP-Vorpositionierung möglich?**

Wie zuvor beschrieben, wird der AprilTag in der vorliegenden Konfiguration (Größe, Kameraposition im Stecker und geringem Fokusbereich) im Rahmen des Versuchsumfangs bei Entfernung von  ${}^cZ_{AT,ref} > 130$  mm nicht detektiert. Demnach ist keine Genauigkeitsbetrachtung der Posen bezüglich der PTP-Vorpositionierung möglich. Das Bewertungskriterium 2) kann somit ebenfalls nicht erfüllt werden.



**Abbildung 6.9:** Abweichung zwischen ermittelter und Soll-Pose bei den einzelnen Abständen  ${}^cZ_{AT,ref} = \{60, 85, 130\}$ . Die Standardabweichung bezieht sich auf die zehn aufgenommenen Posen pro Untersuchungspunkt.

### Bewertungskriterium 3) - Einstecken möglich?

Bei der Entfernung von  ${}^cZ_{AT,ref} = 60$  mm werden für die Positionsgenauigkeit gemittelte Werte ( $\overline{\Delta X}$ ,  $\overline{\Delta Y}$ ,  $\overline{\Delta Z}$ ) von 3,18 mm, 0,85 mm und 1,32 mm erreicht. Die gemittelten Abweichungen sind, wie bereits beschrieben, mit denen aus der Genauigkeitsuntersuchung mit der IR-LEDs nicht absolut vergleichbar. Die Standardabweichungen  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$  hingegen befinden sich in einem Bereich von  $< 1$  mm mit maximal  $\sigma_Z = 0,80$  mm und somit in einem vergleichbaren Bereich zu den IR-LEDs (siehe Tabelle 6.2.1). Insgesamt werden auch hier 540 verschiedene Posen untersucht, wobei mithilfe des AprilTags für alle Referenzposen eine Pose bestimmt werden kann. Bei Nichtberücksichtigen der absoluten Abweichung kann bei der Größenordnung der Standardabweichungen angenommen werden, dass ein automatisches Einstecken in der Zielentfernung von  ${}^cZ_{AT,ref} = 60$  mm möglich ist.

Im Folgenden wird eine Strategie der Inlet-Posenbestimmung vorgestellt, bei der keine zusätzlichen Modifikationen am Inlet notwendig sind.

## 6.6 Neuronales Netzwerk zur Posenbestimmung ohne Marker

Wie bereits in Abschnitt 2.3 beschrieben, wird die Posenbestimmung von Objekten ohne zusätzliche Marker in der Regel mithilfe eines Feature oder Template basierenden Matching durchgeführt. Da das hier vorliegende mattschwarze einfarbige Inlet mit texturloser Oberfläche nach [XSNF18] tendenziell ungeeignet für ein Feature basierendes Matching und ein Template basierendes Matching empfindlich gegen Abschattungen wie beispielsweise durch den Combo 2 Stecker selbst ist, wird im Folgenden ein alternativer Lösungsweg vorgestellt.

Ein Ansatz der Inletdetektion ist das Trainieren eines neuronalen Netzwerks mithilfe eines *deep learnings* zur Erkennung des Inlets und der anschließenden Posenbestimmung. Das Vorgehen *DOPE (Deep Object Pose Estimation)* nach [TTS<sup>+</sup>18b] sieht vor, synthetische Bilddaten, die das abgebildete Zielobjekt in definierter Pose zur Kamera darstellen, zu generieren und mithilfe dieser das neuronale Netzwerk zu trainieren. Um den sogenannten *reality-gap* zwischen realer Bildaufnahme und dem synthetischen Trainingsmaterial zu schließen, sollen sowohl im Bildbereich randomisierte als auch fotorealistische Daten für das Training verwendet werden. Das bedeutet, das Objekt sowohl mit beliebigem zufällig ausgewähltem Hintergrund als auch mit realistischem Hintergrund darzustellen und für das Training des Netzwerkes zu verwenden. [TTS<sup>+</sup>18b]

Im Folgenden wird das Vorgehen von DOPE grundsätzlich vorgestellt. Bezüglich des detaillierten Aufbaus und Vorgehens wird auf [TTS<sup>+</sup>18b] und [NVI20] verwiesen.

### 6.6.1 Vorgehen DOPE

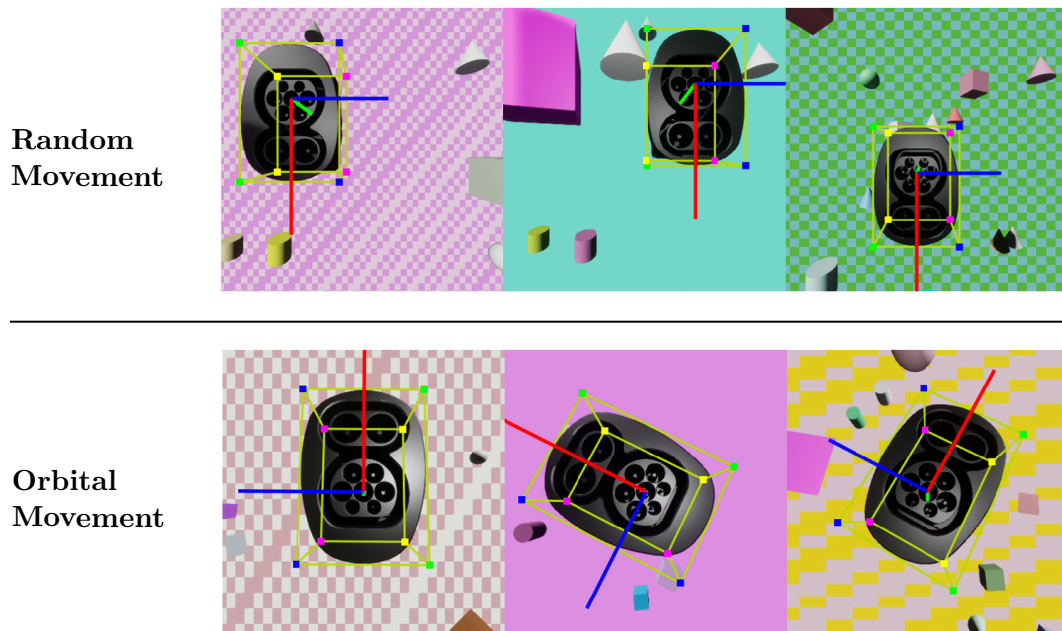
Der Ablauf der Detektion mit anschließender Posenbestimmung lässt sich in zwei Schritte unterteilen. Zunächst bestimmt ein *mehrschichtiges neuronales Netzwerk* sogenannte *belief maps* von zweidimensionalen Merkmalen des zu erkennenden Objekts im Bildkoordinatensystem. Da-

bei greift das Vorhaben auf ein vortrainiertes *Convolutional Neural Network (CNN)* namens VGG-19 [SZ15] zurück, um auf eine vielseitige Merkmalerkennung zugreifen zu können. Insgesamt werden neun dieser belief maps ermittelt. Acht davon sind die Eckpunkte einer *Bounding Box* in Form eines Quaders um das Objekt. Der neunte Punkt stellt den Mittelpunkt der Bounding Box da. Neben den belief maps werden acht *vector fields* bestimmt, mit denen jeweils von einem Eckpunkt auf den zugehörigen Mittelpunkt des Objekts gezeigt wird. So können beim Erkennen mehrerer gleicher Objekte die Eckpunkte korrekt zugeordnet werden. [TTS<sup>+</sup>18b]

Mithilfe der Projektion der dreidimensionalen Eckpunkte der Bounding Box in zweidimensionalen Bildkoordinaten kann ein *PnP*-Algorithmus, wie in Kapitel 2 beschrieben, für die Posenbestimmung verwendet werden. Auch hier werden dafür die intrinsischen Kameraparameter und die realen Objektdimensionen für die Bestimmung der Position und Orientierung benötigt. Es werden dabei alle erkannten Eckpunkte verwendet, solange es, wie bekannt, mindestens vier sind. [TTS<sup>+</sup>18b]

Für das Training des neuronalen Netzwerks bezüglich neuer Objekte werden für DOPE synthetische Daten verwendet. Auch wenn ein manuelles Training durch manuelles Einzeichnen der Eckpunkte eines dreidimensionalen Objektes in zweidimensionalen Bildern grundsätzlich möglich ist, ist ein manuelles Verfahren fehleranfällig und zeitaufwändig. Aus diesem Grund wird für das Generieren synthetischer Daten, in denen das Zielobjekt in definierter Pose bildlich abgebildet und eine Informationsdatei mit der Position der Eckpunkte im Bild gespeichert wird, die Software *Unreal Engine 4 (UE4)* verwendet. Mithilfe des von [TTS<sup>+</sup>18b] entwickelten Plug-in *NDDS (Nvidia Deep Learning Dataset Synthesizer)* [TTM<sup>+</sup>18] können diese synthetischen Trainingsdaten in einer virtuellen Umgebung erstellt werden. Nach [TTS<sup>+</sup>18b] hat das Verwenden von synthetischen Daten den Vorteil, ein *Overfitting* zu vermeiden. Diese sogenannte Überanpassung hat zu Folge, dass das neuronale Netzwerk nicht in der Lage ist, abgebildete Objekte abweichend von denen der Trainingsdaten erstellten Darstellungen zu erkennen und diese zu generalisieren [WBAK20]. Ein *Overfitting* kann bei einem Training für ein einzelnes Objekt nach [Wu18] bereits ab einer Datenmenge von 100.000 Trainingsdaten eintreten. [TTS<sup>+</sup>18b]

Im Rahmen der Arbeit [Sch21] wird ein Datenset für das Trainieren des neuronalen Netzwerks mithilfe UE4 und dem NDDS Plug-in erstellt. In **Abbildung 6.10** wird dargestellt, wie das Inlet mit randomisiertem Hintergrund und randomisierter Bewegung im Raum vor der Kamera abgebildet wird. Das Inletkoordinatensystem, welches in **Abbildung 6.10** abweichende Farben und eine abweichende Orientierung aufweist, bleibt wie in **Abbildung 4.7** dargestellt, im PE-Pin  ${}^I C$  mit  ${}^I Z$  negativ in Steckrichtung orientiert. Die Bewegung in UE4 wird in zwei Arten unterteilt. Unterschieden wird dabei die Bewegung *Random Movement*, bei der sich lediglich translatorisch bewegt wird und die *Orbital Movement*, bei der sich die Kamera im Orbit um das Objekt bewegt. Bei der translatorischen Bewegung wird eine Entfernung zwischen Kamera und Objektkoordinatensystem im Bereich von 50 mm bis 250 mm abgetastet, während für  ${}^c X_M$  und  ${}^c Y_M$  der Bewegungsbereich so angepasst wird, dass unabhängig von der Entfernung das Inlet in jedem Bild vollständig zu erkennen ist. Bei Verwenden der virtuellen Kamera ist das Inlet in die-



**Abbildung 6.10:** Generierung des Trainingsset in UE4 mit NDDS Plug-in [Sch21]

sem Untersuchungsbereich in jedem Bild vollständig sichtbar, da der diagonale Blickwinkel der in [Sch21] verwendeten virtuellen Kamera  $109,5^\circ$  beträgt. Dies kann bei der späteren Untersuchung zu Abweichungen führen, da die hier verwendete Kamera ein Blickwinkel von lediglich  $54^\circ$  vorweist. Für die Orbital Movement wird der Winkel der Kameraachse  ${}^cZ$  und der  ${}^I Z$ -Achse im Bereich zwischen  $0^\circ$  und  $20^\circ$  variiert, während sich die Kamera in vollständigen Umdrehungen um die  ${}^I Z$ -Achse bewegt und die Kameraachse auf den Ursprung des Inlets  ${}^I C$  gerichtet ist. So werden Trainingsdaten für die Inletneigungen  ${}^I \theta_X$  und  ${}^I \theta_Y$  im Bereich von  $\pm 20^\circ$  erstellt. Zudem wird eine Lichtquelle randomisiert im Raum bewegt, mit der unterschiedliche Lichtquellen und Schattenwürfe in den Datensätzen abgebildet werden. [Sch21]

Die Bildaufnahmen haben eine Bildgröße von  $400 \times 400$  Pixeln, was nach [TTS<sup>+</sup>18a] für die Generierung der Datensätze empfohlen wird. Der Grund ist, dass sich eine Reduzierung der Bildgröße sowohl in der Rechenleistung als auch für die Erkennungsergebnisse positiv auswirkt. In **Tabelle 6.7** werden die nacheinander erstellen Trainingssätze aufgeführt, mit denen das neuronale Netzwerk trainiert wird. Die translatorische Bewegung der Kamera wird sowohl im Abstand zum Inlet als auch in der  ${}^c X {}^c Y$ -Ebene variiert. Zudem wird die virtuelle Orbitalbewegung im Bezug auf die Winkelstellung zwischen Kameraachse im Bereich von  $\pm 20^\circ$  randomisiert. Insgesamt wird ein Datensatz der Gesamtgröße von 150.000 Bildern und den dazugehörigen Posen generiert. Die Umgebung ist dabei zu jedem Zeitpunkt randomisiert. Auf das Verwenden von fotorealistischen Bildern im Hintergrund, wie dies in [TTS<sup>+</sup>18b] empfohlen wird, wird hierbei verzichtet, da das Inlet im Anwendungsfall am Fahrzeug verbaut ist, jedoch innerhalb der vorliegenden Versuchsreihe am Versuchsstand evaluiert wird. Eine Lichtquelle wird sowohl statisch als auch randomisiert in der virtuellen Umgebung angeordnet. Diese ruft eine unterschiedliche Schattierung anhand der Inletkonturen hervor. [Sch21]

Erste Untersuchungen mit einer kalibrierten Logitech C920 HD Webcam (Daten siehe **Anhang Tabelle A.2**) zeigen, dass das Inlet bereits nach dem ersten Training mit 20.000 Bildern erkannt werden kann. Die Verwendung der Webcam wird damit begründet, dass diese im Vergleich zu der vorher verwendenden Endoskopkamera einen automatischen Fokus über eine größere Distanz aufweist und somit für erste Testzwecke besser geeignet ist. In **Abbildung 6.11 a)** wird das Erkennen des Inlets nach dem Training mit 80.000 Bildern dargestellt. Das Inlet wird bereits detektiert, jedoch wird die Posenbestimmung instabil bei Änderungen der Orientierung oder der Lichtverhältnisse. Wie in Tabelle 6.7 aufgeführt, wird das Training mittels weiterer randomisierter Bewegungen und auch randomisierter Lichtquellenpositionen fortgeführt, wodurch sich das Detektieren verbessern lässt. Die Verbesserungen werden bis dato durch visuelle Beobachtungen bewertet und nicht quantifiziert. Bei dem Datensatz von 150.000 tritt ein *Overfitting* ein und das Inlet kann nur noch vereinzelt erkannt werden. Das Overfitting, bei dem das neuronale Netzwerk die Trainingsdaten "auswendig" lernt, anstatt auf Basis der Daten zu generalisieren [Fro21] ist hierbei in Form einer instabilen Detektion erkennbar. Der Datensatz mit einer Gesamtgröße von 150.000 Daten wird demnach nicht weiter berücksichtigt. [Sch21]

**Tabelle 6.7:** Datensätze für das Training des neuronalen Netztes und die jeweiligen virtuellen Eigenschaften [Sch21]

Datensatzgröße gesamt	Virtuelle Kamerabewegung	Umgebung	Abstand in UE4	Lichtquelle
20.000	Orbital (0°-20°)	Randomisiert	statisch 250 mm	statisch
40.000	Randomisiert (X,Y: ±100 mm)	Randomisiert	statisch 250 mm	statisch
60.000	Randomisiert (X,Y: ±100 mm)	Randomisiert	variierend 100-250 mm	randomisiert
80.000	Orbital (0°-20°)	Randomisiert	variierend 100-250 mm	randomisiert
100.000	Orbital (0°-20°)	Randomisiert	variierend 100-250 mm	randomisiert
120.000	Randomisiert (X,Y: ±50 mm)	Randomisiert	variierend 50-120 mm	randomisiert
150.000	Orbital (0°-20°)	Randomisiert	variierend 50-120 mm	randomisiert

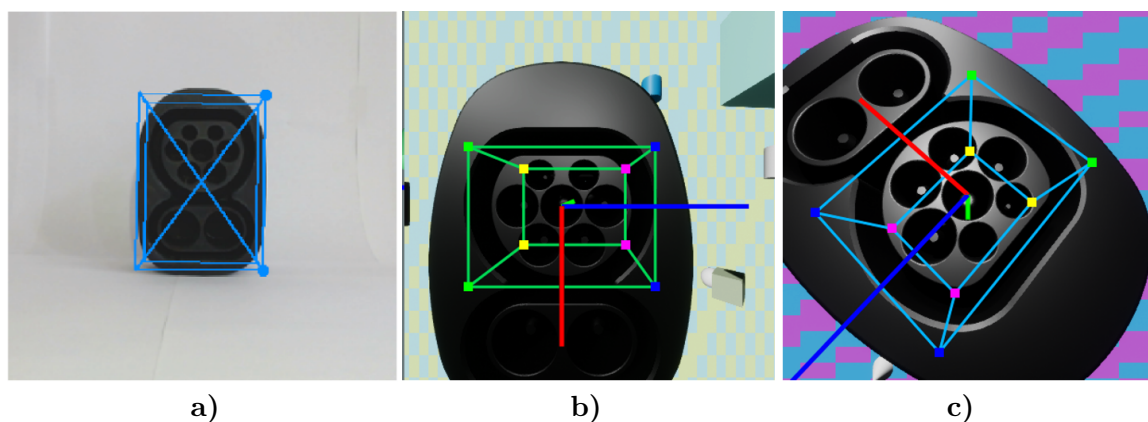
Anhand der ersten Untersuchungen im Rahmen der Arbeit nach [Sch21] wird gezeigt, dass bei Abständen zwischen Kamera (hier die genannte Logitech Webcam) und dem Inlet von  $< 250$  mm das Inlet nicht mehr vollständig im Bild abgebildet wird. Da die Eckpunkte der Bounding Box nicht durch Bildpunkte dargestellt werden können und somit weniger als vier Punkte für den *PnP*-Algorithmus zu Verfügung stehen, ist eine Posenbestimmung nicht möglich. Aus diesem Grund wird das neuronale Netzwerk durch ein Training bezogen auf den AC-Anteil des Inlets erweitert. Durch die kleiner werdenden Kantenlängen der Bounding Box kann der Abstand zwischen Kamera und Inlet verringert werden. Die Datensatzgenerierung erfolgt nach dem ana-

logem Vorgehen wie für das gesamte Inlet aus Tabelle 6.7. Die Datensatzgenerierung wird in **Tabelle D.3** (siehe Anhang) dargestellt. Zudem wird die Datensatzgenerierung exemplarisch in **Abbildung 6.11 b)** und **c)** dargestellt. Dabei wird hierbei abschließend der Datensatz mit 100.000 Trainingsdaten verwendet. [Sch21]

Erste Versuchsdurchführungen unter Verwendung der Logitech C920 HD Webcam zeigen, dass die Genauigkeit der Positionserkennung des Inlets höher als die der Orientierungserkennung ist [Sch21]. Dies wird anhand der folgenden Untersuchungen genauer quantifiziert.

### 6.6.2 Anpassung des Versuchsplans

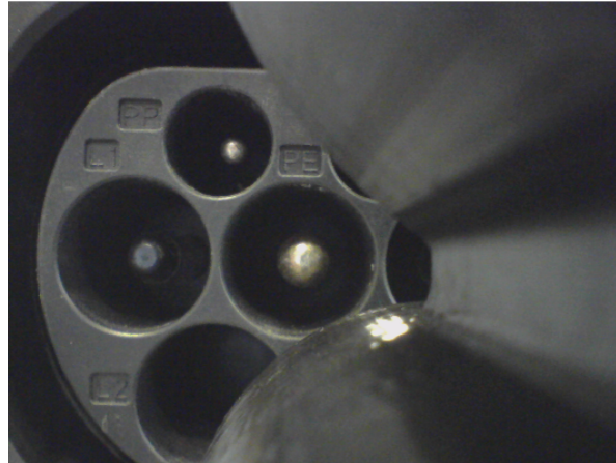
Das analoge Vorgehen der Genauigkeitsuntersuchung wird im Folgenden für die Inlet-Posenbestimmung mithilfe des trainierten neuronalen Netzwerks durchgeführt. Hierfür wird die selbe Kamera mit der Auflösung von 1600x1200 und der Kamerakalibrierung aus Abschnitt 6.2.2 verwendet. Nach [TTS<sup>+</sup>18b] wird empfohlen, das Eingangsbild auf eine Höhe von 400 Pixeln zu skalieren, damit das Objekt in vergleichbarer Größe wie in den Trainingsdateien zu sehen ist. Demnach wird auch hier in der Konfiguration ein Skalieren vorgenommen. Zudem wird aufgrund der geringeren Rate der Posenbestimmung (begrenzt durch Rechenleistung) lediglich alle zwei Sekunden eine Pose gespeichert. Die Untersuchung wird in zwei Teile unterteilt. Zunächst wird die Genauigkeitsuntersuchung für die Posenbestimmung bezüglich des gesamten Inlets durchgeführt. Im Anschluss wird validiert, in wie weit die Posenbestimmung durch das Trainingsset bezogen auf den AC-Anteil des Inlets aus näherer Entfernung verbessert werden kann. Anhand von Vorversuchen wird festgestellt, dass nicht der selbe Versuchsplan wie für die IR-LEDs und den AprilTag betrachtet werden kann. In **Abbildung 6.12** wird das Inlet in der Referenzdistanz  $^c Z_{I,ref} = 60$  mm dargestellt. Aus dieser Distanz wird das Inlet nicht erkannt. Aus diesem Grund wird der Versuchsplan angepasst. Wie bereits in Abschnitt 6.2.1 beschrieben, sind die Ergebnisse aller drei Genauigkeitsbetrachtungen nur qualitativ vergleichbar. Demnach lassen sich durch die Anpassung des Versuchsplans auch hier lediglich Vor- und Nachteile beziehungsweise Probleme identifizieren.



**Abbildung 6.11:** Erstes Erkennen und Erweiterung des neuronalen Netzwerks auf AC-Anteil [Sch21]

- a) Erste Untersuchungen mit Trainingsset bei einem Datensatz von 80.000
- b) Datensatzgenerierung für AC-Anteil mit random Movement
- c) Datensatzgenerierung für AC-Anteil mit orbital Movement





**Abbildung 6.12:** Bildaufnahme (RAW) für Inlet-Posenerkennung bei  ${}^cZ_{I,\text{ref}} = 60$  mm und  ${}^cX_{I,\text{ref}} = {}^cY_{I,\text{ref}} = 0$  mm und  $\theta_{X_{I,\text{ref}}} = 180^\circ$ ,  $\theta_{Y_{I,\text{ref}}} = \theta_{Z_{I,\text{ref}}} = 0^\circ$

In **Tabelle 6.8** wird der Versuchsplan dargestellt. Die Abstände in  ${}^cZ$ -Richtung werden beibehalten, wobei die Entfernungen  ${}^cZ_{I,\text{ref}} = 60$  mm und  ${}^cZ_{I,\text{ref}} = 85$  mm nicht weiter berücksichtigt werden. Der AC-Teil ist in einer Entfernung von  ${}^cZ_{I,\text{ref}} = 130$  mm zu erkennen und wird untersucht. Die Posenbestimmung anhand des gesamten Inlets wird im Bereich  ${}^cZ_{I,\text{ref}} \in \{250, 415, 580\}$  mm analysiert. Da das Sichtfeld erheblich eingeschränkt ist, wird die Position bei den Entfernungen  ${}^cZ_{I,\text{ref}} \in \{415, 580\}$  mm nicht variiert. Lediglich die Orientierung wird wie bei den Genauigkeitsuntersuchung zuvor in den gleichen Größenordnungen verändert. Insgesamt umfasst die Untersuchung für den AC-Teil 300 Posen und für die Posenbestimmung anhand des gesamten Inlets 225 Posen. Im Folgenden wird zunächst die Untersuchung für das gesamte Inlet betrachtet.

**Tabelle 6.8:** Bereiche für die Genauigkeitsuntersuchung der Inlet-Posenbestimmung mit DOPE

Sichtbar	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^cZ_{I,\text{ref}}$	${}^cX_{I,\text{ref}}$	${}^cY_{I,\text{ref}}$	${}^c\theta_{X_{I,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Y_{I,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Z_{I,\text{ref}}}$
AC	130	-30	0	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}
AC & Inlet	250	-60	-30	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}
AC & Inlet	415	-80	-30	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}
AC & Inlet	580	-80	-30	{-165/-172,5/180/172,5/165}	{-12,5/-7,5/0/7,5/12,5}	{-5/0/5}

### 6.6.3 DOPE - Inlet

#### Bewertungskriterium 1) - Inlet im Untersuchungsraum detektierbar?

In **Tabelle 6.9** werden die gemittelten Abweichungen  $\bar{\Delta}$  und Standardabweichungen  $\sigma$  für die Genauigkeitsuntersuchung der Inlet-Posenbestimmung mit DOPE aufgeführt. Es ist festzustellen, dass sowohl die Abweichungen als auch die Standardabweichungen für die Positions- und Orientierungsbestimmung um ein Vielfaches größer sind als bei der Genauigkeitsuntersuchung für die IR-LEDs und dem AprilTag. Positiv zu vermerken ist, dass bei allen 225 untersuchten Po-

sen das Inlet erkannt wird. In **Abbildung 6.13** wird die Posenbestimmung bei unterschiedlicher Entfernung dargestellt.

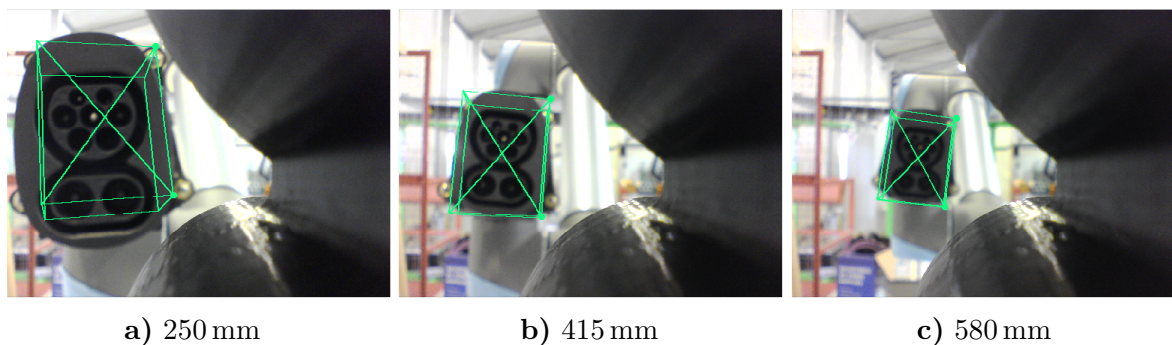
**Tabelle 6.9:** Gemittelte Abweichungen und Standardabweichungen für die Inlet-Posenbestimmung mit DOPE

${}^c Z_{I,ref}$	Translation in [mm]						Rotation in [°]						Anz.
	$\overline{\Delta X}$	$\sigma_X$	$\overline{\Delta Y}$	$\sigma_Y$	$\overline{\Delta Z}$	$\sigma_Z$	$\overline{\Delta \theta_X}$	$\sigma_{\theta_X}$	$\overline{\Delta \theta_Y}$	$\sigma_{\theta_Y}$	$\overline{\Delta \theta_Z}$	$\sigma_{\theta_Z}$	
250	-21,73	4,58	1,60	6,38	86,42	14,08	-5,57	9,92	10,93	9,35	0,95	14,08	75/75
415	-18,68	2,89	5,16	2,95	69,64	13,39	-1,23	8,71	9,68	9,30	-0,47	13,39	75/75
580	-17,38	3,20	5,11	3,71	71,38	20,29	-3,41	8,28	7,70	9,30	-0,12	20,29	75/75

In **Abbildung D.1** (siehe Anhang) werden die Abweichungen  $\overline{\Delta}$  und Standardabweichungen  $\sigma_{10}$  über die zehn aufgenommenen Posen pro untersuchter Pose dargestellt. Anhand der Daten ist zu erkennen, dass die Standardabweichungen  $\sigma_{10}$  vermehrte Ausreißer im Bereich  $0 < n \leq 75$  aufzeigen. Die Posenerkennung ist demnach in dem Bereich, in dem das Inlet am nächsten zur Kamera positioniert ist, am instabilsten und weist die größten Streuungen auf. Die vorliegenden Daten zeigen, dass mithilfe des hier verwendeten neuronalen Netzwerks in Kombination mit der Kamera und Kamerakalibrierung ein automatisches Einstecken nicht möglich ist. Dafür sind sowohl die Abweichungen als auch die Standardabweichungen unabhängig von der Entfernung zu hoch.

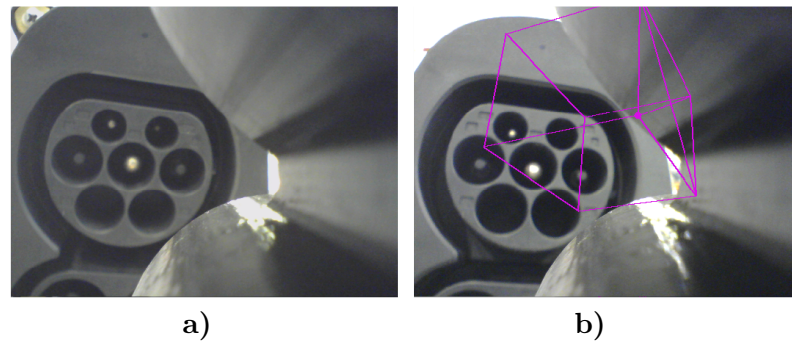
### Bewertungskriterium 2) - Erfolgreiche PTP-Vorpositionierung möglich?

Analog zu den Untersuchungen mit den IR-LEDs in Abschnitt 6.4 wird ebenfalls für die Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit DOPE geprüft, ob eine PTP-Vorpositionierung möglich ist. In **Abbildung 6.14** wird das Kamera-Sichtfeld in grau bis zu einer Entfernung von 130 mm dargestellt. In blau wird der Zielpunkt für die PTP-Vorpositionierung dargestellt, während in rot die Punkte im Raum abgebildet werden, die anhand der Posenbestimmung mit DOPE als Zielpunkt berechnet werden. Es wird deutlich, dass die Punkte größtenteils außerhalb des Sichtfelds liegen und somit als unzureichend genau zu bewerten sind. Ebenfalls wird die Entfernung ausschließlich als zu weit berechnet, was zur Folge hat, dass der Roboterarm deutlich zu nah an das Inlet heranzufahren würde. Dabei besteht die Gefahr des Kontakts zwischen Stecker und Inlet und somit ebenfalls des Sachschadens. Das Kriterium der möglichen erfolgreichen PTP-Vorpositionierung mithilfe der Inlet-Posenbestimmung mit Dope ist als unerfüllt zu bewerten.



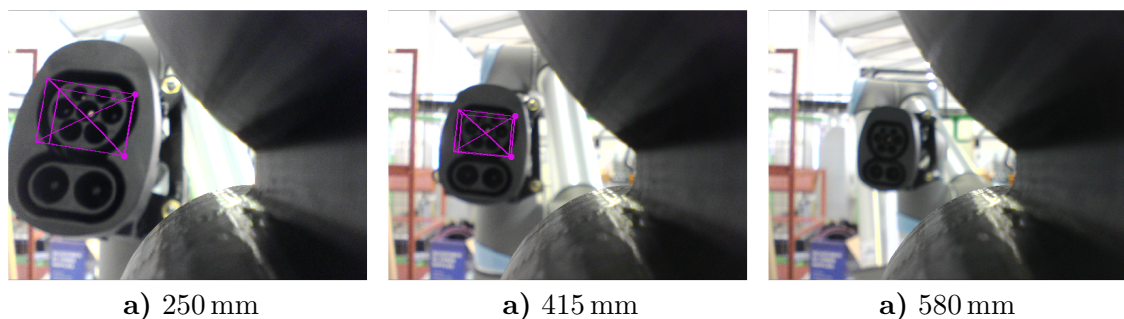
**Abbildung 6.13:** Inlet-Posenbestimmung mit DOPE bei unterschiedlicher Entfernung  ${}^c Z_{I,ref}$





**Abbildung 6.15:** Inlet-Posenerkennung bezogen auf den AC-Teil bei  ${}^cZ_{I,ref} = 130$  mm  
 a) nicht erkannt, b) fehlerhaft erkannt

Für die Referenzentfernungen  ${}^cZ_{I,ref} = 250$  mm und  ${}^cZ_{I,ref} = 415$  mm sinken die Standardabweichungen gegenüber den Ergebnissen bei der Distanz von  ${}^cZ_{I,ref} = 130$  mm. Dies wird anhand der Daten in **Abbildung D.2** (siehe Anhang) ebenfalls deutlich. In **Abbildung 6.16** werden exemplarisch die erkannten Inlets anhand des AC-Teils bei der jeweiligen Entfernung darstellt. Es ist zu erkennen, dass das Inlet bei den Entfernungen von  ${}^cZ_{I,ref} = 250$  mm und  ${}^cZ_{I,ref} = 415$  mm detektiert werden kann, während es bei einer Entfernung  ${}^cZ_{I,ref} = 580$  mm nicht möglich ist, eine Pose zu bestimmen. Das Kriterium der vollständigen Erkennung im Untersuchungsraum wird demnach allein mit dem AC-Teil nicht erfüllt. In Kombination mit der Erkennung des gesamten Inlets kann die Entfernung der erfolgreichen Erkennung und Posenbestimmung mittels neuronalem Netzwerk um die Referenzentfernung von  ${}^cZ_{I,ref} = 580$  mm erweitert werden.



**Abbildung 6.16:** Inlet-Posenerkennung bezogen auf den AC-Teil bei unterschiedlicher Entfernung  ${}^cZ_{I,ref}$

### **Bewertungskriterium 2) - Erfolgreiche PTP-Vorpositionierung möglich?**

Da der AC-Teil nicht im gesamten Bereich Referenzbereich  ${}^cZ_{I,ref} \geq 250$  mm detektierbar ist, wird auf eine Untersuchung der möglichen PTP-Vorpositionierung verzichtet.

### **Bewertungskriterium 3) - Einstecken möglich?**

Aufgrund der um ein Vielfaches höheren Abweichung in Bezug zu den Werten der Fangraum-analyse aus Tabelle 2.2 wird im Rahmen dieser Untersuchungen auf kein mögliches Einstecken geschlossen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht evaluiert, wie die Detektion des Inlets und die Bestimmung dessen Pose mithilfe eines neuronalen Netzwerks optimiert werden kann. Eine mögliche Quelle der hier zu findenden absoluten Abweichungen in der Posenbestimmung ist das Vorliegen der unterschiedlichen Blickwinkel der Kameras in der virtuellen und der realen Umgebung. Aufgrund des hier verwendeten Aufbaus mit der Kamera im Stecker und der daraus resultierenden Abschattung in Kombination mit der geringen fokussierten Entfernung wird die Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit dem hier trainierten neuronalen Netzwerk nicht weiter betrachtet.

Diese Aufführung zeigt die Komplexität und erhöhte Schwierigkeit der Posenbestimmung im Vergleich zum Verwenden eines AprilTags als passiven Marker oder dem von IR-LEDs als aktive Marker. Andererseits bietet diese Strategie die Möglichkeit, das Inlet ohne zusätzliche Modifikationen zu erkennen. Um die Ergebnisse einzuordnen, ist hierbei aufzuführen, dass, wie in Abschnitt 2.3 bereits beschrieben, eine Erkennung des Inlets unter der Zuhilfenahme eines neuronalen Netzwerks bereits geeignete Ergebnisse für das automatische Stecken liefern kann. Der Hersteller *ROCSYS BV* von automatischen induktiven Ladesystemen verwendet nach [BV22] ebenfalls ein neuronales Netzwerk für die Inleterkennung, welches trainiert wird, um bei jeglichen Wetterbedingungen wie Regen, Schnee, Nebel oder starker Sonneneinstrahlung eine ausreichende Posenbestimmung für das automatische Stecken zu erreichen. Eine wissenschaftliche Veröffentlichung bezüglich der Genauigkeit oder ähnlichem ist diesbezüglich nicht bekannt. Ebenfalls wird im Abschnitt 2.3 aufgeführt, dass nach [QLL<sup>+</sup>21] ausreichende Genauigkeiten bei der Inlet-Posenbestimmung ohne zusätzliche Marker und ohne Inlet-Modifizierung erreicht werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit IR-LEDs als aktive Marker vollständig untersucht und evaluiert, sodass die Strategien mit passiven und ohne zusätzliche Marker am Inlet nicht weiter betrachtet werden.

## 6.7 Ergebnisdiskussion

Die Auswertung der durchgeführten Versuche zeigt, dass das Verwenden von IR-LEDs als aktive Marker am Inlet als eine geeignete Strategie zur Posenbestimmung des Inlets zu bewerten ist. Die Genauigkeitsuntersuchung zeigt, dass bei der Referenzentfernung von 60 mm zwischen Kamera und Markern eine ausreichende Genauigkeit für das Einstecken erreicht werden kann und die Streuung der Ergebnisse im Bereich der Positionsbestimmung mit maximal 0,52 mm in einem ausreichend geringen Bereich liegt. Die Bestimmung der Orientierung weist bei gleicher Referenzentfernung eine höhere mittlere Abweichung und auch eine höhere Streuung auf. Die Ergebnisse zeigen, bezogen auf die Fangraumanalyse in Tabelle 2.2 und die hier entwickelte elastische Ausgleichseinheit eine ausreichende Genauigkeit. Wie zuvor beschrieben, ist bei der Betrachtung der absoluten Genauigkeit zu berücksichtigen, dass Fehler durch den Versuchsaufbau, die Absolutgenauigkeit des UR10-Roboters, die Referenzierung zwischen Stecker und Inlet und zu guter Letzt die Kamerakalibrierung einen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben.

Des Weiteren belegen die Untersuchungsergebnisse, dass die IR-LEDs im gesamten Untersuchungsbereich erkannt werden können und erfolgreich eine Pose bestimmt wird. Sowohl die gemittelte Abweichung als auch die Streuung der Posenbestimmung nimmt mit zunehmender

Distanz und zunehmendem Sichtfeld zu, was zu Problemen beim ersten Suchen der Marker im Prozess führen kann. Durch eine fehlerhafte Posenbestimmung aus der Entfernung erfolgt eine abweichende PTP-Vorpositionierung, die darauffolgend zu einem Sichtverlust der Marker führen kann. Dies ist anhand der Versuche in Kapitel 7 weiter zu betrachten.

Für die Untersuchung der zwei weiteren Strategien wird eine vom Typ her baugleiche Endoskopkamera an derselben Position im Stecker verwendet. Durch das Verzichten auf den IR-Passfilter wird eine unabhängige Kalibrierung durchgeführt. Aufgrund der zwei von einander abweichenden Versuchsaufbauten sind die Ergebnisse lediglich qualitativ vergleichbar. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass bei keiner der beiden Strategien das Inlet und dessen Pose im gesamten Untersuchungsbereich erkannt und bestimmt werden kann. Zudem zeigt sich beim AprilTag, dass die Erkennung bei einer Entfernung von 130 mm zudem von der Inletneigung abhängig ist. Durch die Deckenleuchten wird der AprilTag bei einem nach oben geneigten Inlet angestrahlt und kann nicht erkannt werden. Die Abhängigkeit vom Umgebungslicht ist ein wesentlicher Nachteil gegenüber den IR-LEDs, bei denen die Erkennung durch den vorgeschalteten IR-Passfilter möglichst unabhängig von Umgebungslicht ist. Die Ergebnisse der Untersuchungen des neuronalen Netzwerks liefern keine ausreichenden Genauigkeiten und belegen, dass das hier trainierte Netzwerk in Kombination mit der hier verwendeten Kamera und dessen Position im Stecker ungeeignet für den Einsatz in einem automatischen konduktiven Ladesystem ist.

Im folgenden Abschnitt wird deshalb das gesamte System mit den IR-LEDs als Strategie der Inlet-Posenbestimmung evaluiert und anhand von Steckversuchen analysiert. Die beiden alternativen Strategien werden nicht weiter betrachtet.

## 7 Evaluierung und Analyse des Steckverhaltens mit aktiven Markern

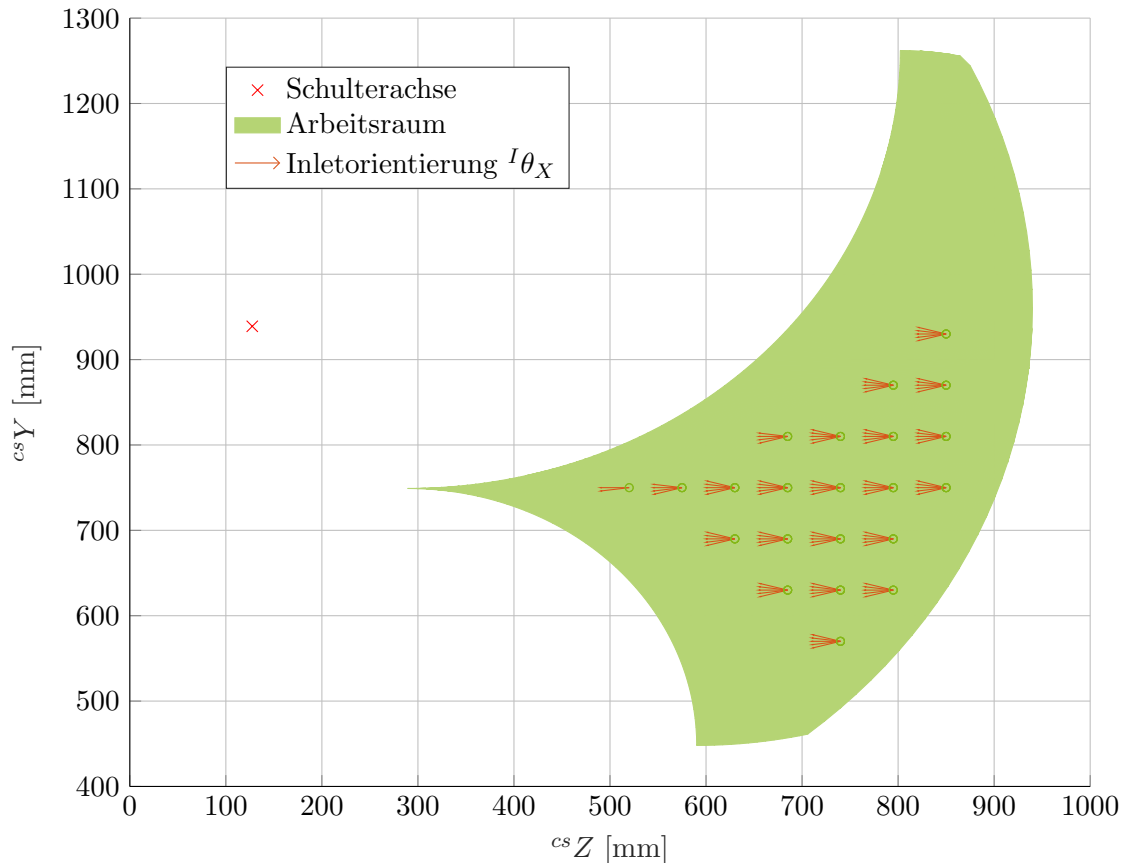
In diesem Kapitel wird der entwickelte Laderoboter und die auf diesen bezogene Ladeprozedur anhand verschiedener Versuchsreihen evaluiert. Hierfür wird zunächst in **Abschnitt 7.1** ein Versuchsplan und ein zugehöriger Versuchsaufbau für die Steckversuche im möglichen Arbeitsraum entwickelt. Da die Kinematik des Roboterarms lediglich einen rotatorischen aktiv steuerbaren Freiheitsgrad zu Verfügung hat, wird im ersten Schritt untersucht, wie das Steckverhalten ohne einen notwendigen elastischen Ausgleich bei einer theoretisch idealen Positionierung des Fahrzeugs ist. Dabei wird das automatische Stecken auf Basis des Erfolgs, der Dauer des automatischen Steckvorgangs und der wirkenden Kräfte und Momente auf das Inlet und den Stecker untersucht. Im darauffolgenden Schritt werden in **Abschnitt 7.2** Winkelabweichungen, die nicht aktiv ausgeregelt werden können, untersucht und die Steckbarkeit und Wiederholgenauigkeit evaluiert. Auch hier wird die Erfolgsquote des Einsteckens ermittelt, mögliche Probleme und Grenzen des System analysiert und die wirkenden Kräfte und Momente untersucht. Abschließend werden die Ergebnisse im **Abschnitt 7.3** diskutiert.

### 7.1 Steckversuche im Arbeitsraum

In diesem Abschnitt wird zunächst der Arbeitsraum des Roboterarms beschrieben und ein Versuchsplan anhand der Vorüberlegungen aus Abschnitt 6.1 aufgestellt. Dieser dient zur Untersuchung des Steckverhaltens und der Wiederholgenauigkeit des Systems. Anschließend werden die Ergebnisse der Versuchsdurchführung beschrieben und hinsichtlich Erfolgsquote, Dauer des Steckvorgangs und der wirkenden Kräfte und Momente analysiert.

#### 7.1.1 Versuchsplan

In Abschnitt 6.1 werden anhand der Abbildung 6.1, die den Arbeitsraum des Ladesystems in der  ${}^{cs}YZ$ -Ebene darstellt, verschiedene Positionen im Arbeitsraum definiert. Diese werden mittels Rasterung im Arbeitsraum festgelegt. An diese Positionen in der  ${}^{cs}YZ$ -Ebene wird das Inlet positioniert und es wird untersucht, ob das Inlet automatisch gesteckt werden kann. In Abbildung 7.1 werden diese Positionen aufgegriffen und um verschiedene Inletorientierungen  ${}^I\theta_X$  bei den jeweiligen Steckpositionen erweitert. Der Winkel  ${}^I\theta_X$  des Inlets wird in einem Bereich von  $-15^\circ \leq {}^I\theta_X \leq 15^\circ$  in Schritten von  $7,5^\circ$  variiert. Die Winkeländerungen  ${}^I\theta_Y$  und  ${}^I\theta_Z$  des Inlets werden im ersten Schritt nicht mitbetrachtet. Diese Faktoren werden darauffolgend in Abschnitt 7.2 mitberücksichtigt. Die Bewegung in  ${}^{cs}X$ -Richtung wird vollständig vernachlässigt, da angenommen wird, dass diese keinen Einfluss auf den zweidimensionalen Arbeitsbereich und das Steckverhalten hat. Jede Pose des Inlets wird fünf Mal hintereinander versucht zu stecken.



**Abbildung 7.1:** Arbeitsraum des Roboterarms in  ${}^{cs}YZ$ -Ebene und die Positionen der Steckversuche im Ladesystem Koordinatensystem ( ${}^{cs}$ ) inklusive Orientierung  ${}^I\theta_X$  des Inlets

Dabei wird der Prozess jedes Mal unabhängig voneinander erneut von Beginn an (Roboter in Home-Position) gestartet.

Zur Evaluierung des entwickelten Laderoboters und der zuvor vorgestellten Einsteckprozedur werden die folgenden Kriterien aus **Tabelle 7.1** untersucht. Diese umfassen unter anderem das erfolgreiche Detektieren der IR-LEDs bei unterschiedlichen Positionen und Orientierungen des Inlets (**Krit. 1**). Hiermit wird untersucht, ob das Detektieren bei unterschiedlichen Entfernungen und Orientierungen mit anschließender Posenbestimmung erfolgreich ist. Der Roboterarm verfährt nach erfolgreicher Detektion in die Vorpositionierung 130 mm vor dem Inlet. Werden nach Erreichen dieser Position die LEDs weiter erkannt, ist das Detektieren und die zugehörige Posenbestimmung ausreichend genau. Das erste Kriterium wurde in Abschnitt 6.4 bereits untersucht und kann im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen als erfüllt bestimmt werden. Da bei den bisherigen Versuchen jedoch nicht der gesamte Arbeitsraum betrachtet wird, ist dieses Kriterium hier weiterhin zu untersuchen. Der Prozess des Visual Servoings wird ebenfalls analysiert (**Krit. 2**), indem das Erreichen des Abbruchkriteriums aus Abschnitt 5.2.4 untersucht wird. Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 erläutert, ist der Sichtbereich der Kamera durch den AC- und DC-Anteil des Steckers zu  $\approx 49\%$  eingeschränkt. Somit ist zu untersuchen, ob eine Regelung auch bei Orientierungen  ${}^I\theta_X \neq 0$  erfolgreich umgesetzt wird. Dabei werden die in zwei unterteilte Visual Servoings hier zusammen betrachtet. Als weiteres Untersuchungskriterium ist



das erfolgreiche Einstecken aufzuführen (**Krit. 3**). Hierbei wird das Auslösen des Mikroschalters im Stecker betrachtet und bewertet, ob der Stecker vollständig eingesteckt wird. Verkantet sich der Stecker während des Einsteckvorgangs und der Mikroschalter kann nicht auslösen, ist der Steckversuch als ungültig zu werten. Die Untersuchung der Wiederholgenauigkeit ist ebenfalls durchzuführen (**Krit. 4**). Hierbei werden alle Positionen fünf mal wiederholt gesteckt. Bei allen Versuchen wird die Dauer des Einsteckvorgangs (**Krit. 5**) gemessen. Dabei bezieht sich die Zeitspanne vom Starten der Prozedur bis zum Auslösen des Mikroschalters beziehungsweise dem Peak der Einsteckkraft in  ${}^cZ$ -Richtung. Die Steckkräfte (**Krit. 6**) und die wirkenden Momente (**Krit. 7**) werden am Inlet gemessen, um zu analysieren, ob und wie sich die Werte bei unterschiedlichen Positionen und Orientierungen des Inlets relativ zum Laderoboter ändern. Für die Untersuchung des Steckverhaltens wird im Folgenden die Identifikationsprüfung aufgrund des zu hohen Zeitbedarfs deaktiviert und nicht mitberücksichtigt.

**Tabelle 7.1:** Untersuchungskriterien zur Bewertung des Laderoboters und der Ladeprozedur mit aktiven Markern

Pos.	Untersuchungskriterium	Bewertungsgröße
1	Erfolgr. Detektieren der LEDs	Erkennen der LEDs (Posenberechnung) + erfolgreiche PTP-Bewegung
2	Erfolgr. Visual Servoing	Erreichen des Abbruchkriteriums zum Einstecken
3	Erfolgr. Einstecken	Mikroschalter ausgelöst
4	Wiederholgenauigkeit	$n$ -Versuche mit erfolgreichem Krit. 3
5	Dauer des Steckvorgangs	Zeit vom Start bis zum eingesteckten Stecker
6	Steckkräfte	$F_X, F_Y, F_Z$
7	Wirk. Momente auf Inlet	$M_X, M_Y, M_Z$

### 7.1.2 Versuchsaufbau

Für die Versuchsdurchführung wird eine Inlethalterung benötigt, die es ermöglicht, das Inlet in den zu untersuchenden Positionen und Orientierungen wiederholt auszurichten. Hierfür wird das in **Abbildung 7.2** dargestellte Gestell entwickelt und aufgebaut. Dieses kann wie in **a**) abgebildet translatorisch vor dem Laderoboter auf einer auf dem Boden ausgerichteten Skalierung in  ${}^{cs}X$ - und  ${}^{cs}Z$ -Richtung mit einer Genauigkeit von 1 mm positioniert werden. Für die Höheneinstellung kann das Inlet über eine Linearführung (siehe **b**)) in 20 mm Schritten über Rastbolzen und eine separate Hebefeststellung verstellt werden. Die Orientierung bezogen auf das Koordinatensystem des Inlets (siehe Abb. 4.7) wird über eine kardanische Aufhängung mit jeder Drehachse in  $2,5^\circ$ -Schritten eingestellt (siehe **c**)). Das Einstellen erfolgt über zwei versetzte Rastbolzen, die auf einer um  $2,5^\circ$  versetzten Kreisbahn in  $5^\circ$ -Schritten einrasten. Dabei ist wichtig zu betonen, dass die Reihenfolge der Drehungen mit der um die  ${}^I Z$ -Achse startet. Anschließend erfolgt die Rotation um die mitgedrehte  ${}^I X'$ -Achse und die abschließende Drehung um die  ${}^I Y''$ -Achse. Diese Abhängigkeit ist für die ersten Steckversuche im Arbeitsraum unerheblich, da lediglich  ${}^I \theta_X$  variiert wird. Bei der Durchführung der Steckversuche in Abschnitt 7.2 ist diese Abhängigkeit mitzubedenken. [Mü21]

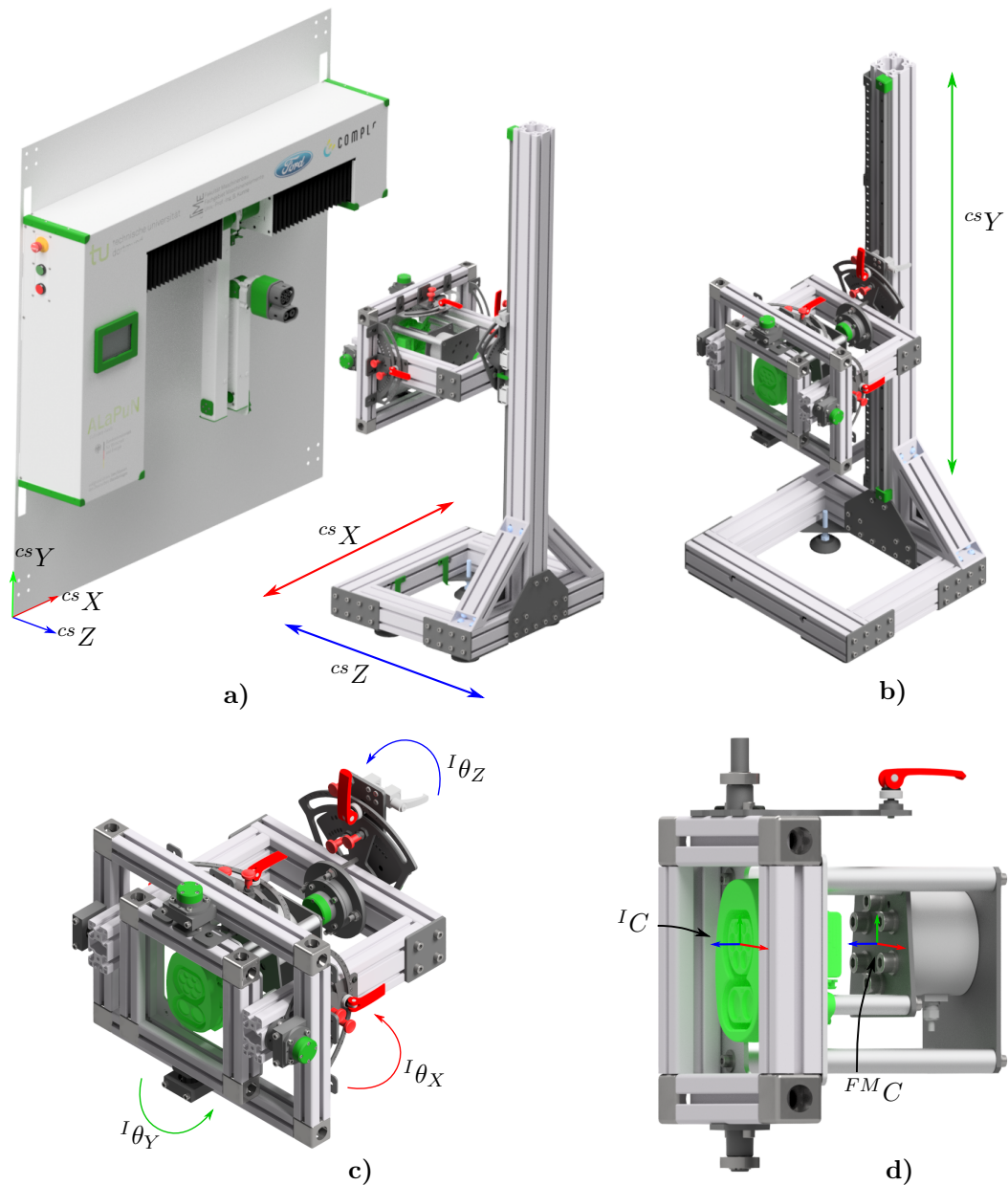


Abbildung 7.2: Inlethalterung für Versuchsdurchführung

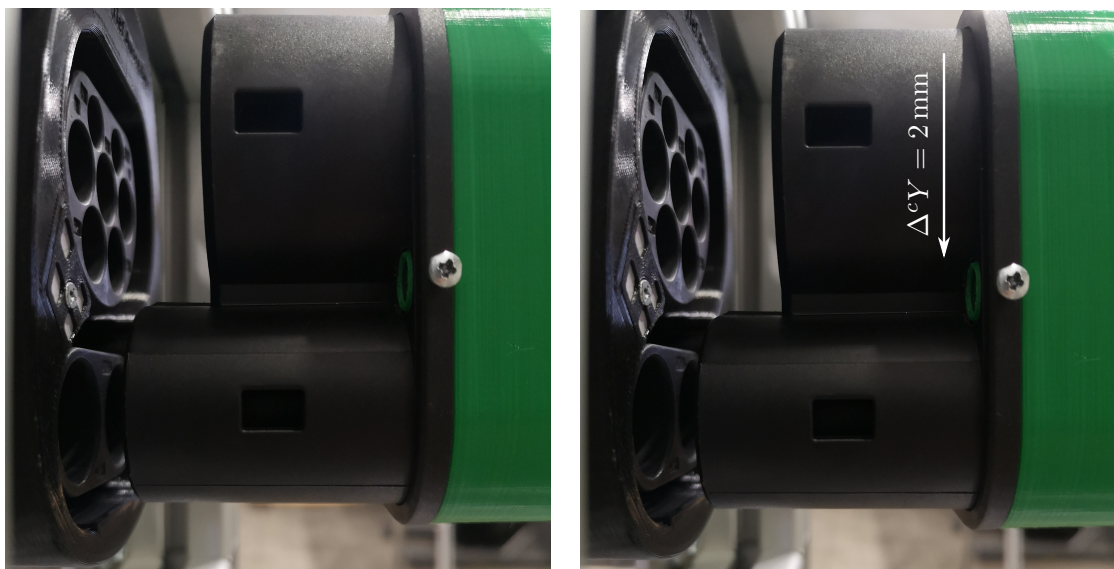
Die Versuche werden unter Laborbedingungen durchgeführt. Dabei beträgt die Temperatur im Labor  $21^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Für die Analyse der auf das Inlet wirkenden Kräfte und Momente wird eine Kraftmessdose zwischen Aufhängung und Inlet installiert. Dies wird in Abb. 7.2 d) dargestellt. Die Koordinatensysteme für das Inlet ( $I$ ) und die Messdose ( $FM$ ) sind gleich ausgerichtet. Die Sechs-Achsen-Messdose ist die K6D68 1 kN/20 Nm von der *ME Meßsysteme GmbH*.

### 7.1.3 Vorversuche

Vor der Versuchsdurchführung des vorgestellten Versuchsplans werden einzelne Vorversuche durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Ladeprozedur anhand einzelner Versuche erfolgreich abläuft oder ob Anpassungen vorzunehmen sind. Hierfür wird zunächst ein zentraler Versuch im Versuchsplan ( $^{cs}Y = 750 \text{ mm}$ ,  $^{cs}Z = 740 \text{ mm}$  und  $^I\theta_X = 0^{\circ}$ ) versucht zu stecken. Wiederholt

positioniert sich der Stecker während des VS2 um einen geringen Versatz zu hoch gegenüber dem Inlet. In **Abbildung 7.3 a)** wird dargestellt, dass der Stecker vor dem Einstecken zu hoch positioniert ist. Dies wird auf eine fehlerhafte Kamerakalibrierung oder Ausrichtung der Kamera zum Stecker zurückgeführt. Eine winklige Montage der Kamera ruft eine Abweichung zwischen optischer Detektion der IR-LEDs und der relativen Pose von Stecker zu Inlet hervor. In diesem Fall wird diese Abweichung in Form einer konstanten Korrektur im Kamerakoordinatensystem von  $\Delta^cY = 2\text{ mm}$  kompensiert. Der Wert ist empirisch anhand mehrerer Versuche bestimmt. Diese nachträgliche Korrektur wird in **Abbildung 7.3 b)** dargestellt. Analog wird eine Höhenkorrektur für die Zielposition der PTP-Vorpositionierung von 50 mm in  $\Delta^cY$  durchgeführt.

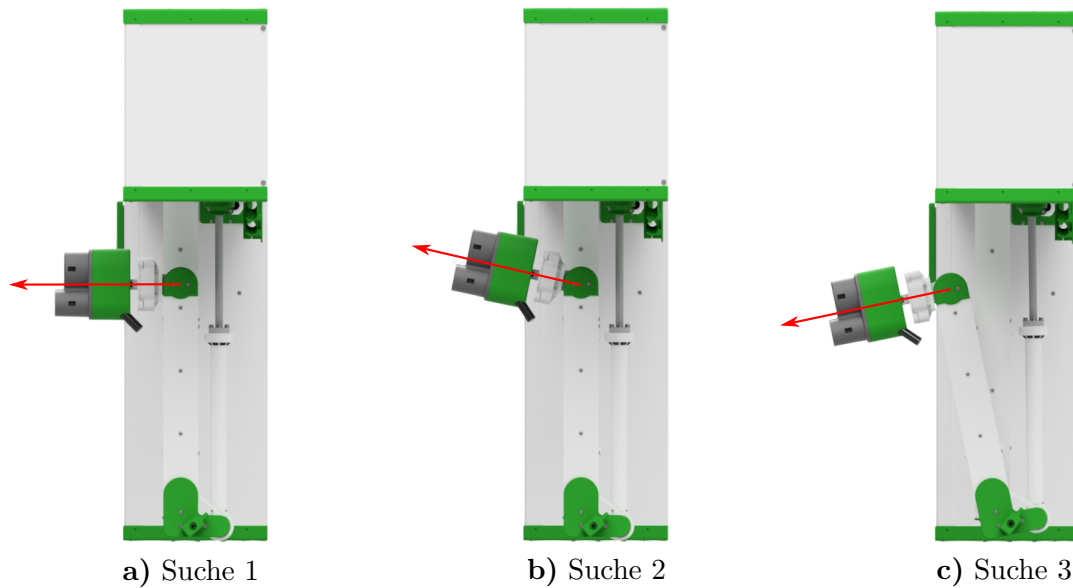
Als weiterer Punkt wird festgestellt, dass die Posen des Versuchsplans in der Höhe von  ${}^{cs}Y = 930\text{ mm}$  und  ${}^{cs}Y = 570\text{ mm}$  zu Beginn des automatischen Steckvorgangs nicht detektiert werden können. Die IR-LEDs sind vollständig oder zum Teil außerhalb des Bildes. Aus diesem Grund wird der Suchprozess erweitert, indem nach einer erfolglosen Suche in  ${}^{cs}X$ -Richtung zwei Suchvorgänge hinzugefügt werden, bei denen sich das Sichtfeld ändert. In **Abbildung 7.4** werden die drei Posen für den Suchprozess dargestellt. In a) ist die Orientierung des Steckers und somit auch der Kamera dargestellt, mit der der Großteil der Posen im Versuchsplan detektiert werden kann. Die zweite Orientierung (b)) des Steckers beinhaltet das Neigen des Steckers um  $0,2\text{ rad} \approx 11,5^\circ$  nach oben. Somit können Posen im Bereich  ${}^{cs}Y > 870\text{ mm}$  im Versuchsplan detektiert werden. Die dritte Orientierung in c) beabsichtigt analog das Suchen der IR-LEDs in kleineren Höhen ( ${}^{cs}Y < 630\text{ mm}$ ). Dabei ist das Bewegen des Unterarms unumgänglich, da der Stecker in der Anfangsposition nicht nach unten geneigt werden kann. Demnach wird der Unterarm ebenfalls um die  $11,5^\circ$  ausgefahren, damit der Stecker nach unten geneigt ist. Das Suchen erfolgt in  ${}^{cs}X$ -Richtung nacheinander. Somit ist zu erwarten, dass Posen am Rand des Versuchsplans mehr Zeit für die Detektion der IR-LEDs und somit auch mehr Zeit für den automatischen Steckvorgang benötigen.



a) Fehlerhafte Positionierung

b) Korrigierte Höhe nach dem VS2

**Abbildung 7.3:** Fehlerhafte Positionierung nach dem VS2 und der konstante Offset von  ${}^cY = 2\text{ mm}$  nach dem VS2



**Abbildung 7.4:** Verschiedene Suchpositionen des Laderoboters, um das Sichtfeld zu vergrößern

Mit Hilfe dieser Anpassungen an die in Kapitel 5.2 vorgestellte Ladeprozedur werden die Versuche durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt und analysiert.

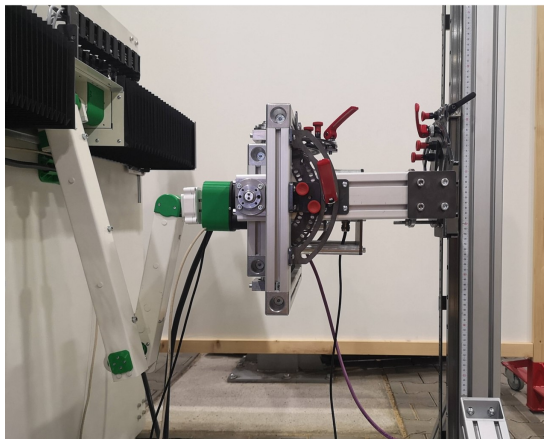
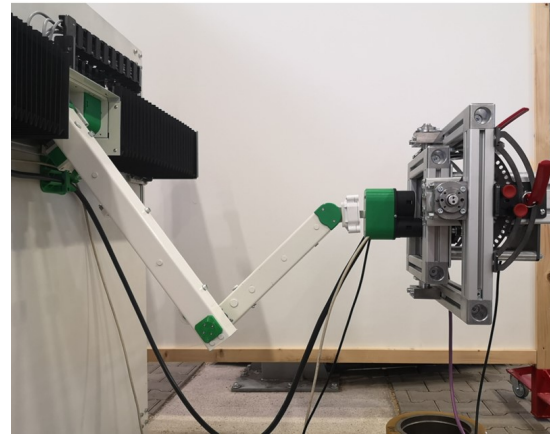
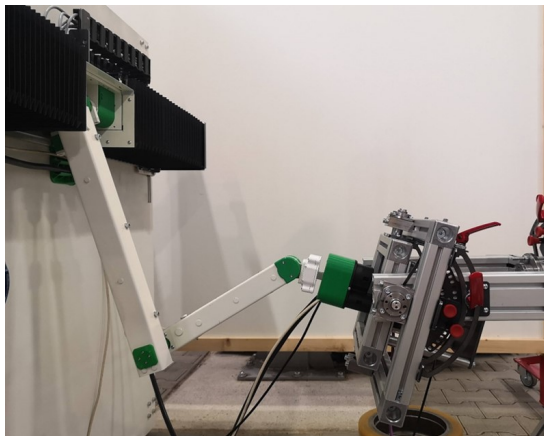
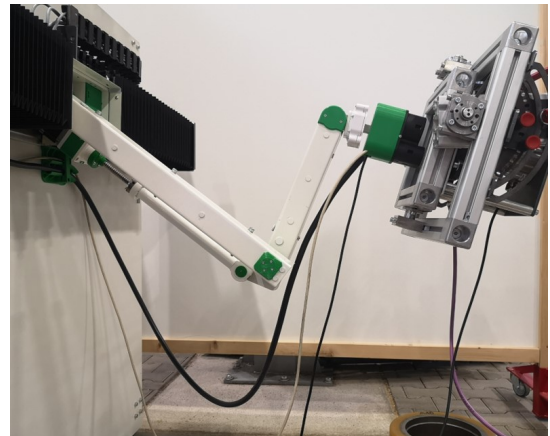
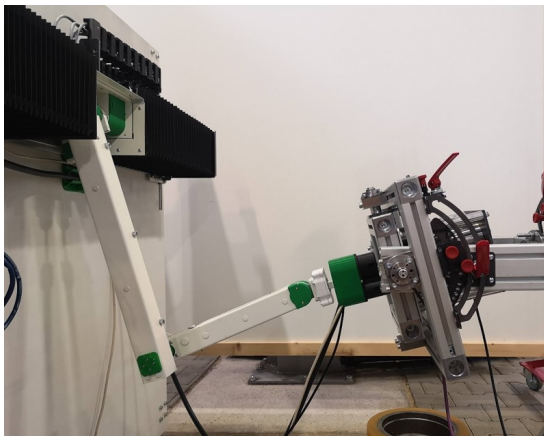
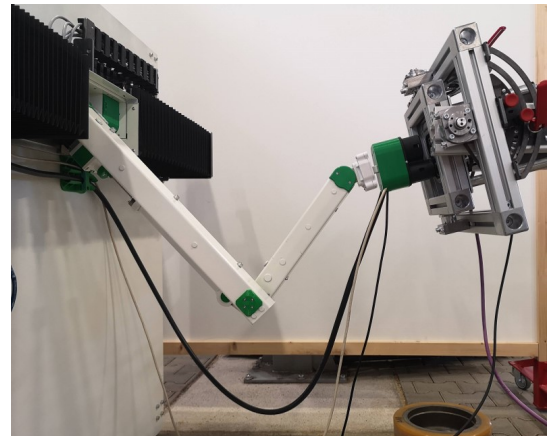
#### 7.1.4 Versuchsergebnisse

Für die Versuchsdurchführung werden die Posen nacheinander eingestellt und es wird fünf Mal hintereinander eingesteckt. Die Ergebnisse bezüglich eines erfolgreichen Einsteckvorgangs - eingesteckt und ausgelöster Mikroschalter - werden tabellarisch in **Tabelle 7.2** dargestellt. Insgesamt umfasst der Versuchsplan 105 verschiedene Posen und einen Gesamtumfang an Steckversuchen von 525 Wiederholungen. Davon werden 491 Steckversuche erfolgreich eingesteckt. Dies ergibt eine Erfolgsquote von insgesamt 93,5%.

Das erfolgreiche Einstecken umfasst das erfolgreiche Detektieren der LEDs zu Beginn der Prozedur und eine ausreichend genaue Posenbestimmung für die PTP-Vorpositionierung (Krit. 1), das erfolgreiche Ausführen des Visual Servoings, ohne die Markierungen zu verlieren (Krit. 2) und das erfolgreiche Einstecken in das Inlet bis der Mikroschalter auslöst (Krit. 3). Alle diese Kriterien werden im zentralen Bereich des untersuchten Arbeitsraums erfüllt. In **Abbildung 7.5** werden sechs verschiedene untersuchte Posen dargestellt, die wiederholt erfolgreich eingesteckt werden können. In **a)** und **b)** ist zu erkennen, dass bei einem Neigungswinkel  ${}^I\theta_X = 0^\circ$  sowohl bei einem nahen Abstand von 520 mm als auch bei einer Entfernung von bis zu 850 mm von der Wand sich der Laderoboter im richtigen Winkel vor dem Inlet positioniert. Dabei wird mit einer Erfolgsquote von 100% bei zehn Wiederholungen eingesteckt.

**Tabelle 7.2:** Steckversuche im Arbeitsraum mit variablem Steckwinkel  ${}^I\theta_X$  und konstanten Inletwinkeln für  ${}^I\theta_Y = {}^I\theta_Z = 0^\circ$   
 (Farbliche Hinterlegung transparent abgestuft nach erfolgreichen Einsteckversuchen)

${}^{cs}Z$ in [mm] \ ${}^{cs}Y$ in [mm]	${}^I\theta_X$	520	575	630	685	740	795	850
930	$-15^\circ$							0/5
	$-7,5^\circ$							5/5
	$0^\circ$	\	\	\	\	\	\	4/5
	$7,5^\circ$							5/5
	$15^\circ$							4/5
870	$-15^\circ$						5/5	5/5
	$-7,5^\circ$						5/5	5/5
	$0^\circ$	\	\	\	\	\	5/5	5/5
	$7,5^\circ$						5/5	5/5
	$15^\circ$						5/5	5/5
810	$-15^\circ$					5/5	5/5	5/5
	$-7,5^\circ$				4/5	5/5	5/5	5/5
	$0^\circ$	\	\	\	5/5	5/5	5/5	5/5
	$7,5^\circ$				5/5	5/5	5/5	5/5
	$15^\circ$				5/5	5/5	5/5	5/5
750	$-15^\circ$			0/5	5/5	5/5	5/5	5/5
	$-7,5^\circ$		5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
	$0^\circ$	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
	$7,5^\circ$	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
	$15^\circ$		5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
690	$-15^\circ$			5/5	5/5	5/5	5/5	
	$-7,5^\circ$			5/5	5/5	5/5	5/5	
	$0^\circ$	\	\	5/5	5/5	5/5	5/5	\
	$7,5^\circ$			5/5	5/5	5/5	5/5	
	$15^\circ$			5/5	5/5	5/5	5/5	
630	$-15^\circ$				5/5	5/5	5/5	
	$-7,5^\circ$				5/5	5/5	5/5	
	$0^\circ$	\	\	\	5/5	5/5	5/5	\
	$7,5^\circ$				5/5	5/5	5/5	
	$15^\circ$				5/5	5/5	0/5	
570	$-15^\circ$					3/5		
	$-7,5^\circ$					2/5		
	$0^\circ$	\	\	\	\	4/5	\	\
	$7,5^\circ$					0/5		
	$15^\circ$					0/5		

a)  ${}^{cs}Y = 750, {}^{cs}Z = 520, {}^I\theta_X = 0^\circ$ b)  ${}^{cs}Y = 750, {}^{cs}Z = 850, {}^I\theta_X = 0^\circ$ c)  ${}^{cs}Y = 570, {}^{cs}Z = 740, {}^I\theta_X = -15^\circ$ d)  ${}^{cs}Y = 870, {}^{cs}Z = 850, {}^I\theta_X = -15^\circ$ e)  ${}^{cs}Y = 630, {}^{cs}Z = 740, {}^I\theta_X = 15^\circ$ f)  ${}^{cs}Y = 870, {}^{cs}Z = 850, {}^I\theta_X = 15^\circ$ 

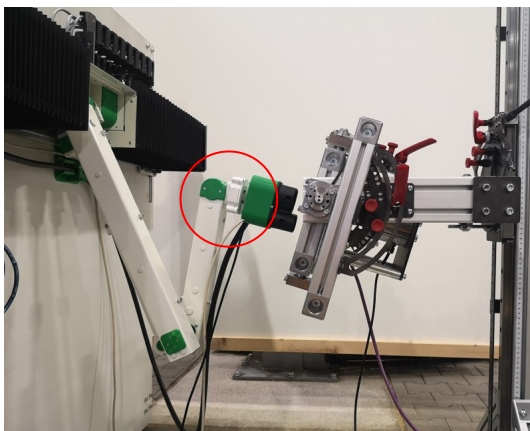
**Abbildung 7.5:** Steckversuche im Arbeitsraum - Positionieren vor dem Inlet während des VS2

Der Bereich in einer Höhe von  ${}^{cs}Y = 750$  mm ist mit einer untersuchten Länge von  $\Delta{}^{cs}Z = 330$  mm am längsten. Dies ist bedingt durch die Kinematik des Laderoboters und ist wie in Tabelle 4.1 aufgeführt die ideale Steckhöhe des Laderoboters. Ist das Inlet nicht geneigt ( ${}^I\theta_X = 0^\circ$ ) kann im gesamten Bereich wiederholt erfolgreich eingesteckt werden. Es wird aber auch deutlich, dass bei einem geneigten Inlet vor allem bei nahen Entfernungen die nach oben geneigten Inlets ( ${}^I\theta_X < 0^\circ$ ) nicht mehr im Arbeitsraum liegen und nicht gesteckt werden können. Dies ist ein Nachteil der Kinematik, da es bei kurzen Entfernungen in einer nur sehr geringen Höhendifferenz

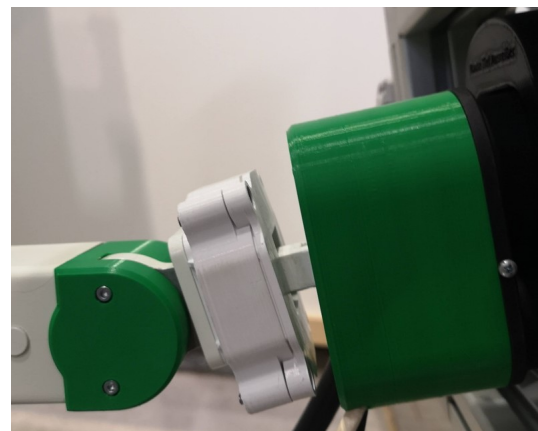
regelbar ist. Der zu erreichende Höhenunterschied von idealerweise  $\Delta^{cs}Y = \pm 150$  mm ist nur lokal bei Wandentfernungen von  ${}^{cs}Z \geq 740$  mm möglich.

In den **Abbildungen 7.5 c) bis f)** werden Positionen am Rand des untersuchten Arbeitsbereiches mit Orientierungen von  $-15^\circ \leq {}^I\theta_X \leq 15^\circ$  dargestellt. Es wird deutlich, dass sowohl das erste als auch das zweite Visual Servoing auf die Inletneigung reagieren und die Winkeländerung richtig in der Posenbestimmung erkannt wird. Auch wenn die Ausgleichseinheit in allen Richtungen und Orientierungen einen elastischen Ausgleich erlaubt, wird dieser bei  ${}^I\theta_X$  nicht sichtbar benötigt. Das zweite Visual Servoing regelt solange, bis eine Winkelabweichung in der Pose zwischen Kamera und Markern von  $\theta_X = \pm 2,5^\circ$  erreicht ist, damit anschließend die lineare Steckbewegung durchgeführt werden kann. Werden im Versuchsplan lediglich die Posen betrachtet, die mindestens einmal erfolgreich gesteckt werden können, wird eine Erfolgsquote von 98,2% erreicht. Für diese Posen werden die Kriterien 1-3 und in den meisten Fällen auch Kriterium 4 mit fünf von fünf Wiederholungen erfüllt.

Anhand der Versuchsergebnisse ist zu erkennen, dass insgesamt fünf Posen im Randbereich des Arbeitsraums zu 0% erfolgreich eingesteckt werden können. Im Folgenden werden die Gründe und Probleme näher erläutert. Die am nächsten liegende Pose von der Startposition, die nicht erfolgreich eingesteckt werden kann, liegt bei  ${}^{cs}Y = 750$  mm,  ${}^{cs}Z = 630$  mm und  ${}^I\theta_X = -15^\circ$ . In **Abbildung 7.6 a)** wird der fehlerhafte Steckversuch dargestellt. Während des VS1 tritt die Situation auf, dass der Roboterarm im rotatorischen Gelenk des Kopfes in seinen *Joint Limit* fährt und von dort aus nicht weiter verfahren kann. Die Pose ist aus mechanischen Gründen nicht erreichbar. Auch wenn im Versuchsplan als Bedingung aufgeführt ist, dass das VS1 im Arbeitsraum liegen muss, berücksichtigt, wie zuvor beschrieben, der aufgeführte Arbeitsraum nicht den limitierten Bewegungsumfang des Kopfgelenks. Dieser Fehler tritt im gesamten Versuchsplan nur bei dieser Pose auf. Durch den mechanischen Aufbau des Roboterarms und den daraus entstehenden begrenzten Regelbereich in der Höhe ist der Winkelbereich für den Kopf in der Nähe der Startposition erheblich eingeschränkt.



a)  ${}^{cs}Y = 750, {}^{cs}Z = 630, {}^I\theta_X = -15^\circ$



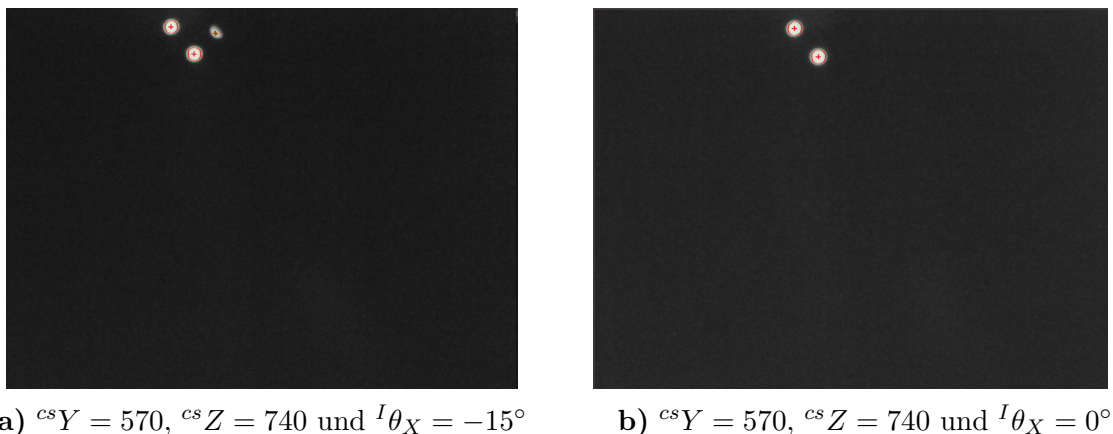
b)  ${}^{cs}Y = 570, {}^{cs}Z = 740, {}^I\theta_X = 15^\circ$

**Abbildung 7.6:** Fehlerhafte Steckversuche im Arbeitsraum

Ein zweiter Fehler, der lediglich auf der Höhe von  ${}^{cs}Y = 570$  mm und bei  ${}^{cs}Y = 630$  mm,  ${}^{cs}Z = 795$  mm in Verbindung mit einem positiven Drehwinkel um  ${}^I\theta_X$  auftritt, ist das Verkanteten des Steckers während der Einsteckbewegung. In **Abbildung 7.6 b)** wird dies für die Pose  ${}^{cs}Y = 570$  mm,  ${}^{cs}Z = 740$  mm und  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Stecker nur den halben Weg bis ins Inlet zurücklegen kann und sich im Anschluss verkantet. Das Verkanteten tritt lediglich bei den Posen auf, bei denen das Kopfgelenk eine rotatorische Bewegung über  $> 90^\circ$  ausführt. Dadurch wird während der Steckbewegung der Unterarm nach unten gedrückt und der Stecker verkantet sich. Dies wird in **Abschnitt 7.1.6** bei der Untersuchung der Kräfte und Momente näher betrachtet.

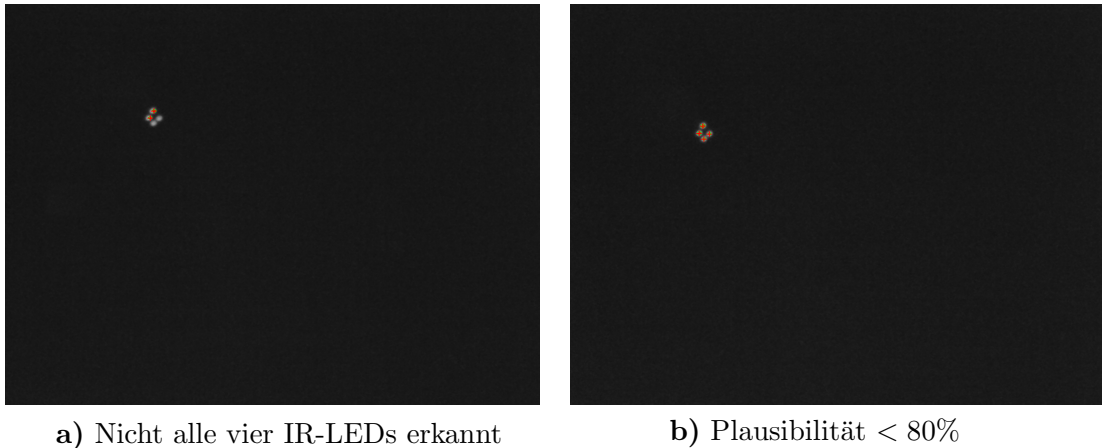
Als dritter Fehler ist aufzuführen, dass die IR-LEDs im Grenzbereich während des Suchens in  ${}^{cs}X$ -Richtung nur eingeschränkt erkannt werden. Es zeigt sich, dass die berechnete Pose anhand der ersten Erkennung der IR-LEDs fehlerhaft sein kann. In **Abbildung 7.7** werden die aufgenommenen Bilder nach der PTP-Vorpositionierung dargestellt. Für die beiden Posen in der Steckhöhe von  ${}^{cs}Y = 570$  mm zeigt sich, dass die IR-LEDs nach der PTP-Bewegung nicht weiter erkannt werden und der automatische Steckvorgang abgebrochen wird. Wie in Tabelle 7.2 aufgeführt, tritt dieser Fall für  ${}^{cs}Y = 570$  mm bei sechs von 15 Versuchen auf, was jeweils zu einem Fehlversuch führt. Auch in der Steckhöhe von  ${}^{cs}Y = 930$  mm ist dies zweifach festzustellen. Als Einzelfall ist dieser Fehler auch für die Pose im Randbereich  ${}^{cs}Y = 810$  mm,  ${}^{cs}Z = 685$  mm und  ${}^I\theta_X = -7,5^\circ$  aufgetreten. Hier kann jedoch kein Muster erkannt werden.

Als vierter Fehler, der bei den Posen  ${}^{cs}Y = 930$  mm,  ${}^{cs}Z = 850$  mm,  ${}^I\theta_X = -15^\circ$  und  ${}^{cs}Y = 930$  mm,  ${}^{cs}Z = 570$  mm,  ${}^I\theta_X = -15^\circ$  auftritt, ist zu verzeichnen, dass die IR-LEDs während des Suchens in  ${}^{cs}X$ -Richtung nicht richtig erkannt werden. In **Abbildung 7.8** wird dieser Fehler anhand von Bildaufnahmen während des Suchens in  ${}^{cs}X$ -Richtung für die Pose  ${}^{cs}Y = 930$  mm,  ${}^{cs}Z = 570$  mm,  ${}^I\theta_X = -15^\circ$  dargestellt. In **a)** wird abgebildet, wie nicht alle IR-LEDs vollständig erkannt werden. Bei Nichterfassen aller vier IR-LEDs kann keine Pose ermittelt werden. In **b)** wird gezeigt, dass alle vier Marker detektiert werden können, jedoch die Plausibilität zu gering ist. In diesem Fall ergibt sich eine Plausibilität von 78%, sodass keine Pose ermittelt wird.



**Abbildung 7.7:** IR-LEDs außerhalb des Blickfelds nach der PTP-Vorpositionierung





**Abbildung 7.8:** Fehlerhafte Posenbestimmung im Arbeitsraum

In diesem Abschnitt wurden die Versuche hinsichtlich des Steckerfolgs analysiert und verschiedene Probleme identifiziert. Es wird gezeigt, dass das System und die entwickelte Prozedur für ein wiederholbares und erfolgreiches automatisches Stecken unter Laborbedingungen geeignet ist, jedoch auch Probleme durch den mechanischen Aufbau und die verwendete Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit aktiven IR-LEDs vorhanden sind. Im Folgenden wird die zeitliche Dauer für den automatischen Einsteckvorgang untersucht.

### 7.1.5 Dauer des Einsteckvorgangs

Wie schon in der Anforderungsliste in Tabelle 4.1 aufgeführt, ist die benötigte Zeit für den automatischen Steckvorgang ein weiterer Aspekt, der zu betrachten ist. In **Tabelle 7.3** wird die benötigte Zeit vom Start des Steckvorgangs bis zum Zeitpunkt der maximal wirkenden Kraft in Einsteckrichtung  ${}^cZ$  in Sekunden aufgeführt. Dabei spiegelt der Wert die durchschnittliche Zeit der durchgeführten Versuche wieder. Die durchschnittliche Dauer für alle aufgeführten Versuche beträgt 90,4s. Der minimal geforderte Wert von 90s wird um eine Differenz von 0,4s nicht erreicht.

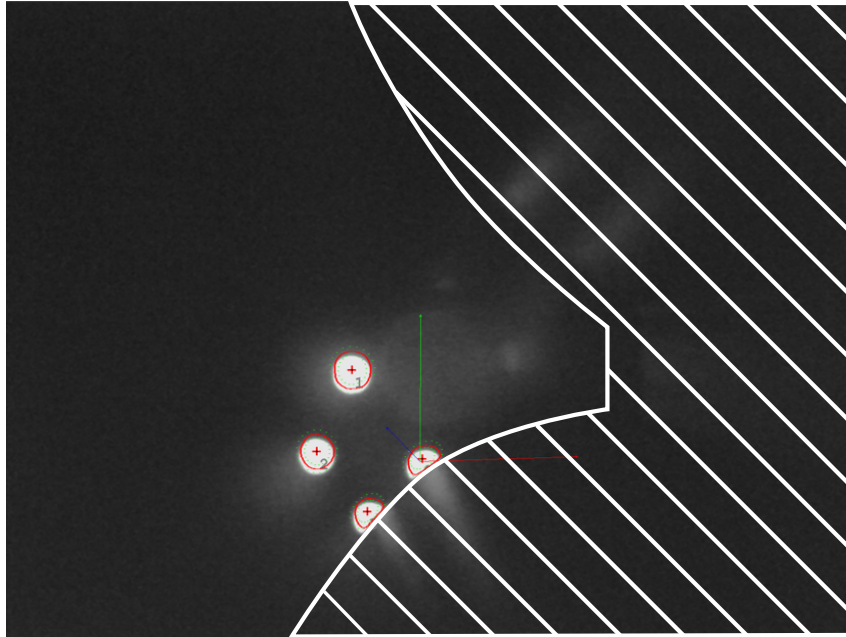
In den beiden Randbereichen in der Steckhöhe von  ${}^{cs}Y = 570\text{ mm}$  und  ${}^{cs}Y = 930\text{ mm}$  ist ein deutlicher Anstieg der Dauer im Vergleich zu den restlichen Zeiten zu verzeichnen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesen beiden Bereichen die IR-LEDs im ersten Suchdurchlauf in  ${}^{cs}X$ -Richtung nicht erkannt werden. Daraufhin ist für die Steckhöhe  ${}^{cs}Y = 930\text{ mm}$  ein weiterer Suchdurchlauf mit nach oben schauendem Stecker (siehe Abb. 7.4 b)) notwendig. Für die Steckhöhe von  ${}^{cs}Y = 570\text{ mm}$  sind zwei weitere Suchdurchläufe in  ${}^{cs}X$ -Richtung erforderlich, sodass die benötigten Zeiten in dieser Höhe am höchsten sind.

Durch Betrachten der durchschnittlichen Einsteckdauern abhängig vom Winkel  ${}^I\theta_X$  ergeben sich die in **Tabelle 7.4** aufgeführten Zeiten. Wie zu erwarten, ist die benötigte Zeit für das nicht geneigte Inlet ( ${}^I\theta_X = 0^\circ$ ) am geringsten, da der Roboterarm und der Stecker bereits nach der PTP-Vorpositionierung korrekt zum Inlet ausgerichtet sind. Für die Inletneigungen  ${}^I\theta_X \neq 0^\circ$

steigen die Zeiten an. Für ein geneigtes Inlet mit  ${}^I\theta_X = -15^\circ$  erhöht sich die Einsteckdauer gegenüber dem nicht geneigten Inlet bereits im Durchschnitt um 19,6%.

**Tabelle 7.3:** Dauer der Einsteckversuche im Arbeitsraum mit variablem Steckwinkel  ${}^I\theta_X$  und konstanten Inletwinkeln für  ${}^I\theta_Y = {}^I\theta_Z = 0^\circ$  in [s]  
(Farbliche Hinterlegung transparent abgestuft nach erfolgreichen Einsteckversuchen)

${}^{cs}Z$ in [mm] \ / ${}^{cs}Y$ in [mm]	${}^I\theta_X$	520	575	630	685	740	795	850
930	-15°							
	-7,5°							125
	0°	—	—	—	—	—	—	117,3
	7,5°							121,5
	15°							185,3
870	-15°						142,5	137,8
	-7,5°						71,2	79,6
	0°	—	—	—	—	—	65,4	65,5
	7,5°						81,4	72,9
	15°						141,4	131,6
810	-15°					87,1	82,4	96,6
	-7,5°				73,2	70,5	70,2	71,7
	0°	—	—	—	66,2	67,7	67,3	66,7
	7,5°				75,6	78,7	88,9	75
	15°				132,7	147	146,1	131,2
750	-15°				82	79,7	81,6	83
	-7,5°		72,5	70,3	71,9	71,2	73,4	71,2
	0°	75	70,7	69,3	68,9	69,1	68,3	66,4
	7,5°	92,2	83,8	81,7	81,1	80,2	81,7	74,9
	15°		148	138,9	136,9	123,2	148,5	135,2
690	-15°			82,8	83,2	82,1	84,1	
	-7,5°			74	74,5	72,9	72,7	
	0°	—	—	69,8	68,8	68	69	—
	7,5°			79,9	78,9	79	79,8	
	15°			113,7	131,3	137,7	130,2	
630	-15°				87,9	86,72	85,5	
	-7,5°				77,54	75,1	74	
	0°	—	—	—	69,7	67,4	74,5	—
	7,5°				91,4	76,3	78,9	
	15°				147	143,2		
570	-15°					92		
	-7,5°					186,4		
	0°	—	—	—	—	176,4	—	—
	7,5°							
	15°							



**Abbildung 7.9:** Eingeschränkte Bewegungsfreiheit während des VS durch Verdecken der IR-LEDs durch den DC-Teil des Steckers

Bei einer positiven Neigung von  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  kommt es zu einer Zeiterhöhung von 90%. Der Grund für den erheblich höheren Zeitbedarf hängt mit dem Visual Servoing und dem eingeschränkten Sichtfeld durch die Geometrie des Steckers zusammen. Wie in Abbildung 5.6 bereits dargestellt, wird 49% des Bildes durch den Stecker selbst verdeckt. Durch den längeren DC-Anteil von 48,5 mm (AC-Anteil Tiefe: 35,2 mm) werden beim Regeln im Visual Servoing auf eine Inletneigung  ${}^I\theta_X > 0^\circ$  die IR-LEDs schneller verdeckt als bei Inletneigungen von  ${}^I\theta_X < 0^\circ$ . In **Abbildung 7.9** wird gezeigt, wie die IR-LEDs durch den DC-Teil bereits während des VS1 geringfügig verdeckt werden. Solange eine IR-LED nicht vollständig verdeckt wird und ein Mittelpunkt detektiert werden kann, wird die Posenbestimmung weiterhin durchgeführt. Problematisch ist lediglich, dass der Regelbereich so deutlich eingeschränkt wird und das VS viel Zeit benötigt.

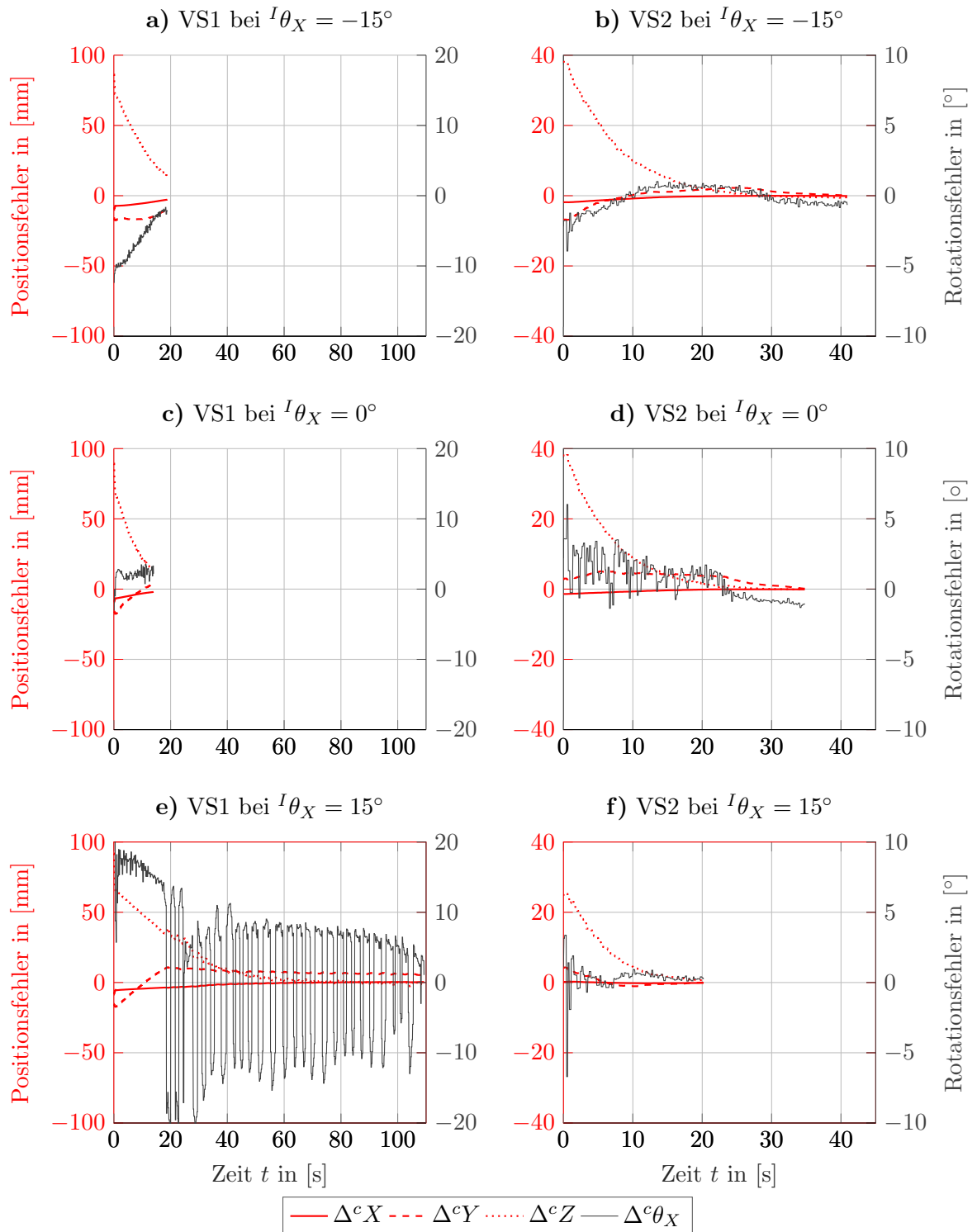
**Tabelle 7.4:** Durchschnittliche Einsteckdauer abhängig von  ${}^I\theta_X$  des Inlets

${}^I\theta_X$	Durchschnittliche Einsteckdauer
$-15^\circ$	86,1 s
$-7,5^\circ$	76,4 s
$0^\circ$	72 s
$7,5^\circ$	80,6 s
$15^\circ$	137,9 s

Um zu verdeutlichen, wie der Output des VS1 und des VS2 aussehen, werden in den **Abbildungen 7.10 a) bis f)** zum Vergleich die Positions- und Rotationsfehler der einzelnen VS für die verschiedenen Inletneigungen bei einzelnen Steckversuchen dargestellt. Die translatorischen

Fehler im Kamerakoordinatensystem werden aus dem aufgenommenen Fehler in der normierten Bildebene (siehe Gleichung 2.19) mithilfe der Beziehungen aus Gleichung 2.6 mittels

$$\Delta^c X = e_x \cdot {}^c Z \quad \text{und} \quad \Delta^c Y = e_y \cdot {}^c Z \quad (7.1)$$



**Abbildung 7.10:** Visual Servoing Positions- und Rotationsfehler Verlauf im Kamerakoordinatensystem für die Inletneigungen  ${}^I\theta_X \in \{-15^\circ, 0^\circ, 15^\circ\}$  in der Position  ${}^{cs}Y = 750$  mm und  ${}^{cs}Z = 795$  mm

umgerechnet. Für die Entfernung gilt nach Gleichung 2.19

$$\Delta^c Z = \exp(e_z) \cdot {}^c Z_{\text{ref}} - {}^c Z_{\text{ref}}. \quad (7.2)$$

Beim Betrachten der ersten VS für die unterschiedlichen Inletneigungen wird deutlich, dass bei der horizontalen Ausrichtung des Inlets ( ${}^I\theta_X = 0^\circ$ ) die geringste Zeit benötigt wird, da sich der Laderoboter lediglich um die Entfernung zwischen Vorpositionierung und Zielentfernung nach dem VS1 zu bewegen hat. Bei dem negativ geneigten Inlet kann die Orientierung mit einem geringfügig höheren Zeitaufwand bewältigt werden. Diese Beobachtung deckt sich mit der Auswertung der durchschnittlichen Einsteckdauern aus Tabelle 7.4. Für das positiv geneigte Inlet mit  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  ist in Abbildung 7.10 e) zu erkennen, dass mehr als 100s für die Durchführung des ersten VS benötigt werden und der Rotationsfehler eine Vielzahl an Nulldurchgängen aufweist. Dieses Problem ist auf das eingeschränkte Blickfeld durch den DC-Anteil des CCS-Steckers zurückzuführen, was zuvor anhand Abbildung 7.9 bereits beschrieben wird. Durch das Verdecken der LED 3 verschiebt sich der Mittelpunkt und eine Winkeländerung wird in der berechneten Pose hervorgerufen. Durch das Hin- und Herwippen des Kopfes am Laderoboter erhöht sich die Dauer des VS1 um ein Vielfaches gegenüber dem nicht geneigten Inlet mit  ${}^I\theta_X = 0^\circ$ .

Die Positions- und Rotationsfehlerverläufe für das VS2 sind für alle drei Inletneigungen vergleichbar. Es ist zu erkennen, dass sich der Winkelfehler durch das vorherige VS1 im Bereich von  $\pm 2,5^\circ$  befindet und sich hauptsächlich der Fehler in  ${}^c Z$ -Richtung im zeitlichen Verlauf verringert. Dennoch ist festzustellen, dass der Rotationsfehler bei allen drei Inletorientierungen Nulldurchgänge und somit Drehrichtungswechsel aufweist. Dies kann zum einen auf fehlerhafte Posenbestimmungen oder zum anderen auf ein zu hohes Lambda  $\lambda$  im Regelgesetz des VS zurückgeführt werden. Eindeutig identifiziert werden kann dies an dieser Stelle nicht.

### 7.1.6 Wirkende Kräfte und Momente

Neben der Untersuchung des Steckerfolgs und der benötigten Zeit für den automatischen Steckvorgang werden im Folgenden die auf das Inlet wirkenden Kräfte und Momente analysiert. Dabei beziehen sich die Kräfte und Momente auf das Koordinatensystem  ${}^{FMC}$  in der Kraftmessdose, die wie in Abbildung 7.2 d) fluchtend mit dem PE-Pin des Inlets in  ${}^I Z$ -Richtung angeordnet ist. Die Steckkräfte in  ${}^I Z$ -Richtung werden demnach negativ aufgeprägt.

In **Tabelle 7.5** werden die gemessenen maximalen Einsteckkräfte in  ${}^I Z$ -Richtung gemittelt über die fünf Wiederholungen aufgeführt. Über alle erfolgreich gesteckten Versuche ergibt sich im arithmetischen Mittel eine Steckkraft von -52,2N in  ${}^I Z$ -Richtung. Die Standardabweichung  $\sigma_{F_Z}$  liegt bei 5,8N. Nach DIN EN 62196-3 soll weniger als 100N bei händischem Einstecken notwendig sein. Dies trifft im Durchschnitt hierbei auch für das automatische Einstecken zu. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass es sich hier um einen modifizierten Stecker handelt, der keine DC-Kontakte hat und bei dem lediglich die AC-Kontakte belegt sind. Somit handelt es sich um einen abweichenden Stecker gegenüber der Norm.

**Tabelle 7.5:** Steckkräfte in  ${}^I Z$ -Richtung der Einsteckversuche im Arbeitsraum mit variablem Steckwinkel  ${}^I \theta_X$  und konstanten Inletwinkeln für  ${}^I \theta_Y = {}^I \theta_Z = 0^\circ$  in [N]  
 (Farbliche Hinterlegung transparent abgestuft nach erfolgreichen Einsteckversuchen)

${}^{cs} Y$ in [mm] \ ${}^{cs} Z$ in [mm]	${}^I \theta_X$	520	575	630	685	740	795	850
930	-15°							
	-7,5°							-54,2
	0°	—	—	—	—	—	—	-52,4
	7,5°							-49,4
	15°							-48,3
870	-15°						-57,5	-56,1
	-7,5°						-56,1	-53,2
	0°	—	—	—	—	—	-55,3	-47,2
	7,5°						-54,1	-44,5
	15°						-56,3	-48,9
810	-15°					-59,2	-60	-51,7
	-7,5°				-60,1	-58	-55	-48,5
	0°	—	—	—	-53,1	-54,1	-50,2	-48,6
	7,5°				-58	-54,2	-52,5	-47,6
	15°				-55,5	-52,9	-52	-46,3
750	-15°				-60,4	-58,2	-55,4	-48,5
	-7,5°		-59	-53,8	-56,7	-53,5	-52,9	-44,9
	0°	-54,7	-56,6	-57,7	-54,9	-50,5	-47,8	-47
	7,5°	-54,5	-52,9	-52,3	-53,2	-51,5	-51,2	-41,4
	15°		-52,3	-54	-51,2	-51,8	-48	-45
690	-15°			-55,8	-53,7	-57	-52	
	-7,5°			-55,9	-58,1	-50,2	-48,1	
	0°	—	—	-53,4	-51,1	-50,8	-45,3	—
	7,5°			-50,7	-51,4	-45,1	-48,1	
	15°			-48,3	-48,4	-43,7	-49,8	
630	-15°				-51,8	-47,5	-45,2	
	-7,5°				-52,3	-51	-46,3	
	0°	—	—	—	-47,1	-52,1	-48,1	—
	7,5°				-49,5	-47,1	-72	
	15°				-54,6	-56,1		
570	-15°					-46,5		
	-7,5°					-51,5		
	0°	—	—	—	—	-46,2	—	—
	7,5°							
	15°							

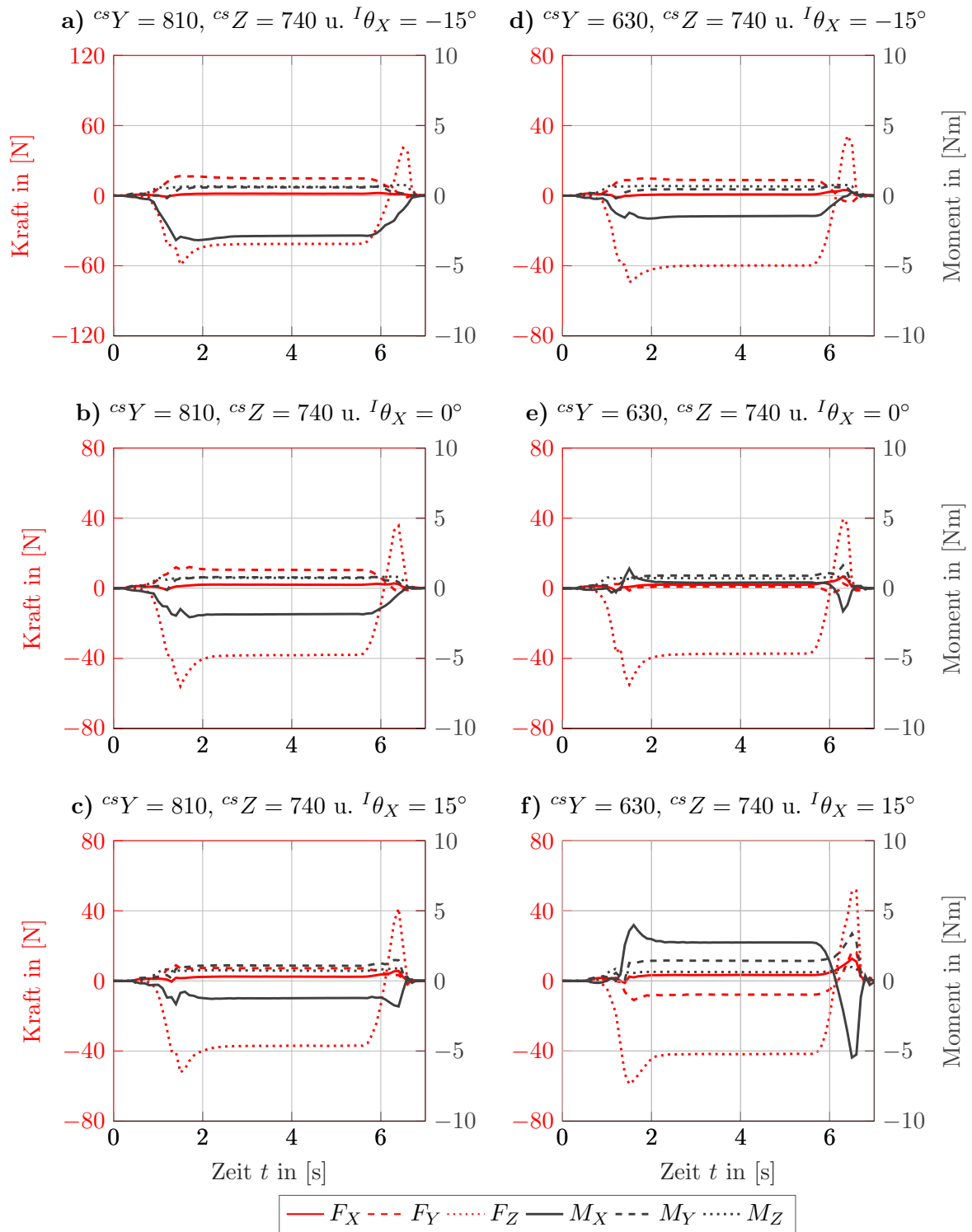
In **Tabelle 7.6** werden die durchschnittlichen maximalen Einsteckkräfte  $F_Z$  für die unterschiedlichen Einsteckwinkel  $-15^\circ \leq {}^I\theta_X \leq 15^\circ$  aufgeführt. Die größte Differenz dieser Mittelwerte liegt zwischen  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  und  ${}^I\theta_X = -15^\circ$  mit ca. 9,4%. Die mittlere absolute Abweichung der Mittelwerte abhängig von  ${}^I\theta_X$  vom gesamten arithmetischen Mittelwert von  $F_Z = -52,2\text{ N}$  liegt insgesamt bei 1,2 N. Dies lässt darauf schließen, dass die Einsteckkraft  $F_Z$  nicht signifikant vom Inletneigungswinkel  ${}^I\theta_X$  innerhalb dieser Versuchsreihe und für den entwickelten Laderoboter und die Ladeprozedur abhängig ist. Das Betrachten der Standardabweichung in **Tabelle 7.6** zeigt bis auf die Abweichung für  ${}^I\theta_X = 7,5^\circ$  ebenfalls vergleichbare Werte im Bereich von  $4,2\text{ N} \leq \sigma_{F_Z} \leq 4,9\text{ N}$ . Die erhöhte Abweichung bei  ${}^I\theta_X = 7,5^\circ$  ist auf zwei Steckversuche bei  ${}^{cs}Y = 630\text{ mm}$ ,  ${}^{cs}Z = 795\text{ mm}$ ,  ${}^I\theta_X = 7,5^\circ$  zurückzuführen, bei denen die Einsteckkraft bei  $-103,7\text{ N}$  und  $-101,8\text{ N}$  liegt. Wie bereits in **Abb. 7.6** aufgeführt, kann es in dem Bereich des Workspaces aufgrund des mechanisch nachgiebigem Aufbaus zum Verkanten des Steckers während des Einsteckvorgangs führen. In diesen beiden Fällen wird erfolgreich eingesteckt, jedoch mit einem erhöhten Kraftaufwand. Bleiben diese beiden Größen unbetrachtet, sinkt die Standardabweichung auf 4,4 N und lässt sich in den Gesamtbereich einordnen. Insgesamt ist die Standardabweichung für  ${}^I\theta_X = 0^\circ$  mit 4,2 N am geringsten.

**Tabelle 7.6:** Durchschnittliche Einsteckkraft in  ${}^IZ$ -Richtung abhängig von  ${}^I\theta_X$  des Inlets

${}^I\theta_X$	Durchschnittliche Einsteckkraft $F_Z$	Standardabweichung $\sigma_{F_Z}$
$-15^\circ$	-54,2 N	4,9 N
$-7,5^\circ$	-53,3 N	4,5 N
$0^\circ$	-51,1 N	4,2 N
$7,5^\circ$	-51,5 N	8,4 N
$15^\circ$	-50,9 N	4,7 N
Gesamt	-52,2 N	5,8 N

Anhand der Ergebnisse ist ebenfalls rückzuschließen, dass die Posenerkennung für alle untersuchten Winkel  ${}^I\theta_X$  vergleichbare Ergebnisse erzielt und der Laderoboter sich innerhalb der Versuchsreihe im aufgeführten Winkelbereich vergleichbar vor dem Inlet positioniert und erfolgreich einsteckt.

Um zu untersuchen, ob und wie die Kräfte  $F_X$  und  $F_Y$  und die Momente  $M_X$ ,  $M_Y$  und  $M_Z$  auf das Inlet wirken, werden in **Abbildung 7.11** verschiedene Verläufe dargestellt. Die Daten beziehen sich auf das Koordinatensystem  $(FM)$  der Messdose. Dabei wird sich auf den zeitlichen Bereich von 7 s konzentriert, in dem eingesteckt wird, 3 s gewartet und abschließend ausgesteckt wird. In a) bis c) sind die Steckversuche in der Höhe von  ${}^{cs}Y = 810\text{ mm}$  und den Inletneigungen  ${}^I\theta_X \in \{-15^\circ, 0^\circ, 15^\circ\}$  abgebildet. Wie bereits zuvor analysiert, ist bei keinem der  $F_Z(t)$ -Verläufe eine Auffälligkeit zu erkennen und bei allen drei Steckversuchen liegt die maximale Belastung bei ca. 50 N. Auch die Kraft in  ${}^IX$ -Richtung ist marginal und bei allen drei Posen vergleichbar und vernachlässigbar. Beim Betrachten der Kraft in  ${}^IY$ -Richtung ist ein Trend zu erkennen, bei dem die Kraft  $F_Y$  von **Abb. 7.11 a)** zu **c)** in der Zeit des eingesteckten Steckers abnimmt und in gleicher Richtung das Moment  $M_X$  im eingesteckten Zustand ebenfalls sinkt. Die verbleibenden Momentenverläufe  $M_Y(t)$  und  $M_Z(t)$  zeigen keine wesentlichen Ausreißer.



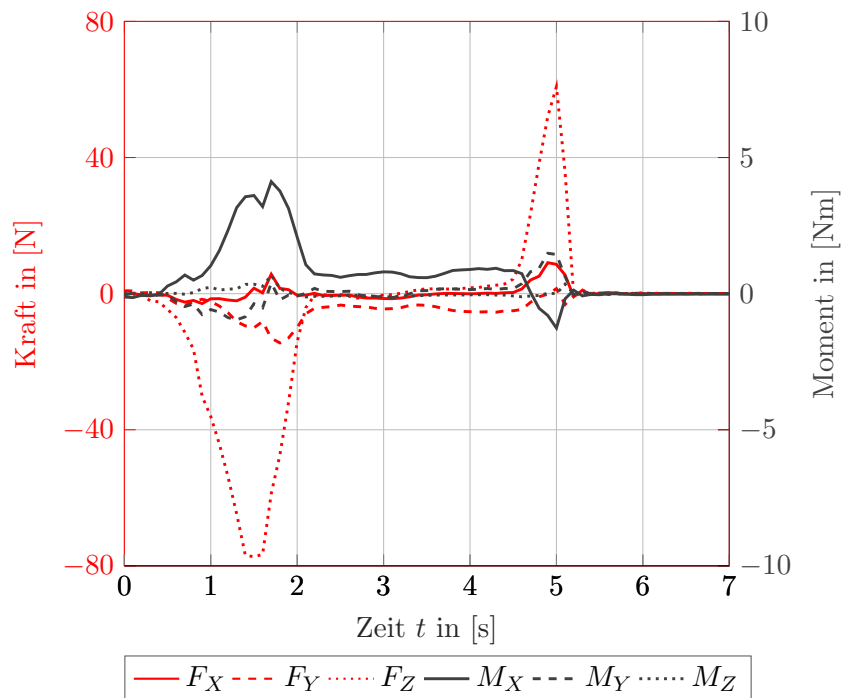
**Abbildung 7.11:** Kraft- und Momentenverläufe für das automatische Einstecken verschiedener Inletposen. Das Bezugssystem ist das Koordinatensystem ( $FM$ ) der Messdose.

In den Abbildungen 7.11 d) bis f) werden analog die Kraft- und Momentenverläufe der Steckversuche in der Höhe von  ${}^{cs}Y = 630$  mm und bei den Inletneigungen  ${}^I\theta_X \in \{-15^\circ, 0^\circ, 15^\circ\}$  dargestellt. Auch hier zeigen die Kraftverläufe  $F_Z(t)$  vergleichbare Kurven und es sind betragsmäßig ähnliche maximale Einsteckkräfte zu erkennen. Zudem ist auch hier der Trend festzustellen, dass die translatorische Belastung in  ${}^IY$ -Richtung von Abb. 7.11 d) zu f) abnimmt und hier



sogar einen Nulldurchgang aufweist und in f) negativ ist. In Abb. f) werden die Verläufe für die Inletpose in niedriger Höhe von  ${}^{cs}Y = 630\text{ mm}$  und der Inletneigung von  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 7.1.4 anhand Abbildung 7.6 beschrieben, verändert sich das Einsteckverhalten des Laderoboters abhängig von der Steckhöhe  ${}^{cs}Y$ . Anhand der Kraft- und Momentenverläufe und der Versuchsergebnisse aus Abschnitt 7.1.4 ist zu ermitteln, dass bei einer Winkelstellung des Kopfgelenks der Stellwinkel zwischen Unterarm und Kopf (beziehungsweise Stecker) von über  $90^\circ$  eine negative Kraft in  ${}^IY$ -Richtung des Inlets aufgeprägt wird. Dies lässt auf eine verhältnismäßig große Nachgiebigkeit des Unterarmgelenks schließen. Zudem wird dies bestätigt durch Betrachten des Momentenverlaufs  $M_Y(t)$  in f). Dieser befindet sich im eingesteckten Zustand bei  $\approx 1,2\text{ Nm}$  und ist somit höher als bei den weiteren untersuchten Momentenverläufen. Das Aufprägen eines Moments um die  ${}^IY$ -Achse des Inlets entsteht durch die Nachgiebigkeit im Ellbogen der Kinematik. Durch ein Verwinden des Arms wird eine Querkraft auf das Inlet aufgeprägt. Dies ist näher im folgenden Abschnitt zu untersuchen, da hier zwangsweise Querkräfte durch das Verwenden des elastischen Ausgleichs auf das Inlet aufgeprägt werden.

In **Abbildung 7.12** werden die Kraft- und Momentenverläufe für einen von Hand gesteckten Einsteckversuch aufgeführt. Dabei wird der selbe Stecker wie in den zuvor beschriebenen Versuchen verwendet, bis auf das Einsetzen des Mikroschalters. Der von Hand gesteckte Vorgang wird wie in der Realität mit muskulärer Kraft durchgeführt, bis der Steckergrund an der Inletfront anschlägt. Anhand des Kraftverlaufs  $F_Z(t)$  ist zu erkennen, dass der händisch eingesteckte Vorgang betragsmäßig mehr Kraft in  ${}^IZ$ -Richtung benötigt als der automatische Einsteckvorgang (s. Abb. 7.11 a)-f)). Dies kann zum einen darauf zurückgeführt werden, dass beim



**Abbildung 7.12:** Kraft- und Momentenverläufe für den von Hand eingesteckten Stecker. Das Bezugssystem ist das Koordinatensystem ( $FM$ ) der Messdose.

händischen Einstecken kein Mikroschalter verwendet wird und somit eine Distanz von  $\approx 1,6$  mm weiter in  ${}^I Z$ -Richtung eingesteckt wird. Zudem ist zu vermuten, dass beim händischen Einstecken bei Erreichen des Anschlags nicht unmittelbar gestoppt wird. Dies kann anhand dieser Kurve jedoch nicht verifiziert werden. Das Moment  $M_X$  ist im Verhältnis zu den automatisch eingesteckten Versuchen relativ hoch mit maximal 4,1 Nm bei  $t = 1,7$  s.

Weiterhin ist ein signifikanter Unterschied zwischen dem händischen und automatischen Einstecken, dass beim automatischen Einstecken im eingesteckten Zustand eine dauerhafte Belastung in Form einer Kraft in  ${}^I Z$ - und ggf. in  ${}^I Y$ -Richtung und eines Moments  $M_X$  bestehen bleibt. Beim händischen Einstecken sind somit die Kraft- und Momentenniveaus während des Ladevorgangs deutlich geringer und nahe bei 0 N bzw. 0 Nm. Ein Anteil an Drehmoment für  $M_X$  bleibt ebenfalls bestehen, da durch die Gewichtskraft und das Eigengewicht des Ladekabels am Stecker ein statisches Moment auf das Inlet wirkt. Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass die dauerhafte Belastung für das Inlet und die Inletaufhängung für den automatischen Einsteck- und Ladevorgang für das hier entwickelte System höher als beim händischen Einstecken ist.

Die weiteren Kraftverläufe  $F_X(t)$  und  $F_Y(t)$  und die Momentenverläufe  $M_Y$  und  $M_Z$  zeigen vergleichbare Verläufe. Bis auf die geringe Ausprägung der Kraft in  ${}^I Y$ -Richtung beim händischen Einstecken sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen.

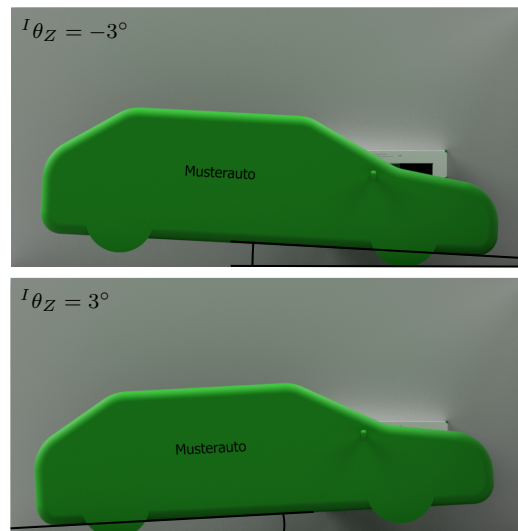
## 7.2 Steckversuche mit notwendiger elastischer Kompensation

In den vorherigen Versuchen wird der Arbeitsraum und das automatische Steckverhalten hinsichtlich Erfolgsquote, der Dauer des Steckvorgangs abhängig von der Inletorientierung  ${}^I \theta_X$  und den wirkenden Kräften und Momenten am Inlet untersucht. Es wird gezeigt, dass die Erfolgsquote im untersuchten Arbeitsraum nach Ausschluss der nicht steckbaren Posen bei über 98% liegt und die wirkenden Kräfte und Momente sich im Bezug auf den händisch eingesteckten Vorgang in einem vergleichbaren Bereich befinden. Unter Realbedingungen befindet sich das Inlet in der Regel nicht ideal parallel in der  ${}^I XY$ -Ebene zur  ${}^{cs} XY$ -Ebene des Ladesystems orientiert. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt eine Versuchsreihe durchgeführt und ausgewertet, in der die Orientierungen  ${}^I \theta_Y$  und  ${}^I \theta_Z$  variiert werden. Somit kann der Einsatz der elastischen Ausgleichseinheit zwischen Roboterarm und Stecker evaluiert werden.

Zunächst wird in **Abschnitt 7.2.1** der Versuchsplan anhand möglicher Parkszenarien erarbeitet. Anschließend werden die Versuchsergebnisse in **Abschnitt 7.2.3** hinsichtlich Steckerfolg und auftretenden Problemen analysiert. In den **Abschnitten 7.2.4** und **7.2.5** werden die Versuche bezüglich der Einsteckdauer und den auf das Inlet wirkenden Kräften und Momenten untersucht.

### 7.2.1 Versuchsplan

Der Versuchsplan beinhaltet das Ziel, den Einsatz der elastischen Ausgleichseinheit zu evaluieren. Hierzu ist ein zu untersuchender Winkelbereich für  ${}^I \theta_Y$  und  ${}^I \theta_Z$  festzulegen, für den der Versuchsplan zu erstellen ist. Es wird dabei ein realitätsnahes Parkszenario in einem Parkhaus

b) Schiefes Fahrzeug mit  ${}^I\theta_Z \neq 0^\circ$ **Abbildung 7.13:** Mögliche Inletorientierungen für  ${}^I\theta_Z$  beim realen schiefen Parken

betrachtet, bei dem das Fahrzeug zum einen schräg parken ( ${}^I\theta_Y \neq 0^\circ$ ) und/oder zum anderen beladen o.ä. ( ${}^I\theta_Z \neq 0^\circ$ ) sein kann. In **Abbildung 6.2** wurde bereits der Fall des Parkens in einem Parkhaus betrachtet. Dabei wird das schräge Parken dargestellt, bei dem das Fahrzeug mit einem Winkelversatz von  $\pm 12,5^\circ$  zur Wand beziehungsweise zum Ladesystem positioniert ist. Die Berücksichtigung eines größeren Winkelbereichs für den Versuchsplan ist nicht notwendig. Das Fahrzeug grenzt sowohl an die seitlichen Parkplatzgrenzen als auch an die Umhausung der Ladestation. In **Abbildung 7.13** wird ein schief parkendes Fahrzeug dargestellt, bei dem das Inlet um  ${}^I\theta_Z$  gedreht ist. Das Fahrzeug ist demnach erheblich beladen, hat auf einem einseitig erhöhten Objekt geparkt oder weist einen technischen Defekt auf. Hierbei wird ein Bereich von  ${}^I\theta_Z = \pm 3^\circ$  gewählt, bei dem eine Achse bereits um 147 mm erhöht ist. Erste Vorversuche zur Ermittlung des Untersuchungsbereichs zeigen, dass diese Inletorientierungen gesteckt werden kann.

**Tabelle 7.7:** Zu untersuchende Winkelbereiche bei Nutzung der elastischen Ausgleichseinheit

Rotation	Untersuchungsbereich
${}^I\theta_X$	$-15^\circ, 0^\circ, 15^\circ$
${}^I\theta_Y$	$-12,5^\circ, -7,5^\circ, 0^\circ, 7,5^\circ, 12,5^\circ$
${}^I\theta_Z$	$-3^\circ, 0^\circ, 3^\circ$

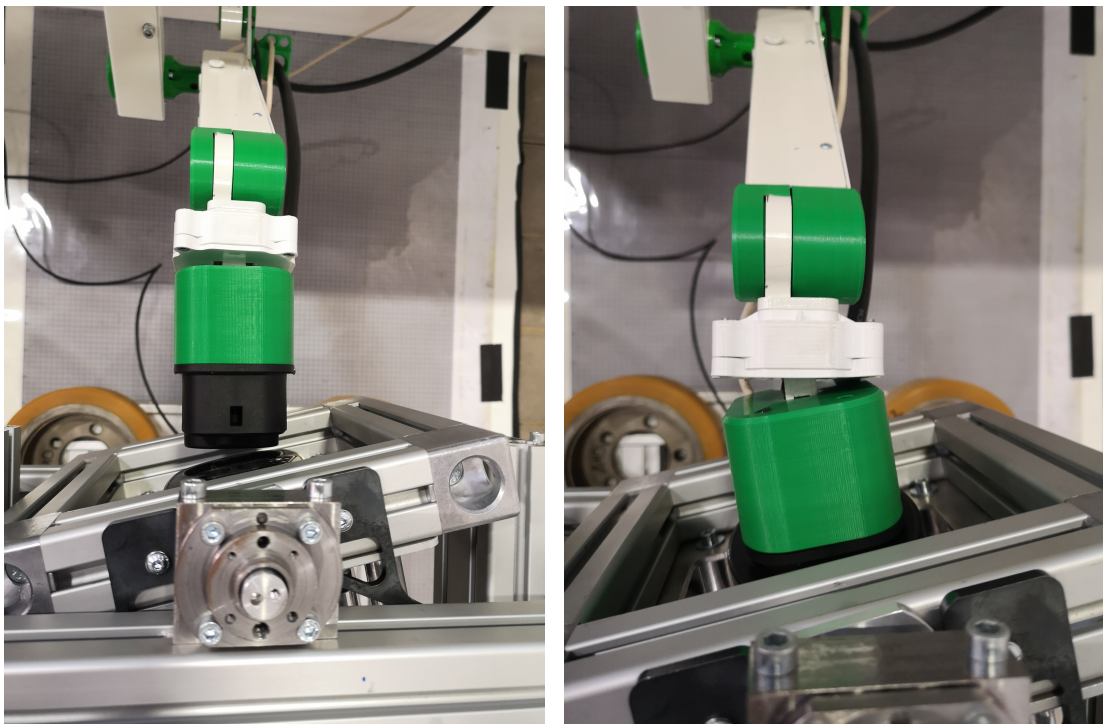
Auf Basis der zuvor beschriebenen Betrachtung der möglichen Parksituationen werden im Folgenden die Winkel in den in **Tabelle 7.7** definierten Bereichen und Zwischenpunkten variiert. Dabei wird der Neigungswinkel  ${}^I\theta_X$  in  $15^\circ$  Schritten variiert. Wie sich bei den Ergebnissen aus der ersten Versuchsreihe gezeigt hat, sind hierbei keine Abhängigkeiten bezüglich des Steckerfolgs zu erwarten. Es besteht lediglich eine Abhängigkeit zur Einsteckdauer. Der Inletwinkel  ${}^I\theta_Y$  wird im Bereich  $\pm 12,5^\circ$  variiert mit den Zwischenschritten  $\pm 7,5^\circ$ .  ${}^I\theta_Z$  wird im Winkelbereich  $\pm 3^\circ$  mit der Nullstellung variiert. Die Position des Inlets wird nicht variiert und wird mittig im Arbeitsraum des Roboters bei  ${}^{cs}Y = 750$  mm und  ${}^{cs}Z = 740$  mm festgelegt, um den Versuchsumfang zu begrenzen. Jede Pose wird wie auch zuvor fünf mal wiederholt versucht zu stecken. Die Posen

mit  ${}^I\theta_Y = {}^I\theta_Z = 0^\circ$  werden nicht noch einmal gesteckt, da diese bereits innerhalb der vorherigen Versuchsreihe untersucht worden sind. Im Folgenden wird zunächst anhand von vereinzelt Vorversuchen überprüft, ob der Versuchsplan geeignet mit dem entwickelten System durchgeführt werden kann oder ob Grenzen bereits hier zu erkennen sind und der Versuchsplan anzupassen ist.

Wie bereits in Abschnitt 7.1.2 beschrieben, ist auch hier die Reihenfolge der Drehungen zu beachten. Alle Drehungen beziehen sich auf die Reihenfolge  $ZX'Y''$ , bei der sich die Winkeländerung auf die sich mitdrehende Achse bezieht. Die Reihenfolge hängt vom mechanischen Aufbau der Inletaufhängung ab.

### 7.2.2 Vorversuche

Anhand erster Vorversuche wird getestet, ob die Inletorientierung von  ${}^I\theta_X = 0^\circ$ ,  ${}^I\theta_Y = 12,5^\circ$  und  ${}^I\theta_Z = 0^\circ$  gesteckt werden kann oder ob dieser Grenzwert nicht erreichbar ist. In **Abbildung 7.14** wird der Einsteckversuch während des VS2 in **a)** und im eingesteckten Zustand in **b)** abgebildet. Das VS2 wird erfolgreich beendet und der Steckvorgang wird durchgeführt. Jedoch ist anhand der **Abbildung 7.15** und dem hier dargestellten Kraftverlauf zu erkennen, dass der Mikroschalter nicht direkt auslöst, sondern der Stecker nicht vollständig eingesteckt ist. Der Verlauf  $F_Z(t)$  zeigt, dass nach der linearen Einsteckbewegung nicht nach drei Sekunden wieder ausgesteckt wird, sondern erst bei  $t = 7$  s ein Nachrutschen stattfindet und erst dann der Mikroschalter betätigt wird. Zudem ist zu erkennen, dass die notwendige maximale Kraft  $F_Z$  im Vergleich zur Inletorientierung  ${}^I\theta_X = {}^I\theta_Y = {}^I\theta_Z = 0^\circ$  um mehr als das Dreifache erhöht ist.



a) Während des VS2

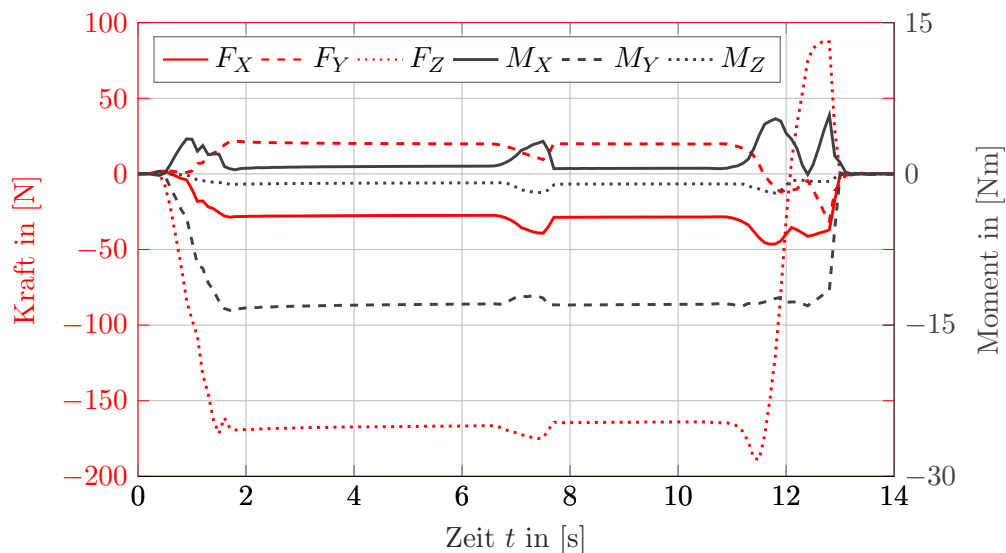
b) Eingesteckt

**Abbildung 7.14:** Vorversuch für  ${}^{cs}Y = 750$  mm,  ${}^{cs}Z = 740$  mm,  ${}^I\theta_X = 0^\circ$ ,  ${}^I\theta_Y = 12,5^\circ$  und  ${}^I\theta_Z = 0^\circ$ .

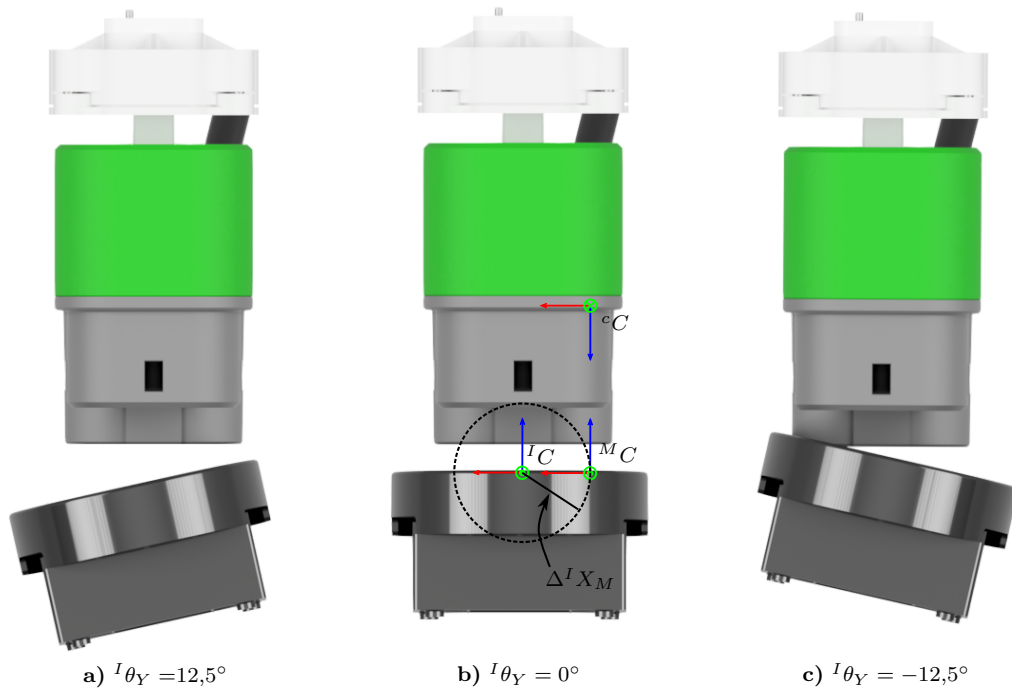
Aufgrund des Nichtauslösens des Mikroschalters und der um ein Vielfaches erhöhten Kräfte und Momente wird die Inletneigung  ${}^I\theta_Y = \pm 12,5^\circ$  nicht weiter betrachtet. Anhand von weiteren Vorversuchen wird stattdessen der Inletwinkel  ${}^I\theta_Y$  lediglich bis  $\pm 10^\circ$  variiert.

Ein weiterer Aspekt, der anhand der Vorversuchsergebnisse zu berücksichtigen ist, ist die Situation, dass bei einer Winkeländerung  ${}^I\theta_Y \neq 0^\circ$  die Entfernung  ${}^cZ_I$  zwischen Stecker bzw. Kamerakoordinatensystem  ${}^cC$  und Inletkoordinatensystem  ${}^IC$  sich abhängig vom Inletwinkel  ${}^I\theta_Y$  ändert. In **Abbildung 7.16** wird diese Unterscheidung schematisch dargestellt. In **b)** ist das ideale parallele Parken zum Ladesystem abgebildet, bei dem die  $XY$ -Ebenen aller eingezeichneten Koordinatensysteme parallel zueinander stehen. In **a)** und **c)** werden die Inletorientierungen für das schräge Parken aus **Abbildung 7.13** dargestellt. Zudem wird die Zielposition zum Stecker für das zweite Visual Servoing verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass bei gleichbleibender Zielentfernung von  ${}^cZ_M = 60$  mm für das VS2 sich die Entfernung zwischen Inlet- und Steckermitte bei  ${}^I\theta_Y > 0^\circ$  vergrößert, während die Entfernung bei  ${}^I\theta_Y < 0^\circ$  kleiner wird. Für den Fall, der in **a)** dargestellt wird, tritt keine Kollision zwischen Stecker und Inlet ein, sodass keine Anpassungen notwendig sind. Im Fall **c)** bei  ${}^I\theta_Y < 0^\circ$  kann es zu Kollisionen kommen, die eine Regelung erschwert oder bei Verkanten zum Abbruch führen kann. In Vorversuchen kann dieser Fall durch fehlerhafte Posenbestimmungen bereits bei dem Untersuchungspunkt mit  ${}^I\theta_Y = -7,5^\circ$  auftreten.

Um diese Kollision zu verhindern, wird eine Anpassungsfunktion für die Zielentfernung des VS2 implementiert, die abhängig von der Orientierungsabweichung in  $Y$ -Richtung zwischen Kamera und Inlet bzw. Markern ist. Durch die Drehachse des Inlets um  ${}^IY$  bewegt sich das Koordinatensystems  ${}^MC$  der Marker auf einer Kreisbahn mit dem Radius  $\Delta{}^IX_M = 24,8$  mm, was



**Abbildung 7.15:** Kraft- und Momentenverläufe für den Vorversuch  ${}^{cs}Y = 750$  mm,  ${}^{cs}Z = 740$  mm,  ${}^I\theta_X = 0^\circ$ ,  ${}^I\theta_Y = 12,5^\circ$  und  ${}^I\theta_Z = 0^\circ$ . Das Bezugssystem ist das Koordinatensystem ( $FM$ ) der Messdose.



**Abbildung 7.16:** Abstände zwischen Inlet und Stecker beim Regeln auf  ${}^cZ_M = 60\text{ mm}$  und  ${}^I\theta_Y \neq 0$

der Abstand zwischen der LED 0 und dem PE-Pin in  ${}^I X$ -Richtung ist. Somit wird folgende Fallunterscheidung für die Zielentfernung  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  des VS2 durchgeführt:

$${}^cZ_{M,\text{ref}} = \begin{cases} 60\text{ mm} & \text{wenn } {}^I\theta_Y \geq 0^\circ \\ 60\text{ mm} + |\sin({}^I\theta_Y)| \cdot \Delta^I X_M & \text{wenn } {}^I\theta_Y < 0^\circ \end{cases} \quad (7.3)$$

Demnach vergrößert sich die Entfernung bei  ${}^I\theta_Y < 0^\circ$ , während sie ansonsten gleich bleibt. Die Inletorientierung  ${}^I\theta_Y$  kann der Posenbestimmung anhand  ${}^c\theta_{Y_M}$  entnommen werden.

Um zu überprüfen, ob die vorherigen Versuche wiederholt werden müssen, wird das VS2 bei  ${}^I\theta_Y = 0^\circ$  angewendet und die Änderung der Zielposition für  ${}^cZ_{M,\text{ref}}$  über 1000 Bildaufnahmen aufgeführt. So kann überprüft werden, ob durch Ungenauigkeiten der Posenbestimmung eine wesentliche Anpassung der Zieldistanz stattfindet, auch bei einer realen Orientierung von  ${}^I\theta_Y = 0^\circ$ . In **Abbildung 7.17** ist zu erkennen, dass die Änderung im Durchschnitt bei lediglich 0,91 mm über dem eigentlichen Zielwert von 60 mm liegt und somit innerhalb der Regeltoleranz aus Tabelle 5.2. Dies entspricht ca.  $2,1^\circ$ . Daraus lässt sich schließen, dass keine relevanten Veränderungen beim Wiederholen der Versuche zu erwarten sind.

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse analog zum vorherigen Vorgehen nach den Kriterien des erfolgreichen Einsteckens, der Einsteckdauer und den wirkenden Kräften und Momenten untersucht.

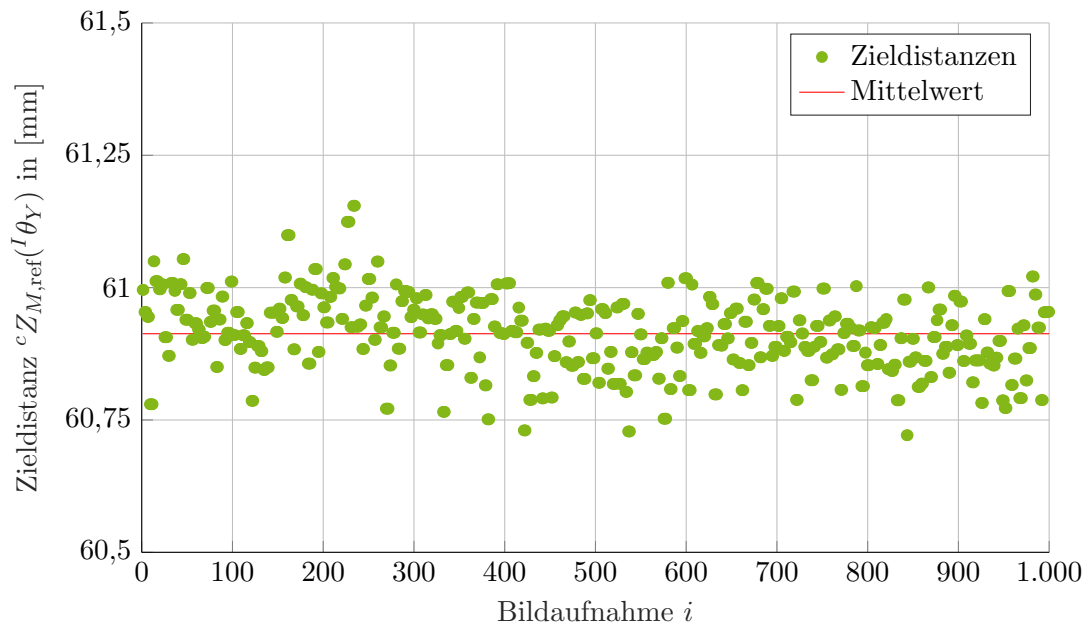


Abbildung 7.17: Änderung der Zieldistanz  $c Z_{M,ref}$  beim VS2 durch Anpassung  $c Z_{M,ref}({}^I\theta_Y)$

### 7.2.3 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe zur Untersuchung der Eignung der elastischen Ausgleichseinheit werden in den **Tabellen 7.8 bis 7.10** aufgeführt. Analog zu 7.1.4 werden auch hier die Felder farblich hinterlegt. Die grüne transparente Abstufung spiegelt die Anzahl der erfolgreichen Steckversuche wider. Die neue orangene Hinterlegung wird im Folgenden näher erläutert. Insgesamt umfasst die Versuchsreihe 210 Versuche. Die Reihenfolge der Versuchsdurchführung erfolgt randomisiert, lediglich die fünf Wiederholungen werden unmittelbar nacheinander durchgeführt.

In Tabelle 7.9 werden die Ergebnisse dargestellt, bei denen das Inlet nicht um die  ${}^I X$ -Achse ( ${}^I\theta_X = 0^\circ$ ) geneigt ist. Der Einsteckerfolg liegt bei 98,6%, da lediglich ein Versuch nicht erfolgreich eingesteckt wird. Bei diesem einen Versuch gehen während des VS1 die LEDs im Bild verloren und der Einsteckvorgang wird abgebrochen. In Tabelle 7.8 werden die Versuchsergebnisse mit einem nach oben geneigten Inlet ( ${}^I\theta_X = -15^\circ$ ) abgebildet. Auch hier werden 67 von 68 Versuchen erfolgreich eingesteckt, mit dem Unterschied, dass bei den orange eingefärbten Posen das lineare Ausstecken nicht durchgeführt werden kann. Bei einer Inletpose werden zum Schutz vor Überbelastung lediglich drei Wiederholungen durchgeführt. In Abschnitt 7.2.5 werden die wirkenden Kräfte analysiert, wo deutlich wird, dass beim automatischen Ausstecken eine hohe Kraft in  ${}^I X$ -Richtung aufgeprägt wird, die vom Laderoboter nicht überwunden werden kann.

Die Versuchsergebnisse für das nach unten geneigte Inlet mit  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  werden in Tabelle 7.10 aufgeführt. Die Erfolgsquote ist deutlich geringer als bei  ${}^I\theta_X = 0^\circ$  und  ${}^I\theta_X = -15^\circ$ . Im Fall von  ${}^I\theta_Y = 10^\circ$  kann kein Steckvorgang erfolgreich durchgeführt werden. Hier werden die Marker bereits im VS1 verloren. Wie bereits anhand Abbildung 7.9 beschrieben, ist der Blickwinkel und somit auch die Bewegungsfreiheit durch des DC-Anteil des Combo 2 Steckers erheblich

eingeschränkt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination von  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  und  ${}^I\theta_Y = 10^\circ$  das Problem während des VS1 verstärken. In Abbildung 7.10 e) ist bereits zu erkennen, dass bei den nach unten geneigten Inlets während des VS1 mehrere Nulldurchgänge im Rotationsfehler stattfinden, da Marker 3 durch den DC-Anteil teils verdeckt wird und sich die Pose im Rotationsfehler  ${}^I\theta_X$  ändert. Dadurch rotiert der Kopf des Roboterarms entgegengesetzt und die LEDs bleiben im Bild. Bei den hier untersuchten Posen mit  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  und  ${}^I\theta_Y = 10^\circ$  tritt kein Nulldurchgang für den Rotationsfehler im VS1 ein und die Marker laufen aus dem Blickfeld. Dieser Fehler lässt entweder auf ein zu großes  $\lambda$  für das VS1 schließen, da ein Überspringen stattfindet und die Lösung im VS1 nicht konvergieren kann oder auf eine fehlerhafte Posenbestimmung.

**Tabelle 7.8:** Elastische Nachgiebigkeit bei  ${}^I\theta_X = -15^\circ$

${}^I\theta_Z \backslash {}^I\theta_Y$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$
$-10^\circ$	4/5	5/5	5/5
$-7,5^\circ$	5/5	5/5	5/5
$0^\circ$	5/5	\	5/5
$7,5^\circ$	5/5	5/5	5/5
$10^\circ$	5/5	5/5	3/3

**Tabelle 7.9:** Elastische Nachgiebigkeit bei  ${}^I\theta_X = 0^\circ$

${}^I\theta_Z \backslash {}^I\theta_Y$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$
$-10^\circ$	5/5	5/5	5/5
$-7,5^\circ$	5/5	5/5	5/5
$0^\circ$	5/5	\	5/5
$7,5^\circ$	5/5	5/5	5/5
$10^\circ$	5/5	5/5	4/5

**Tabelle 7.10:** Elastische Nachgiebigkeit bei  ${}^I\theta_X = 15^\circ$

${}^I\theta_Z \backslash {}^I\theta_Y$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$
$-10^\circ$	5/5	5/5	0/5
$-7,5^\circ$	3/5	5/5	5/5
$0^\circ$	4/5	\	5/5
$7,5^\circ$	4/5	5/5	5/5
$10^\circ$	0/5	0/5	0/5

Neben dem Verlieren der Marker aus dem Bildfeld tritt ein Verkanten des Steckers beim Einsteckvorgang vereinzelt bei  ${}^I\theta_Z = -3^\circ$  und bei  ${}^I\theta_Z = 3^\circ, {}^I\theta_Y = -10^\circ$  bei allen fünf Wiederholung auf. Das Verkanten zeichnet sich so aus, dass beim Einstecken der Combo 2 Stecker vorne an der Inletfront frontal kontaktiert und nicht einsteckt. In der Drehung um die  ${}^I Z$ -Richtung ist eine Selbstzentrierung kaum möglich. Dieser Fehler führt zu hohen Kräften und einem Abbruch des Steckvorgangs.

Die aus den Vorversuchen implementierte Anpassung bezüglich einer dynamischen Zieldistanz kann als geeignet bewertet werden, da es zu keinem Kontakt zwischen Inlet und Stecker während des VS2 gekommen ist. Insgesamt ist festzuhalten, dass bei Inletwinkeln von  ${}^I\theta_Y = \pm 7,5^\circ$  eine hohe Erfolgsquote von 95,6% erreicht werden kann. Anhand dem hier entwickelten System und der Ladeprozedur ist dieser Untersuchungspunkt als Anforderung an die Genauigkeit des parkenden Fahrzeugs zu nennen. Bei betragsmäßig größeren Winkeln sinkt die Erfolgsquote zunehmend. Insgesamt werden von 208 Versuchen lediglich 182 Steckversuche erfolgreich eingesteckt. Dies



entspricht einer Erfolgsquote von 87,5%. Ein erfolgreiches Ein- und Ausstecken erfolgt lediglich bei 78,8%. Im Folgenden werden die Einsteckdauern und die wirkenden Kräfte analysiert.

## 7.2.4 Dauer des Einsteckvorgangs

Um zu untersuchen, ob die Dauer des Einsteckvorgangs durch die Winkeländerungen  ${}^I\theta_Y \neq 0$  und  ${}^I\theta_Z \neq 0$  beeinflusst wird, werden in den **Tabellen 7.11 bis 7.13** die durchschnittlichen Einsteckdauern für die jeweiligen fünf wiederholten Einsteckversuche dargestellt. Die farbliche teils transparente Hinterlegung entspricht auch hier dem Anteil der erfolgreich eingesteckten Steckversuche aus Abschnitt 7.2.3. Dabei werden lediglich die erfolgreich eingesteckten Versuche berücksichtigt.

**Tabelle 7.11:** Durchschnittliche Einsteckdauer in [s] bei elastischer Kompensation und  ${}^I\theta_X = -15^\circ$

${}^I\theta_Y \backslash {}^I\theta_Z$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$
$-10^\circ$	75,85	82,3	79,3
$-7,5^\circ$	89,4	116	78
$0^\circ$	80,5	\	80,6
$7,5^\circ$	103,7	105,3	78,3
$10^\circ$	154,3	154,32	126,9

**Tabelle 7.12:** Durchschnittliche Einsteckdauer in [s] bei elastischer Kompensation und  ${}^I\theta_X = 0^\circ$

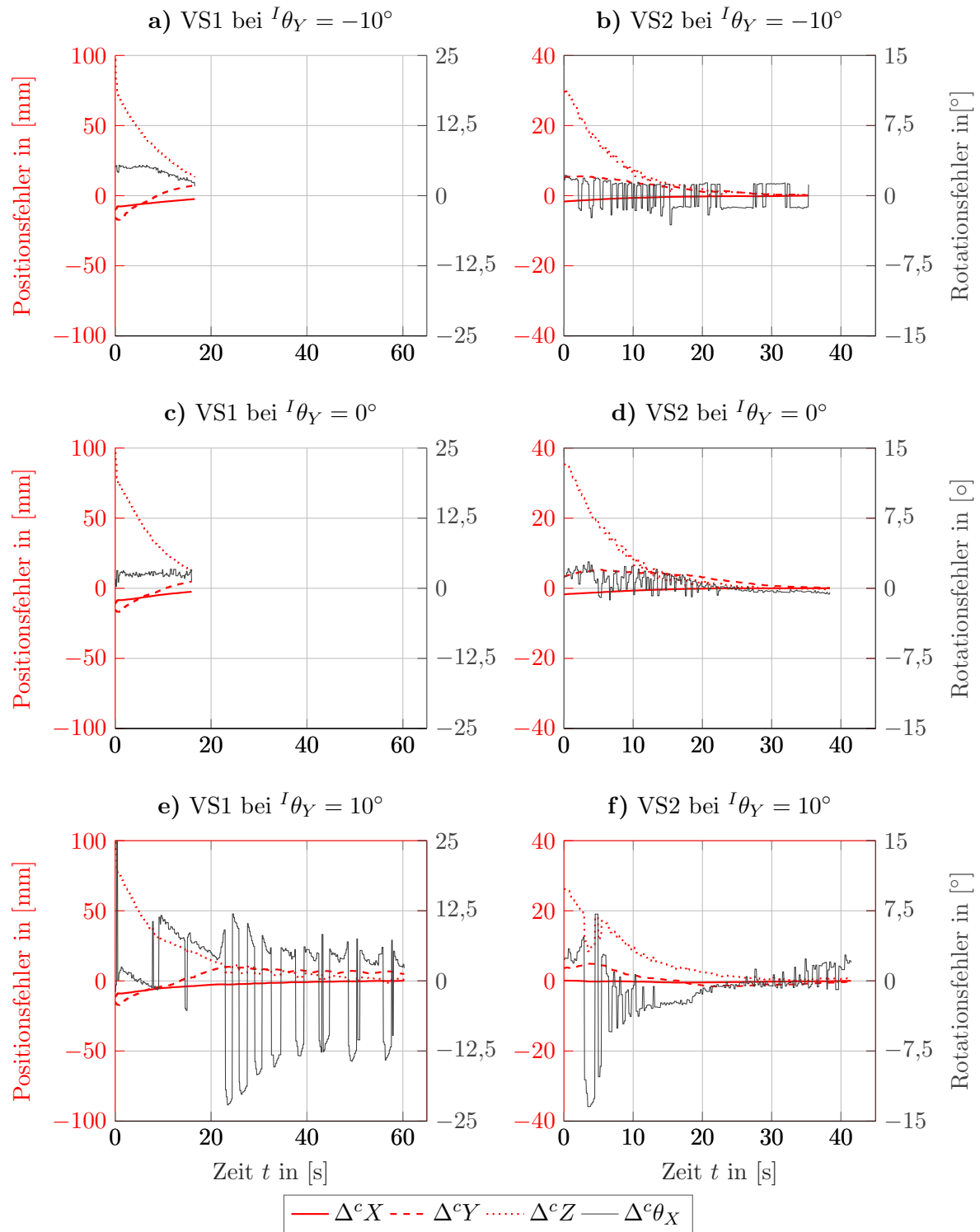
${}^I\theta_Y \backslash {}^I\theta_Z$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$
$-10^\circ$	71,8	72,9	72,3
$-7,5^\circ$	77,3	77,2	71,4
$0^\circ$	72,82	\	108,8
$7,5^\circ$	123,7	120,3	117,12
$10^\circ$	129,1	136,44	124,5

**Tabelle 7.13:** Durchschnittliche Einsteckdauer in [s] bei elastischer Kompensation und  ${}^I\theta_X = 15^\circ$

${}^I\theta_Y \backslash {}^I\theta_Z$	$-3^\circ$	$0^\circ$	$3^\circ$
$-10^\circ$	146,3	136	
$-7,5^\circ$	136,5	121,2	158,7
$0^\circ$	155	\	262,2
$7,5^\circ$	265,9	297,1	330,1
$10^\circ$			

In Abschnitt 7.1.5 wird gezeigt, dass die durchschnittliche Einsteckdauer für  ${}^I\theta_X = 0^\circ$  und  ${}^I\theta_Y = {}^I\theta_Z = 0^\circ$  bei 72 s liegt. Bei den vorliegenden Versuchsergebnissen in Tabelle 7.12 werden die Einsteckdauern für variierende Winkel abgebildet und es zeigt sich, dass die Einsteckdauer abhängig von  ${}^I\theta_Y$  ansteigt. Es ist erkennen, dass bei  ${}^I\theta_Y < 0^\circ$  die Einsteckdauern vergleichbar mit denen von  ${}^I\theta_Y = {}^I\theta_Z = 0^\circ$  sind. Dies entspricht nach Tabelle 7.4 für  ${}^I\theta_X = -15^\circ$  bei 86,1 s und für  ${}^I\theta_X = 15^\circ$  bei 137,9 s. Die Einsteckdauern bei  ${}^I\theta_Y > 0^\circ$  weichen hierbei für alle drei untersuchten Steckwinkel  ${}^I\theta_X$  mit zunehmender Einsteckdauer ab.

In **Abbildung 7.18** wird zur Veranschaulichung das VS1 und VS2 bei unterschiedlicher Inletorientierung  ${}^I\theta_Y$  und  ${}^I\theta_X = {}^I\theta_Z = 0^\circ$  gezeigt. Die VS-Verläufe von **a)** und **b)** und die VS-Verläufe von **c)** und **d)** zeigen die Positions- und Rotationsfehler für  ${}^I\theta_Y = -10^\circ$  und  ${}^I\theta_Y = 0^\circ$  und führen vergleichbare Kurven auf. Für  ${}^I\theta_Y = 10^\circ$  in **e)** und **f)** kann der Kurvenverlauf für das



**Abbildung 7.18:** Visual Servoing Positions- und Rotationsfehler Verlauf im Kamerakoordinatensystem für die Inletneigungen  ${}^I\theta_Y \in \{-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ\}$  in der Position  ${}^{cs}Y = 750$  mm und  ${}^{cs}Z = 795$  mm und die Orientierung  ${}^I\theta_X = {}^I\theta_Z = 0^\circ$

VS1 mit dem aus Abbildung 7.10 e) verglichen werden. In e) ist dabei festzustellen, dass bei  $t = 9$  s ein Rotationsfehler von  $\Delta\theta_X = 11,7^\circ$  bestimmt wird, obwohl das Inlet um  $0^\circ$  geneigt ist. Dies führt dazu, dass der Roboter den Stecker nach oben neigt und somit der Fall der verdeckten IR-LEDs verglichen mit Abbildung 7.9 eintritt. Wie auch bei  $\theta_X = 15^\circ$  in Abbildung 7.10

sind vermehrte Nulldurchgänge für den Rotationsfehler mit Amplituden von bis zu mehr als  $30^\circ$  zu erkennen. Auch im VS2 in f) ist kein deutliches Konvergieren des Rotationsfehler gegen den Wert 0 zu erkennen. In f) bei  $t = 4\text{ s}$  ist ein Abfall des Positionsfehlers in  $Z$ -Richtung zu erkennen. Dies kann auf eine fehlerhafte Posenbestimmung um die  $Y$ -Rotation zurückgeführt werden, da sich bei einem Nulldurchgang die Zieldistanz zum Inlet nach Gleichung 7.3 verkleinern würde. Das Bestimmen einer Rotationsabweichung von bis zu  $11,7^\circ$  zu Beginn des VS1 lässt ebenfalls eine fehlerhafte Posenbestimmung vermuten. Um die Vermutung zu stützen und um ein Regelungsproblem auszuschließen, werden die selben Inletposen erneut mit einem halbierten Proportionalfaktor  $\lambda(|\mathbf{e}|)$  mit ( $\lambda_0 = 1$ ,  $\lambda_\infty = 0,1$  und  $\lambda'_0 = 15$ ) durchgeführt. Somit ist zu untersuchen, ob die VS-Verläufe auf ein Überschwingen durch das VS-Regelgesetz oder durch eine instabile Posenbestimmung hervorgerufen werden. Die vorherigen erfolgreichen Ergebnisse verhärteten die Annahme einer fehlerhaften Posenbestimmung, da anderenfalls ein Nichtkonvergieren auch bei anderen Inletorientierungen auftreten würde.

In **Tabelle 7.14** werden die Ergebnisse für das automatische Einstecken mit halbiertem Proportionalfaktor aufgeführt. Auch hier ist zu sehen, dass eine Geschwindigkeitsreduzierung keinen Unterschied hervorruft und der Einsteckvorgang bei  ${}^I\theta_Y = 10^\circ$  mehr als doppelt so viel Zeit benötigt. Dies festigt die Annahme einer fehlerhaften Posenbestimmung vor allem zu Beginn des VS1. Durch die fehlerhafte Posenbestimmung verfährt der Roboterarm so, dass die IR-LEDs wie in Abbildung 7.9 durch den DC-Teil des Steckers verdeckt werden und dies nur durch erheblichen Zeitaufwand ausgeregelt werden kann.

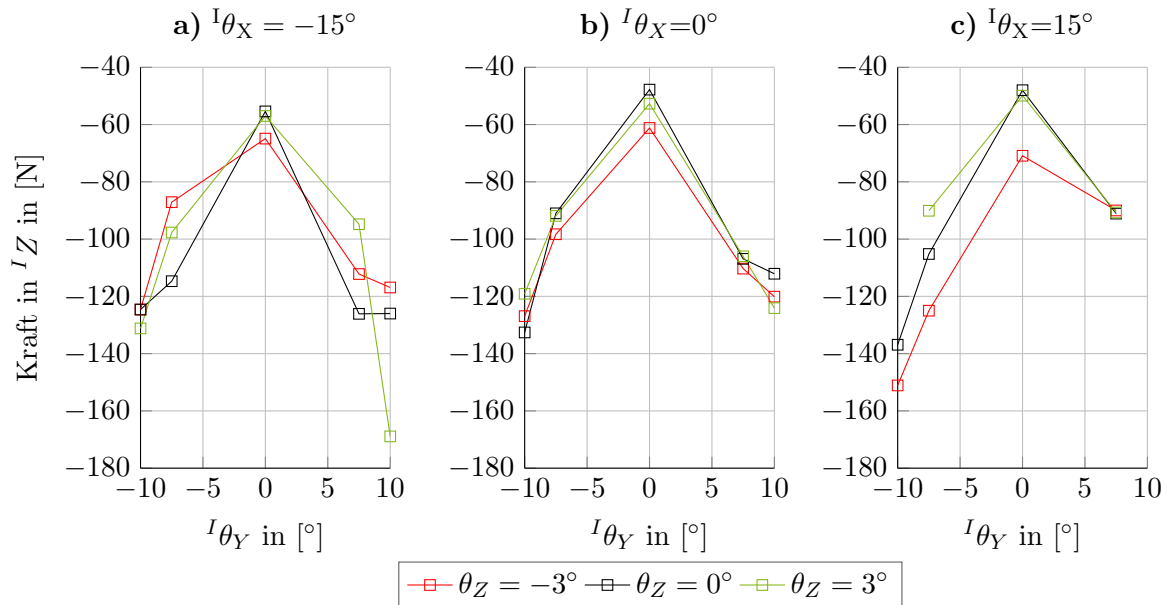
**Tabelle 7.14:** Einsteckdauer bei halbiertem Proportionalfaktor  $\lambda(|\mathbf{e}|)$  mit ( $\lambda_0 = 1$ ,  $\lambda_\infty = 0,1$  und  $\lambda'_0 = 15$ )

${}^I\theta_Y$	<b>Einsteckdauer</b>
$-10^\circ$	151 s
$0^\circ$	153 s
$10^\circ$	319 s

Eine eindeutige Abhängigkeit zwischen Einsteckdauer und der Inletorientierung  ${}^I\theta_Z$  kann anhand der erfassten Daten aus den Tabellen 7.11 bis 7.13 nicht erkannt werden. Der untersuchte Winkelbereich ist jedoch erheblich kleiner als für  ${}^I\theta_X$  und  ${}^I\theta_Y$ . Im Folgenden werden die Einsteckkräfte für die vorliegenden Versuche untersucht.

## 7.2.5 Wirkende Kräfte und Momente

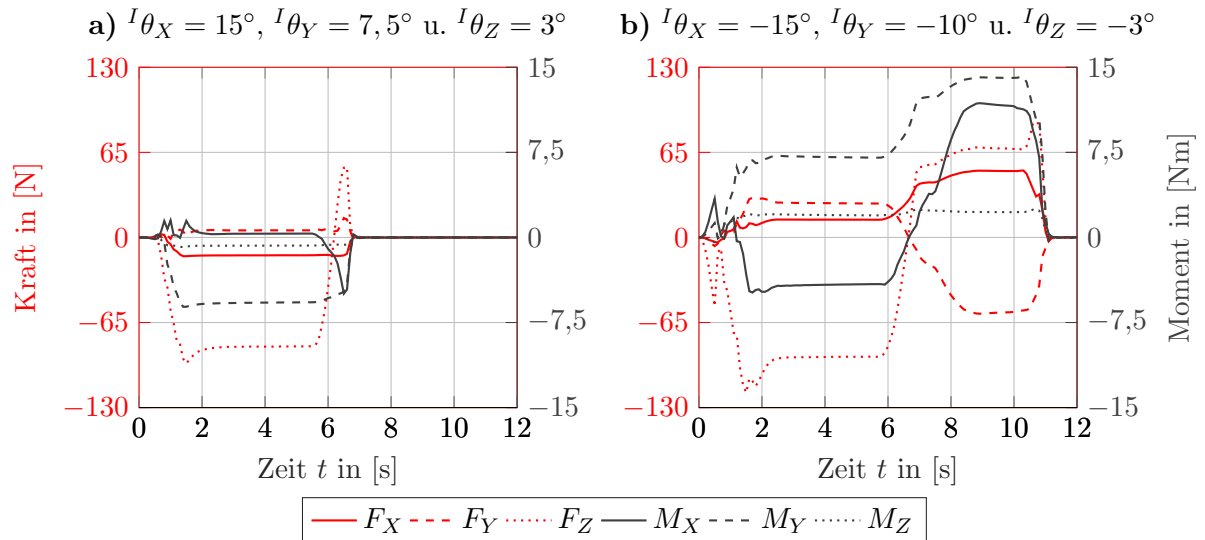
Zunächst wird die maximal wirkende Einsteckkraft in  ${}^IZ$ -Richtung beim Einsteckvorgang betrachtet. Die maximalen über die bis zu fünf Mal wiederholten Versuche gemittelten Kräfte werden in den **Abbildungen 7.19 a)** bis **c)** für die Versuchsreihe mit elastischer Kompensation aufgeführt. Es ist wie zu erwarten festzustellen, dass die Kräfte für  ${}^I\theta_Y = 0^\circ$  und  ${}^I\theta_Z = 0^\circ$  bei allen drei untersuchten Inletwinkeln  ${}^I\theta_X \in \{-15^\circ, 0^\circ, 15^\circ\}$  betragsmäßig am geringsten sind, da kein elastischer Ausgleich notwendig ist. Bei einer Variation des Inletwinkels  ${}^I\theta_Z$  steigt die Einsteckkraft betragsmäßig geringfügig an. Durch den sehr geringen möglichen Variationsbereich können hier keine erheblichen Kraftanstiege erwartet werden. Der Winkelbereich ist durch die fehlende Selbstzentrierung wesentlich eingeschränkt.



**Abbildung 7.19:** Gemittelte (bis zu fünf Mal wiederholte Versuche) Kraftniveaus der maximalen Einsteckkräfte in  ${}^IZ$ -Richtung abhängig von der Orientierung des Inlets

Die Änderung der Inletorientierung  ${}^I\theta_Y$  zeigt für alle  ${}^I\theta_X$  vergleichbare Kraftniveaus in den Abbildungen 7.19 a) bis c). Mit betragsmäßig zunehmendem Winkel  ${}^I\theta_Y \neq 0^\circ$  steigt die erforderliche Einsteckkraft. Anhand der beiden **Abbildungen 7.20 a) und b)** kann die ansteigende Einsteckkraft bei zunehmendem Winkel  ${}^I\theta_Y$  gezeigt werden. In a) wird der Kraftverlauf für den Einsteckvorgang bei einer Inletorientierung von  ${}^I\theta_X = 15^\circ$ ,  ${}^I\theta_Y = 7,5^\circ$  und  ${}^I\theta_Z = 3^\circ$  dargestellt. Wie auch bereits anhand den Abbildungen 7.12 a) bis f) wird keine wesentliche Kraft in  ${}^IY$ -Richtung und somit auch lediglich ein geringes Moment  $M_X$  beim Einstecken aufgeprägt. Durch die Rotation um  ${}^I\theta_Y$  von  $7,5^\circ$  wirkt jedoch eine Kraft in  ${}^IX$ -Richtung und ein Drehmoment  $M_Y$  von  $-6,1$  Nm auf das Inlet ein. Die Einsteckkraft in  ${}^IZ$ -Richtung liegt durch die erhöhte Reibungskraft und die erforderliche Überwindung elastischer Verformung innerhalb der Ausgleichseinheit betragsmäßig bei maximal  $96,3$  N. Insgesamt sind die Kraft- und Momentenverläufe vergleichbar mit denen aus der ersten Versuchsreihe aus Abschnitt 7.1.6 mit dem Unterschied, dass eine erhöhte Kraft in  ${}^IX$ -Richtung und ein höheres Moment  $M_Y$  wirkt.

In Abbildung 7.20 b) wird mit der Inletorientierung  ${}^I\theta_X = -15^\circ$ ,  ${}^I\theta_Y = -10^\circ$  und  ${}^I\theta_Z = -3^\circ$  ein Grenzfall dargestellt, bei dem der Stecker automatisch eingesteckt, aber nicht herausgezogen werden kann. Die Einsteckkraft in  ${}^IZ$ -Richtung erreicht betragsmäßig einen maximalen Wert von  $118,6$  N. Anhand des Verlaufs für  $F_Z$  ist zu Beginn des Einsteckvorgangs ein kurzzeitiger Ausschlag bis zu  $-52,6$  N zu erkennen. Dieser ist auf ein Anstoßen während der linearen Steckbewegung mit anschließendem Reingleiten des Steckers in das Inlet zurückzuführen. Bei einer betragsmäßig größeren Rotation  ${}^I\theta_Z$  kommt es zu häufigem Anstoßen bis auch zu vollständigem Verkanten durch die mangelnde Selbstzentrierung in der Rotation um die  ${}^IZ$ -Achse. Anhand des Momentenverlaufs  $M_Y$  während des Einsteckvorgangs ist festzustellen, dass hier bereits ein Moment von bis zu  $7,2$  Nm aufgeprägt wird und dieses auch über die gesamte Zeit des eingesteckten Zustands aufgeprägt bleibt. Ebenfalls wird ein Moment  $M_X$  von  $-4,8$  Nm erreicht, welches bei



**Abbildung 7.20:** Kraft- und Momentenverläufe für die Inletposition zum Laderoboter bei  ${}^{cs}Y = 750$  mm und  ${}^{cs}Z = 740$  mm. Das Bezugssystem ist das Koordinatensystem ( $FM$ ) der Messdose.

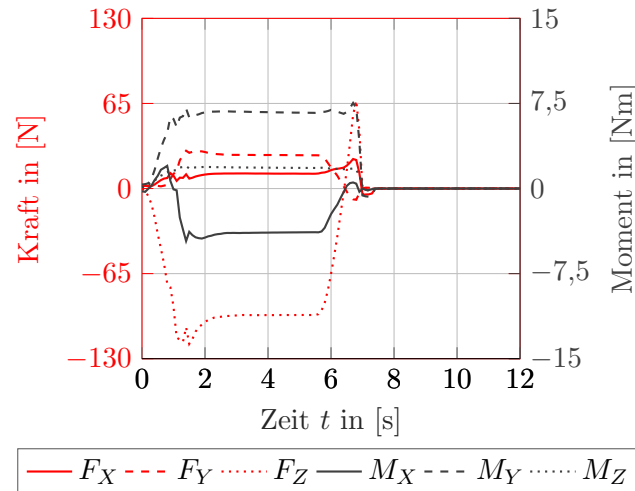
einer idealen Einsteckbewegung nicht wirken würde. Anhand des zeitlichen Verlaufs ist jedoch festzustellen, dass das Moment um die  ${}^IX$ -Achse zeitlich versetzt erst bei Erreichen einer höheren Einsteckkraft von  $F_Z = 74,8$  N von 0 Nm auf  $-4,8$  Nm betragsmäßig ansteigt. Hier ist anzunehmen, dass die Mechanik des Roboterarms der Belastung nicht gerecht wird und diese elastisch nachgibt. Durch die Nachgiebigkeit der Mechanik wird ein Moment um die  ${}^IX$ -Achse aufgeprägt.

Wie bereits beschrieben, kann das Ausstecken nicht erfolgreich durchgeführt werden. Anhand der Momentenverläufe  $M_X$  und  $M_Y$  ist zu sehen, dass die Momente auf bis zu 11,9 Nm und 14,1 Nm ansteigen. Zurückzuführen ist das auf die ansteigenden Kräfte in  ${}^IX$ - und  ${}^IY$ -Richtung bei  $t = 6$  s. Die lineare Aussteckbewegung mit  $\Delta X = 0$  mm ist unzureichend. Durch die hohe Reibung im eingesteckten Zustand in Kombination mit dem nach oben geneigten Inlet ( ${}^I\theta_X = -15^\circ$ ) kann nicht erfolgreich ausgesteckt werden. Bei  $t = 9$  s stellt sich ein Plateau in den Kraft- und Momentenniveaus ein, welches durch Erreichen der maximalen Drehmomente der Antriebe zustande kommt. Lediglich durch menschliche Unterstützung ist es möglich, bei  $t = 10,5$  s den Aussteckvorgang durchzuführen. Ein Ansatz zur Reduzierung der Querkräfte ist eine Anpassung der linearen Bewegung für das Herausziehen des Steckers nach dem Ladevorgang. Durch die Posenbestimmung während des VS2 kann die Inletorientierung  ${}^I\theta_Y$  ermittelt werden, mit der in der Aussteckbewegung eine translatorische Bewegung in  ${}^{cs}X$ -Richtung des Ladesystems durchgeführt werden kann. Bei einer linearen Aussteckbewegung von  $\Delta{}^{cs}Z = 100$  mm wird abhängig von  ${}^I\theta_Y$  das Ziel der translatorischen Bewegung wie folgt angepasst

$$\Delta{}^{cs}X = \tan({}^I\theta_Y) \cdot \Delta{}^{cs}Z. \quad (7.4)$$

Die Inletorientierung  ${}^I\theta_Y$  kann der Posenbestimmung anhand  ${}^c\theta_{Y_M}$  entnommen werden. Mithilfe der Anpassung kann die Pose aus Abbildung 7.20 b) erfolgreich ausgesteckt werden, wie in **Abbildung 7.21** anhand der Kraft- und Momentverläufe gezeigt wird. Durch die Bewegung in

${}^{cs}X$ -Richtung während des Aussteckens steigt die Querkraft  $F_X$  und somit auch das Moment  $M_Y$  nicht weiter an und der Stecker verklemmt somit nicht im Inlet (vergleiche Abb. 7.20).



**Abbildung 7.21:** Kraft- und Momentenverläufe bei angepasster Aussteckbewegung nach Gl. 7.4 für  ${}^{cs}Y = 750$  mm und  ${}^{cs}Z = 740$  mm und  ${}^I\theta_X = -15^\circ$ ,  ${}^I\theta_Y = -10^\circ$ ,  ${}^I\theta_Z = -3^\circ$ . Das Bezugssystem ist das Koordinatensystem ( $FM$ ) der Messdose.

### 7.3 Ergebniszusammenfassung und Diskussion

In den beiden vorherigen Abschnitten 7.1 und 7.2 wurde der entwickelte Laderoboter und die entworfene Ladeprozedur anhand von Versuchsplänen untersucht und evaluiert. Anhand des ersten Versuchsplans, bei dem kein elastischer Ausgleich notwendig war, konnten Erfolgsquoten von insgesamt 93,5% im untersuchten Arbeitsraum erreicht werden. Wurden lediglich die Posen berücksichtigt, die mindestens einmal gesteckt werden konnten, wurde eine Erfolgsquote von über 98% erreicht. Hieraus lässt sich zunächst schließen, dass das entwickelte System mit der ausgewählten Strategie der Inlet-Posenbestimmung geeignet für das automatische Laden von Elektrofahrzeugen ist. Identifizierte Fehler beim Durchführen des Versuchsplans waren das Verkanten des Steckers in niedrigen Steckhöhen des Arbeitsraums, aber auch vor allem fehlerhafte Posenbestimmungen oder auch das Nichterkennen der Marker und deren Anordnung. Durch die Fehler in der Posenbestimmung war entweder die PTP-Vorpositionierung zu ungenau, sodass die Marker anschließend nicht vollständig im Bild zu erkennen sind oder die Marker wurden zu Beginn während des Suchens in  ${}^{cs}X$ -Richtung nicht vollzählig oder mit unzureichender Plausibilität erkannt. Die Untersuchungen der Einsteckdauern hat ergeben, dass die Dauer abhängig von der Inletorientierung  ${}^I\theta_X$  ist. Hierbei spielt die Position der Kamera zwischen AC- und DC-Anteil des Steckers eine wesentliche Rolle, da es bei rotatorischen Bewegungen des Kopfes bzw. Steckers zu einem schnelleren Abschatten durch den längeren DC-Anteil kommt. Dies führt zum Abschatten der Marker und zu daraus resultierenden Fehlern in der Posenbestimmung. Auf Basis der durchgeführten Kraft- und Momentanalyse konnte bezüglich der betragsmäßigen Einsteckkraft keine Abhängigkeit von der Inletorientierung  ${}^I\theta_X$  festgestellt werden. Die durchschnittliche Einsteckkraft lag bei 51,8 N, was unterhalb der händischen Einsteckkraft lag. Dies bekräftigt die Eignung des entwickelten Systems für das automatische Laden.

Innerhalb der zweiten Versuchsreihe wurde die Variation der Inletorientierung um die beiden fehlenden Rotationsachsen  ${}^IY$  und  ${}^IZ$  erweitert, sodass eine elastische Kompensation durch die Ausgleichseinheit erforderlich wurde. Anhand von Vorversuchen hat sich gezeigt, dass eine Anpassung der Zieldistanz für das VS2 notwendig ist, da bei einer Inletorientierung von  ${}^I\theta_Y < 0^\circ$  ein Kontakt zwischen Inlet und Stecker während des VS2 eintreten kann. Die Anpassung der Zieldistanz ist abhängig von der ermittelten Inletorientierung aus der Posenbestimmung, was eine ausreichende Genauigkeit der Posenbestimmung voraussetzt. Anhand der Steckversuche wurde eine Erfolgsquote von 87,6% bezüglich des erfolgreichen Einsteckens erreicht. Erfolgreich ausgesteckt wurde bei 78,6%. Neben den zu hohen Kräften beim Herausziehen oder dem Verkannten beim Einstecken wurde festgestellt, dass fehlerhafte Posenbestimmungen bei  ${}^I\theta_Y$  zu mehr als doppelt so langen Einsteckdauern und sogar zum Verlust der Marker im VS1 führen können. Eine Reduzierung der Querkräfte konnte mithilfe einer Anpassung der Aussteckbewegung abhängig von der ermittelten Inletorientierung  ${}^I\theta_Y$  im VS2 erzielt werden. Auch hier ist die Anpassung abhängig von der Genauigkeit der Posenbestimmung zwischen Kamera und Markern. Eine weitere Reduzierung der Querkräfte und Momente ist von einer Roboter-Kalibrierung zu erwarten. Durch diese können Abweichungen zwischen Soll- und Istposition des automatischen Stecksystems und somit auch die lineare Steckbewegung korrigiert werden. Auf Basis der hier erzielten Ergebnisse wird dies jedoch nicht als zwingend erforderlich eingeschätzt.

Angesichts der hier aufgeführten Punkte wird deutlich, dass die drei untersuchten Aspekte Erfolgsquote, Einsteckdauer und die wirkenden Kräfte und Momente im Wesentlichen von der Genauigkeit und der Robustheit der Posenerkennung zwischen Kamera und Marker abhängig sind. Wie bereits im Stand der Technik beschrieben, werden von diversen Einrichtungen verschiedene Ansätze der Inletlokalisierung und der Posenbestimmung verwendet. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen in Kapitel 6 zeigen, dass die Genauigkeit der Inlet-Posenbestimmung mit zunehmendem Abstand und somit auch zunehmendem Sichtfeld abnimmt. Dies kann, mithilfe der Steckversuche bestätigt, zu Problemen bei der Suche der Marker aber auch bei der PTP-Vorpositionierung führen. Zudem führen fehlerhafte Posenbestimmung zum einen zu fehlerhaftem Regelverhalten während des Visual Servoings, was zu erhöhtem Zeitbedarf für das automatische Stecken, aber auch zum vollständigen Abbruch führen kann. Innerhalb dieser Arbeit zeigt sich, dass mit den IR-LEDs zuverlässig und wiederholt eingesteckt werden kann und dass bei Auswahl dieser Hardware und der entwickelten Ladeprozedur keine geeignete Alternative zur Inlet-Posenbestimmung ermittelt werden konnte. Insgesamt können anhand der durchgeführten Versuche Probleme aufgeführt und identifiziert werden und gleichzeitig bei idealen Bedingungen Erfolgsquoten von bis 98% erreicht werden.

## 8 Wirtschaftliche Bedeutung und Handlungsempfehlung

Die beschriebene Problemstellung aus Kapitel 3 zeigt die Wichtigkeit der Entwicklung eines automatischen induktiven Ladesystems. Aufgrund der steigenden Anzahl an neu zugelassenen Elektrofahrzeugen wird die Thematik des elektrischen Ladens zunehmend präsenter. Für die Umsetzung des angestrebten Ziels des autonom fahrenden Fahrzeugs ist das automatische Laden eines Fahrzeugs die Grundvoraussetzung. In diesem Forschungsfeld werden aktuell diverse Unternehmungen durchgeführt, um das automatische Laden sowohl induktiv als auch induktiv voranzutreiben. Zudem nimmt das Interesse etablierter Automobilhersteller sowie von Herstellern manueller Ladesystemen zu. Für die Entwicklung und die anschließende Markteinführung ist es entscheidend, alle konzeptionellen Möglichkeiten eines automatischen Ladesystems vollständig zu analysieren, um keine voreiligen Schlüsse zu ziehen oder auch mögliche Lösungen ununtersucht zu lassen.

Das automatische Laden von Elektrofahrzeugen ist ebenfalls ein Teil des *Automated Valet Parking*, bei dem sich das Fahrzeug selbstständig und fahrerlos einen Parkplatz sucht und ohne menschliche Hilfe geladen werden kann [KMM<sup>+</sup>21], [SBT<sup>+</sup>16]. So können hohe Parkdichten erreicht werden und durch das automatische Rotieren der Fahrzeuge an den gegebenen automatischen Ladesystemen, werden keine Ladestationen unnötig lange blockiert und die Fahrzeuge können auf Basis einer definierten Priorisierung geladen werden. Diese Arbeit trägt dazu bei, sowohl die mechanische Entwicklung automatischer Ladesysteme als auch die vollständige Untersuchung eines Systems voranzutreiben.

Das in dieser Arbeit entwickelte automatische Ladesystem zeigt ein innovatives mechanisches Konzept, welches basierend auf einem vorherigen Forschungsprojekt weiterentwickelt und für den Einsatz im öffentlichen Raum umgestaltet wurde. Neben dem mechanischen System wird innerhalb dieser Arbeit eine Genauigkeitsuntersuchung für die IR-LEDs aktive Marker und für zwei weitere Strategien zur Inleerkennung durchgeführt. Die Ergebnisse können ebenfalls für die Normung des automatischen Ladens verwendet werden und dienen einer qualitativen Orientierungshilfe für die Auswahl einer standardisierten Strategie. Die ermittelten Vor- und Nachteile der einzelnen Vorgehen können lediglich für die Verwendung der hier ausgewählten Hardware und des entwickelten Versuchsaufbaus als gültig erachtet werden. Bei Verwenden einer abweichenden Kamera oder einer Änderung der Kameraposition außerhalb des Steckers sind abweichende Ergebnisse zu erwarten.



Anhand der vollständigen Untersuchung des Prototyps und der dazu entwickelten automatischen Lade-prozedur lässt sich eine Handlungsempfehlung formulieren, die sowohl der nationalen als auch der internationalen Normung eine Entscheidungshilfe sein kann. Dabei geht es vor allem um die Fragen, welcher Arbeitsraum eines automatischen Ladesystems abgedeckt werden kann, welche erfolgreichen Einsteckquoten, welcher Zeitbedarf und welche wirkenden Kräfte und Momente am Fahrzeuginlet zu erwarten sind. Die Vorstellung eines Ladesystems mit weniger als sechs aktiv regelbaren Freiheitsgraden zeigt, dass mit Hilfe einer elastischen Ausgleichseinheit wiederholbare erfolgreiche Einsteckversuche durchgeführt werden können, was eine kostengünstige Herstellung eines Ladesystems für den breiten Markt bedeuten kann. Zudem liefern die Untersuchungen Bereiche und Tendenzen, die die Genauigkeiten des automatischen Parkens spezifizieren und so Anforderungen an das Fahrzeug, aber auch an die Gestaltung von Parkplätzen und deren Umgebungen definieren. Demnach haben die Ergebnisse dieser Arbeit sowohl für die Unternehmen auf Seiten der zu Verfügung stellenden Infrastruktur als auch auf Seiten der Automobilhersteller eine hohe wirtschaftliche Bedeutung.

An dieser Stelle sei anzumerken, dass alle Untersuchungen unter Laborbedingungen durchgeführt wurden und somit keine allgemeingültige Aussage für den Einsatz unter Realbedingungen mit sich ändernden Lichtverhältnissen, Wind und Regen oder sogar dem Bewegen des Fahrzeugs während des Einsteckvorgangs getroffen werden kann. Das Vorgehen der Untersuchung kann jedoch auf die Durchführung unter Realbedingungen überführt werden und ebenfalls an allen bereits entwickelten und noch zukünftig zu entwickelnden automatischen Ladesystemen umgesetzt werden.

Basierend auf den Ergebnissen kann eine Handlungsempfehlung formuliert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte System und die dafür entwickelte Prozedur unter Laborbedingungen geeignet für das automatische induktive Laden von Elektrofahrzeugen ist. Anhand der Analyse der verschiedenen Strategien der Inlet-Posenbestimmung wurde gezeigt, dass das Einsetzen von IR-LEDs als aktive Marker wesentliche Vorteile gegenüber dem hier verwendeten AprilTag oder auch dem trainierten neuronalen Netzwerk hat. Die IR-LEDs werden im gesamten Untersuchungsbereich erkannt und die Genauigkeit der Posenbestimmung ist sowohl aus größerer Entfernung als auch bei der Zieldistanz für die Einsteckbewegung ausreichend. Der AprilTag kann bei dieser Größe oder der hier genutzten Kamera nur aus kurzer Distanz detektiert werden, während das trainierte neuronale Netzwerk sowohl in der Erkennung als auch der Genauigkeit der Posenbestimmung unzureichend ist. Diese Aspekte sind in Zukunft unter Realbedingungen des automatischen Steckens und dem Verwenden weiterer diverser Hardware zu evaluieren, um abschließend eine Strategie für das automatische induktive Laden auszuwählen und zu standardisieren. Neben den hier aufgeführten Punkten ist als Vorteil der aktiven Marker ebenfalls die Möglichkeit der Identifikationsprüfung durch Blinken zu nennen. Dies ermöglicht eine direkte Überprüfung der Zuordnung von Fahrzeug zu Ladestation, die nicht lediglich über WLAN erfolgt. Anhand der hier ermittelten Vor- und Nachteile der einzelnen Strategie wird im Rahmen dieser Arbeit das Standardisieren der IR-LEDs als aktive Marker empfohlen.

Des Weiteren kann basierend auf der hohen Anzahl an untersuchten Steckversuchen empfohlen werden, dass das Inlet parallel und dem Stecker entsprechend ausgerichtet orientiert ( ${}^I\theta_X = {}^I\theta_Y = {}^I\theta_Z = 0^\circ$ ) sein sollte. Somit können sowohl die Dauer des automatischen Einsteckvorgangs als auch die wirkenden Kräfte und Momente am Inlet minimiert werden. Die vertikale Ausrichtung wird vom Hersteller bestimmt und sollte für das automatische Stecken  ${}^I\theta_X = 0^\circ$  betragen. Auch die Orientierung  ${}^I\theta_Z$  wird vom Hersteller bestimmt und sollte ebenfalls null sein. Die Orientierung  ${}^I\theta_Y$  wird durch die Genauigkeit des Parkens bestimmt. Um die Kräfte und Momente zu minimieren sind die Anforderungen sowohl an das Fahrzeug und die Inletorientierung als auch an die Genauigkeit des Parkens zu standardisieren.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines automatischen konduktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge vorgestellt. Basierend auf einer Analyse und dem Zusammentragen des Standes der Technik wurde eine notwendige Entwicklung eines innovativen automatischen Ladesystems und dessen vollständige Untersuchung abgeleitet. Dabei wurde sich auf die verschiedenen Kategorien der bisher entwickelten Prototypen, aber auch die unterschiedlichen Ansätze der Inleterkennung konzentriert. Es ergab sich ein Forschungspotential aufbauend auf den Ergebnissen des Forschungsprojekts ALanE, bei dem erste Vorteile einer kompakten Bauweise und einer möglichst vom Umgebungslicht unabhängigen Inleterkennung mithilfe von Infrarot-LEDs deutlich wurden. So resultierte das vorgestellte Vorhaben der Entwicklung eines neuen automatischen Laderoboters und dessen Evaluierung und Analyse.

Zunächst wurde in Kapitel 4 die Entwicklung des Ladesystems anhand einer mit Industriepartnern erstellten Anforderungsliste erläutert. Eine Kinematik für den öffentlichen Raum wurde entwickelt und ausgearbeitet. Dabei wurde sich darauf konzentriert, dass eine möglichst kompakte Bauweise mit einer geringen Tiefe entsteht, um das Ladesystem sowohl in Parkhäusern als auch auf Parkplätzen im Außenbereich mit geringem Platzangebot einsetzen zu können. Des Weiteren konnten zwei rotatorisch aktiv angesteuerte Freiheitsgrade durch das Entwickeln einer elastischen Ausgleichseinheit am Stecker eingespart werden, sodass die bewegte Masse bei gleichzeitiger Erhöhung der Sicherheit reduziert wurde und zusätzlich eine Reduzierung der Kosten ermöglicht wurde. Für die Bildverarbeitung wurde basierend auf dem Forschungsprojekt ALanE das Konzept des Verwendens von Infrarot-LEDs am Inlet und einer kostengünstigen Endoskopkamera mit vorgeschaltetem Infrarotpassfilter im Stecker verwendet und weiterentwickelt, da dieses das am wenigsten untersuchte Verfahren im Bereich des automatischen Ladens von Elektrofahrzeugen ist. Das Verwenden von vier anstatt drei IR-LEDs ermöglichte das eindeutige Bestimmen einer Pose zwischen Kamera und Markern mit allen sechs Freiheitsgraden.

Die Entwicklung der Steuerung und der Prozedur des automatischen Einsteckvorgangs innerhalb des Open-Source Frameworks ROS wurde anschließend in Kapitel 5 erläutert. Die Prozedur wurde in mehrere einzelne Schritte, wie dem ersten Suchen nach den IR-LEDs, der PTP-Vorpositionierung, einer Identifikationsprüfung, dem Visual Servoing bis zum Erreichen der Einsteckposition und dem abschließenden automatischen Einstecken unterteilt. Hierfür wurde eine Plausibilitätsprüfung zur Gewährleistung einer zu jeder Zeit korrekten Zuordnung von allen detektierten Blobs im Bild entwickelt, um kein Fehlverhalten des Ladesystems bei Erkennen von nicht zugehörigen Merkmalen hervorzurufen. Die relative Pose zwischen Kamera im Stecker und IR-LEDs im Inlet erfolgte über einen PnP-Algorithmus, mit dem nach erstmaligem Detektieren eine PTP-Vorpositionierung eingeleitet wurde. Ein Vorteil, den das Verwenden von aktiven

Markern in Form der IR-LEDs lieferte, ist die Möglichkeit einer Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesystem unabhängig einer separaten WLAN-Kommunikation. Aus diesem Grund wurde eine Identifikationsprüfung eingeführt, bei der durch Blinken zweier definierter IR-LEDs ein ASCII-Code übermittelt wurde und dieser durch die Bildverarbeitung aufgenommen werden konnte. Somit wurde eine Möglichkeit geschaffen, eine Überprüfung durchzuführen, mit der die Richtigkeit des vor dem Ladesystem geparkten Fahrzeugs gewährleistet werden kann. Für das anschließende Visual Servoing, welches in zwei Abschnitte unterteilt wurde, konnten Genauigkeitsuntersuchungen durchgeführt werden, die die gewählten Zielgrößen als geeignet bestätigten. Zusammengefasst wurde bis zu diesem Punkt ein vollständiges System inklusive aller mechanischer Komponenten und der gesamten Regelung und Bildverarbeitung entwickelt.

Anschließend wurde eine Untersuchung der Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit IR-LEDs hinsichtlich der Genauigkeit im Arbeitsraum des entwickelten automatischen Ladesystems durchgeführt. Dabei wurden Bewertungskriterien wie Sichtbarkeit und erfolgreiche Detektion der Marker im Arbeitsraum, ausreichende Genauigkeit für die PTP-Vorpositionierung und ausreichende Genauigkeit für das automatische Einstecken bei Erreichen der Zieldistanz definiert. All diese Kriterien wurden von der Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit IR-LEDs unter Laborbedingungen erfüllt. Um qualitative Vor- und Nachteile der hier verwendeten aktiven Marker für die Posenbestimmung des Inlets mit passiven oder keinen zusätzlichen Markern am Inlet gegenüberzustellen, wurde die Genauigkeitsuntersuchung analog mit einem AprilTag als passiver Marker und einem trainierten neuronalen Netzwerk zu Erkennung des Inlets durchgeführt. Dabei konnte beim AprilTag und dem neuronalen Netzwerk sowohl eine erhöhte Abhängigkeit vom Umgebungslicht als auch eine höhere Abhängigkeit von der Schärfe des Bildes bzw. der Kamera ermittelt werden. Ein automatisches Einstecken mithilfe der beiden alternativen Strategien wurde anhand der Bewertungskriterien und des hier entwickelten Ladesystems als nicht möglich bewertet.

Für die Evaluierung des Gesamtsystems wurden zunächst Bewertungskriterien wie Steckerfolg, benötigte Zeit und am Inlet wirkende Kräfte und Momente definiert. Anhand einer Vielzahl an Versuchen innerhalb des Arbeitsraumes des Ladesystems konnte gezeigt werden, dass das erfolgreiche Stecken mit einer Erfolgsquote von bis zu 98,2% durchgeführt wurde. Im Rahmen der Versuche, konnten jedoch ebenfalls Probleme wie das fehlerhafte Detektieren von LEDs aus größerer Entfernung oder erforderliche Optimierungen bei der Mechanik identifiziert werden. Des Weiteren wurde gezeigt, dass durch das eingeschränkte Sichtfeld der Kamera aufgrund der Kontur des Steckers eine Abhängigkeit bei der Dauer des Einsteckvorgangs von der Inletneigung vorliegt. Durch den längeren DC-Anteil des Steckers wird das Sichtfeld im unteren Bereich erheblich eingeschränkt, wodurch das Rotieren des Steckers zu Fehlern in der IR-LED Erkennung führen kann. Die gemessenen Kräfte und Momente zeigen, dass das Ladesystem unabhängig von der Inletneigung  $^I X$  nahezu gleich viel Kraft benötigt und somit die Posenbestimmung anhand der Marker ausreichend genau für die vier aktiv gesteuerten Freiheitsgrade durchgeführt werden konnte. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass auch bei Inletneigungen, die von dem hier entwickelten Ladesystem nicht aktiv ausgeregelt werden konnten, wiederholt erfolgreich eingesteckt

wurden. Mithilfe der elastischen Ausgleichseinheit stiegen die Steckkräfte abhängig von der Inletneigung  $^IY$  um ein Vielfaches an. Ein mögliches Verkanten beim Herausziehen des Steckers konnte durch eine Anpassung der linearen Bewegung abhängig von der ermittelten Inlet-Pose behoben werden. Insgesamt wurde das entwickelte System unter Laborbedingungen als geeignet für das automatische konduktive Laden von Elektrofahrzeugen bewertet, auch wenn die Erfolgsquote des automatischen Steckens bei großen Inletneigungen, hervorgerufen durch schiefen Parken, sinkt und die wirkenden Kräfte und Momente ansteigen.

Basierend auf den vorherigen Ergebnissen wurde die wirtschaftliche Bedeutung erarbeitet und eine Handlungsempfehlung für die das zukünftige Vorgehen und eine mögliche Standardisierung formuliert. Diesbezüglich wurde die Strategie der Inlet-Posenbestimmung mit aktiven Markern wie den IR-LEDs als zielführend bewertet und für die einheitliche Verwendung empfohlen. Zudem werden Anforderungen wie die Orientierung des Inlets am Fahrzeug definiert, um die benötigte Zeit für das automatische Stecken, aber auch um die wirkenden Kräfte und Momente am Inlet zu minimieren.

In Zukunft ist zu untersuchen, ob das entwickelte System vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der hier betrachteten Bewertungskriterien unter Realbedingungen erzielen kann. Es ist zu ermitteln, wie robust das Ladesystem bei verschiedenen Randbedingungen wie Sonneneinstrahlung aus unterschiedlichen Winkeln und einer sich wechselnden Intensität, Regen, Wind oder auch unvorhersehbaren Bewegungen des Fahrzeugs ist. Zudem sind weitere Optimierungen bei der elastischen Ausgleichseinheit notwendig, um die wirkenden Kräfte und Momente bei einem schief parkenden Fahrzeug zu verringern und gleichzeitig die Erfolgsquote zu erhöhen. Hinsichtlich der Erkennung der IR-LEDs stellt sich die Frage, ob diese bei Sonneneinstrahlung von hoher Intensität weiterhin sichtbar bleiben oder diese nicht mehr zu detektieren sind. Des Weiteren ist zu untersuchen, ob mit anderen Kameras und auch mit einer anderen gewählten Positionen der Kamera vergleichbare Ergebnisse bei Verwenden von aktiven, passiven oder keinen Markern am Inlet erreicht werden können. Die Weiterentwicklung der Bilderkennung mittels neuronalem Netzwerk bietet das größte Forschungspotential eines automatischen konduktiven Ladesystems ohne zusätzliche Modifikationen am Fahrzeug.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Laderoboter des Unternehmens <i>Innogy SE</i> . . . . .	3
2.2	Schnellladeeinrichtung des Unternehmens <i>Electrify America</i> . . . . .	3
2.3	Mobiler Laderoboter <i>CarLa</i> der <i>Volkswagen AG</i> in Kooperation mit <i>Kuka</i> . . . . .	4
2.4	Mobiler Laderoboter <i>EVAR</i> der <i>Samsung Group</i> . . . . .	4
2.5	Schlangenartige Ladeeinheit von <i>Tesla Inc.</i> . . . . .	5
2.6	Automatischer Laderoboter mit einer Kabelzugkinematik . . . . .	5
2.7	Laderoboter im Forschungsprojekt <i>ALanE</i> . . . . .	6
2.8	Inlet im Projekt <i>ALanE</i> . . . . .	7
2.9	Bildverarbeitung im Projekt <i>ALanE</i> . . . . .	8
2.10	Fangraumanalyse . . . . .	9
2.11	Inleterkennung ohne Marker . . . . .	11
2.12	Mit passivem Marker Inletlokalisierung . . . . .	13
2.13	Posenbestimmung mithilfe von Framemarkern . . . . .	14
2.14	Binarisieren und Blob Detection . . . . .	15
2.15	Beispiel für <i>Freeman chain Code</i> . . . . .	16
2.16	Perspektivische Projektion . . . . .	18
2.17	Geschlossener Regelkreis . . . . .	22
2.18	Grundstruktur eines Visual-Servoing Systems . . . . .	23
2.19	Visual Servoing Ansätze . . . . .	24
2.20	Grundbausteine von ROS . . . . .	26
3.1	Vorgehensweise und Zielsetzung . . . . .	30
4.1	Konzeptionierung der Roboterkinematik [BKK21] . . . . .	34
4.2	Armkonstruktion des automatischen Ladesystems . . . . .	35
4.3	Zahnriemenkonzept . . . . .	36
4.4	Ausgleichseinheit . . . . .	36
4.5	Konstruktion mit Außenmaßen . . . . .	37
4.6	CCS-Steckermodifikation . . . . .	38
4.7	Inletmodifikation . . . . .	39
5.1	RQT-Graph des Steuerungsaufbaus in ROS . . . . .	42
5.2	Kamerakalibrierung . . . . .	43
5.3	Schematische Abhängigk. für die Spindellänge und der res. Bewegung des Unterarms	44
5.4	Funktionsverläufe für den Spindeltrieb des Unterarms . . . . .	45
5.5	Ablauf der automatischen Ladeprozedur . . . . .	47

5.6	Plausibilitätsprüfung anhand unterschiedlicher Entfernungen . . . . .	49
5.7	Dynamische Graustufenfunktion . . . . .	50
5.8	Aufnahmen der Blob Detektion bei dyn. Graustufenschw. und var. Abstand . . .	51
5.9	Genauigkeitsbetrachtung für die PTP-Vorpositionierung . . . . .	53
5.10	Datenübertragung mittels Clock-Data . . . . .	53
5.11	Block Diagramm des 2 1/2 D Visual Servoings . . . . .	54
5.12	Dynamischer Proportionalfaktor . . . . .	56
5.13	Genauigkeitsbetrachtung der Posenbestimmung durch Bildrauschen . . . . .	57
5.14	Posenrauschen bei Zielpose von VS2 . . . . .	59
5.15	Ablaufschritte der automatischen Ladeprozedur . . . . .	60
6.1	Arbeitsraum des Roboterarms . . . . .	63
6.2	Mögliche Inletorientierungen beim schrägen Parken . . . . .	65
6.3	Versuchsstand für die Genauigkeitsuntersuchung der Posenbestimmung . . . . .	67
6.4	Kamerakalibrierung ohne IR-Passfilter . . . . .	69
6.5	Abweichung zw. ermittelter u. Soll-Pose bei den Abständen ${}^cZ_{M,ref}$ . . . . .	73
6.6	Genauigkeitsunters. der Inlet-Posenbest. für die PTP-Vorpos. mit IR-LEDs . . .	74
6.7	AprilTag an analoger Position wie IR-LEDs . . . . .	77
6.8	Bildaufnahmen (RAW) des AprilTags bei unterschiedlicher Entfernung . . . . .	79
6.9	Abweichung zw. ermittelter u. Soll-Pose bei den Abständen ${}^cZ_{AT,ref}$ . . . . .	80
6.10	Generierung des Trainingssets in UE4 mit NDDS Plug-in . . . . .	83
6.11	Erstes Erkennen und Erweiterung des neuronalen Netzwerks auf AC-Anteil . . .	85
6.12	Bildaufnahme (RAW) für Inlet-Posenerkennung bei ${}^cZ_{I,ref} = 60$ mm . . . . .	86
6.13	Inlet-Posenbestimmung mit DOPE bei unterschiedlicher Entfernung . . . . .	87
6.14	Genauigkeitsunters. der Inlet-Posenbest. für die PTP-Vorpos. mit DOPE . . . . .	88
6.15	Inlet-Posenerkennung bezogen auf den AC-Teil bei ${}^cZ_{I,ref} = 130$ mm . . . . .	89
6.16	Inlet-Posenerkennung bezogen auf den AC-Teil bei unterschiedlicher Entfernung .	89
7.1	Arbeitsraum des Roboterarms u. Positionen inkl. Orientierung der Steckversuche	93
7.2	Inlethalterung für Versuchsdurchführung . . . . .	95
7.3	Konstanter Offset von ${}^cY = 2$ mm nach dem VS2 . . . . .	96
7.4	Erweiterter Suchprozess . . . . .	97
7.5	Steckversuche im Arbeitsraum . . . . .	99
7.6	Fehlerhafte Steckversuche im Arbeitsraum . . . . .	100
7.7	IR-LEDs außerhalb des Blickfelds nach der PTP-Vorpositionierung . . . . .	101
7.8	Fehlerhafte Posenbestimmung . . . . .	102
7.9	Eingeschränkte Bewegungsfreiheit während des VS durch Verdecken der IR-LEDs	104
7.10	Visual Servoing Positions- und Rotationsfehler Verlauf für ${}^I\theta_X \in \{-15^\circ, 0^\circ, 15^\circ\}$	105
7.11	Kraft- und Momentenverläufe für das automatische Einstecken verschiedener In- letposen. Das Bezugssystem ist das Koordinatensystem ( $FM$ ) der Messdose. . .	109
7.12	Kraft- und Momentenverläufe für den von Hand eingesteckten Stecker. Das Be- zugssystem ist das Koordinatensystem ( $FM$ ) der Messdose. . . . .	110
7.13	Mögliche Inletorientierungen beim realen schiefen Parken . . . . .	112

---

7.14	Vorversuch für ${}^I\theta_Y = 12,5^\circ$ . . . . .	113
7.15	Kraft- und Momentenverläufe für den Vorversuch ${}^I\theta_Y = 12,5^\circ$ . . . . .	114
7.16	Abstände zwischen Inlet und Stecker beim Regeln auf ${}^cZ_M = 60\text{ mm}$ . . . . .	115
7.17	Änderung der Zieldistanz ${}^cZ_{M,\text{ref}}$ beim VS2 durch Anpassung ${}^cZ_{M,\text{ref}}({}^I\theta_Y)$ . . . . .	116
7.18	Visual Servoing Positions- und Rotationsfehler Verlauf für ${}^I\theta_Y \in \{-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ\}$ . . . . .	119
7.19	Kraftniveaus der max. Einsteckkr. in ${}^IZ$ -Richtung abh. von der Inletorient. . . . .	121
7.20	Kraft- und Momentenverläufe bei elastischer Kompensation . . . . .	122
7.21	Kraft- und Momentenverläufe bei angepasster Aussteckbewegung . . . . .	123
A.1	Durchlässiger Wellenlängenbereich des IR-Passfilters HWB850 . . . . .	XXX
A.2	Fehlerhafte Erkennung durch falschen Graustufenwert außerhalb des Bereichs . . . . .	XXXI
D.1	Abweichung zw. ermittelter u. Soll-Pose bei den Abständen ${}^cZ_{I,\text{ref}}$ für DOPE Inlet . . . . .	XLIII
D.2	Abweichung zw. ermittelter u. Soll-Pose bei den Abständen ${}^cZ_{I,\text{ref}}$ für AC . . . . .	XLIV



# Tabellenverzeichnis

2.1	Ermittelte Grenzwerte der möglichen nicht korrelierenden Abweichungen [Ber15]	10
2.2	Ermittelte und untersuchte Grenzwerte bei korrelierenden Abweichungen [Ber15]	10
4.1	Anforderungen an den Laderoboter . . . . .	32
4.1	Anforderungen an den Laderoboter . . . . .	33
4.2	Anordnung der IR-LED Marker ${}^M\mathbf{P}_i$ . . . . .	40
5.1	Geometrische Längen der Roboterkinematik . . . . .	45
5.2	Zielposen und Genauigkeitsanforderungen für beide Visual Servoing . . . . .	55
5.3	Genauigkeit der Posenbestimmung mit verwendeter Kamera . . . . .	58
6.1	Bereiche für die Genauigkeitsuntersuchungen der Inletdetektionsstrategien . . . . .	65
6.2	Bewertungskriterien für die Untersuchung der Inlet-Posenbestimmung . . . . .	66
6.3	Verschiebung des TCPs durch Inletaufhängung am UR10 . . . . .	68
6.4	Versuchsplan für den Vergleich der Inletdetektionsstrategien . . . . .	70
6.5	Gemittelte Abweichungen und Standardabweichungen für IR-LEDs . . . . .	72
6.6	Gemittelte Abweichungen und Standardabweichungen für den AprilTag . . . . .	78
6.7	Datensätze für das Training des neuronalen Netztes . . . . .	84
6.8	Bereiche für die Genauigkeitsunters. der Inlet-Posenbestimmung mit DOPE . . . . .	86
6.9	Gemittelte Abw. und Standardabw. für die Inlet-Posenbestimmung mit DOPE . . . . .	87
6.10	Gemittelte Abw. und Standardabw. für die Inlet-Posenbest. (AC-Teil) mit DOPE . . . . .	88
7.1	Untersuchungskrit. zur Bew. des Laderoboters u. der Ladeprozedur . . . . .	94
7.2	Steckversuche im Arbeitsraum mit variablem Steckwinkel ${}^I\theta_X$ . . . . .	98
7.3	Dauer der Einsteckversuche im Arbeitsraum bei variablem Steckwinkel ${}^I\theta_X$ . . . . .	103
7.4	Durchschnittliche Einsteckdauer abhängig von ${}^I\theta_X$ des Inlets . . . . .	104
7.5	Steckkräfte in ${}^IZ$ -Richtung im Arbeitsraum bei variablem Steckwinkel ${}^I\theta_X$ . . . . .	107
7.6	Durchschnittliche Einsteckkraft in ${}^IZ$ -Richtung abhängig von ${}^I\theta_X$ des Inlets . . . . .	108
7.7	Zu untersuchende Winkelbereiche bei Nutzung der elastischen Ausgleichseinheit . . . . .	112
7.8	Elastische Nachgiebigkeit bei ${}^I\theta_X = -15^\circ$ . . . . .	117
7.9	Elastische Nachgiebigkeit bei ${}^I\theta_X = 0^\circ$ . . . . .	117
7.10	Elastische Nachgiebigkeit bei ${}^I\theta_X = 15^\circ$ . . . . .	117
7.11	Durchschnittliche Einsteckdauer bei elastischer Kompensation und ${}^I\theta_X = -15^\circ$ . . . . .	118
7.12	Durchschnittliche Einsteckdauer bei elastischer Kompensation und ${}^I\theta_X = 0^\circ$ . . . . .	118
7.13	Durchschnittliche Einsteckdauer bei elastischer Kompensation und ${}^I\theta_X = 15^\circ$ . . . . .	118
7.14	Einsteckdauer bei halbiertem Proportionalfaktor $\lambda( \mathbf{e} )$ . . . . .	120

---

A.1	Technische Daten der Endsokopkamera . . . . .	XXX
A.2	Technische Daten der Logitech C920 Pro HD Webcam . . . . .	XXXI
C.1	Technische Daten des kollaborierenden Roboters UR10 . . . . .	XXXIII
D.1	Versuchsplan ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 60$ mm . . . . .	XXXIV
D.3	Datensätze für das Training des neuronalen Netztes (AC-Teil) . . . . .	XLII

## Literaturverzeichnis

- [AABM19] ABBAS, Syed M. ; ASLAM, Salman ; BERNS, Karsten ; MUHAMMAD, Abubakr: Analysis and Improvements in AprilTag Based State Estimation. In: *Sensors* 19 (2019), Nr. 24. <http://dx.doi.org/10.3390/s19245480>. – DOI 10.3390/s19245480. – ISSN 1424–8220
- [And15] ANDERSEN, THOMAS TIMM: Optimizing the Universal Robots ROS driver. (2015). <https://orbit.dtu.dk/en/publications/optimizing-the-universal-robots-ros-driver>
- [ASMG20] ALI, I. ; SUOMINEN, O. J. ; MORALES, E. R. ; GOTCHEV, A.: Multi-View Camera Pose Estimation for Robotic Arm Manipulation. In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 174305–174316. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3026108>. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.3026108
- [AW18] ACUNA, Raul ; WILLERT, Volker: Robustness of control point configurations for homography and planar pose estimation. In: *CoRR* abs/1803.03025 (2018). <http://arxiv.org/abs/1803.03025>
- [Ban09] BANKMAN, Isaac (Hrsg.): *Handbook of Medical Image Processing and Analysis*. 2. Aufl. s.l. : Elsevier professional, 2009. – ISBN 978–0–12–373904–9. – <https://dx.org/10.1016/B978-0-12-373904-9.X0001-4> - DOI 10.1016/B978-0-12-373904-9.X0001-4
- [Ban18] BANNO, Atsuhiko: A P3P problem solver representing all parameters as a linear combination. In: *Image and Vision Computing* 70 (2018), 55–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.imavis.2018.01.001>. – DOI 10.1016/j.imavis.2018.01.001. – ISSN 0262–8856
- [BCJM16] BERNHARD WALZEL ; CHRISTOPHER STURM ; JÜRGEN FABIAN ; MARIO HIRZ: Automated robot-based charging system for electric vehicles. In: BARGENDE, Michael (Hrsg.) ; REUSS, Hans-Christian (Hrsg.) ; WIEDEMANN, Jochen (Hrsg.): *16. Internationales Stuttgarter Symposium*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016 (Proceedings). – ISBN 978–3–658–13254–5. – <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-13255-2> - DOI 10.1007/978-3-658-13255-2
- [BDF<sup>+</sup>19] BEHL, M. ; DUBRO, J. ; FLYNT, T. ; HAMEED, I. ; LANG, G. ; PARK, F.: Autonomous Electric Vehicle Charging System. In: *2019 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, 2019. – ISBN 978–1–7281–0998–5, S. 1–6. – <http://dx.doi.org/10.1109/SIEDS.2019.8735620> - DOI 10.1109/SIEDS.2019.8735620

- [Ber15] BERGMANN, Tobias: *Fangraumanalyse zur Beurteilung eines Stecksystems*, TU Dortmund, Unveröffentlichte Fachwissenschaftliche Projektarbeit, 2015
- [BETv08] BAY, Herbert ; ESS, Andreas ; TUYTELAARS, Tinne ; VAN GOOL, Luc: Speeded-Up Robust Features (SURF). In: *Computer Vision and Image Understanding* 110 (2008), Nr. 3, S. 346–359. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.014>. – DOI 10.1016/j.cviu.2007.09.014. – ISSN 10773142
- [BF15] BABEZKI, Robert ; FÜHRER, Thomas: *Steckverbinderteil mit einer Ausgleichsrichtung: Patent*. 14.01.2015
- [BKK21] BUCHER, Jens ; KNIPSCHILD, Jan ; KÜNNE, Bernd: Development and evaluation of an automatic connection device for electric cars with four DOFs and a control scheme based on infrared markers. In: *International Journal of Mechatronics and Automation* 8 (2021), Nr. 4, S. 175–186. <http://dx.doi.org/10.1504/IJMA.2021.10043805>. – DOI 10.1504/IJMA.2021.10043805. – ISSN 2045–1059
- [BKK23] BUCHER, Jens ; KNIPSCHILD, Jan ; KÜNNE, Bernd: Abschlussbericht des Forschungsprojekts ALaPuN - Automatisches Ladesystem für PKWs und leichte Nutzfahrzeuge. (2023). – bei Abgabe der vorliegenden Dissertation noch unveröffentlicht
- [BL15] BAZARGANI, Hamid ; LAGANIERE, Robert: Camera Calibration and Pose Estimation from Planes. In: *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 18 (2015), 12, S. 20–27. <http://dx.doi.org/10.1109/MIM.2015.7335834>. – DOI 10.1109/MIM.2015.7335834
- [BM20] BOWMAN, James ; MIHELICH, Patrick: *camera calibration*. [http://wiki.ros.org/camera\\_calibration](http://wiki.ros.org/camera_calibration). Version: 2020
- [BMHB18] BROMMER, Christian ; MALYUTA, Danylo ; HENTZEN, Daniel ; BROCKERS, Roland: Long-Duration Autonomy for Small Rotorcraft UAS Including Recharging. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, oct 2018, S. arXiv:1810.05683. – <https://dx.doi.org/10.1109/iros.2018.8594111> - DOI 10.1109/iros.2018.8594111
- [Bou89] BOUTHEMY, P.: A maximum likelihood framework for determining moving edges. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11 (1989), Nr. 5, S. 499–511. <http://dx.doi.org/10.1109/34.24782>. – DOI 10.1109/34.24782
- [Bru09] BRUNELLI, Roberto: *Template matching techniques in computer vision: Theory and practice*. Chichester, U.K : Wiley, 2009. – ISBN 978-0-470-51706-2. – <https://dx.doi.org/10.1002/9780470744055> - DOI 10.1002/9780470744055
- [Bun18] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR ; SYNTHESBERICHT AUS DER DISSERTATION BEREITSTELLUNG ÖFFENTLICHER LADEINFRASTRUKTUR FÜR ELEKTROFAHRZEUGE - EINE ÖKONOMISCHE ANALYSE VON JUSTUS REINKE (Hrsg.): *Konduktive Ladeverfahren*. <https://www>.

- forschungsinformationssystem.de/servlet/is/426895/. Version: 30.11.2018, Abruf: 08.09.2019
- [BV22] BV, ROCSYS: *Technology - Autonomous Charging*. <https://www.rocsys.com/technology/>. Version: 2022, Abruf: 25.03.2022
- [CH07] CHAUMETTE, F. ; HUTCHINSON, S.: Visual servo control. II. Advanced approaches [Tutorial]. In: *IEEE Robotics Automation Magazine* 14 (2007), Nr. 1, S. 109–118. <http://dx.doi.org/10.1109/MRA.2007.339609>. – DOI 10.1109/MRA.2007.339609
- [CMS<sup>+</sup>12] CHAUMETTE, F. ; MARCHAND, E. ; SPINDLER, F. ; TALLONNEAU, R. ; YOL, A.: *Computer vision algorithms*. 2012
- [Col14] COLEMAN DAVID, T.: *Reducing the Barrier to Entry of Complex Robotic Software: a MoveIt! Case Study*
- [DBCK13] DONG, Suyang ; BEHZADAN, Amir H. ; CHEN, Feng ; KAMAT, Vineet R.: Collaborative visualization of engineering processes using tabletop augmented reality. In: *Advances in Engineering Software* 55 (2013), S. 45–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.09.001>. – DOI 10.1016/j.advengsoft.2012.09.001. – ISSN 09659978
- [DH72] DUDA, Richard O. ; HART, Peter E.: Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. In: *Communications of the ACM* 15 (1972), Nr. 1, S. 11–15. <http://dx.doi.org/10.1145/361237.361242>. – DOI 10.1145/361237.361242. – ISSN 0001–0782
- [DL95] DANIEL F. DEMENTHON ; LARRY S. DAVIS: Model-based object pose in 25 lines of code. In: *International Journal of Computer Vision* 15 (1995), Nr. 1, S. 123–141. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01450852>. – DOI 10.1007/BF01450852. – ISSN 1573–1405
- [Dru16] DRUST, Manuel: *Entwicklung eines Sensorsystems und eines Verfahrens zur Berechnung der Roboterpose auf Basis von projizierten Strukturen*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2016. <http://dx.doi.org/10.18419/opus-8986>. – DOI 10.18419/opus-8986
- [ECR92] ESPIAU, B. ; CHAUMETTE, F. ; RIVES, P.: A new approach to visual servoing in robotics. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 8 (1992), Nr. 3, S. 313–326. <http://dx.doi.org/10.1109/70.143350>. – DOI 10.1109/70.143350. – ISSN 1042296X
- [Ele19] ELECTRIFY AMERICA ; ELECTRIFY AMERICA (Hrsg.): *Electrify America And Stable Announce Collaboration to Deploy Robotic Fast-Charging Facility for Self-Driving Electric Vehicle Fleets*. [https://media.electrifyamerica.com/gallery?types\[\]=image](https://media.electrifyamerica.com/gallery?types[]=image). Version: 2019, Abruf: 15.10.2019

- [FB81] FISCHLER, Martin A. ; BOLLES, Robert C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. In: *Commun. ACM* 24 (1981), Juni, Nr. 6, 381–395. <http://dx.doi.org/10.1145/358669.358692>. – DOI 10.1145/358669.358692. – ISSN 0001–0782
- [FCD<sup>+</sup>14] FITZPATRICK, Paul ; CESERACCIU, Elena ; DOMENICHELLI, Daniele ; PAIKAN, Ali ; METTA, Giorgio ; NATALE, Lorenzo: A middle way for robotics middleware. In: *Journal of Software Engineering for Robotics* Bd. Vol 5 No 2 (2014). 2014. – ISSN 2035–3928, S. 42–49
- [Fia05] FIALA, M.: ARTag, a fiducial marker system using digital techniques. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)* Bd. 2, 2005, S. 590–596. – <https://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2005.74> - DOI 10.1109/CVPR.2005.74
- [FK12] FENG, Chen ; KAMAT, Vineet: Augmented Reality Markers as Spatial Indices for Indoor Mobile AECFM Applications. In: *National Taiwan University*, 2012, S. 235–242. – <https://dx.doi.org/10.13140/2.1.4484.4166> - DOI 10.13140/2.1.4484.4166
- [Fre61] FREEMAN, Herbert: On the Encoding of Arbitrary Geometric Configurations. In: *IEEE Transactions on Electronic Computers* EC-10 (1961), Nr. 2, S. 260–268. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.1961.5219197>. – DOI 10.1109/TEC.1961.5219197. – ISSN 0367–7508
- [Fro21] FROCHTE, Jörg: *Maschinelles Lernen: Grundlagen und Algorithmen in Python*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. München : Hanser, 2021. – ISBN 9783446463554. – <https://dx.doi.org/10.3139/9783446463554> - DOI 10.3139/9783446463554
- [FS06] FRANÇOIS CHAUMETTE ; S. HUTCHINSON: Visual servo control, Part I: Basic approaches. In: *IEEE Robotics and Automation Magazine* 13 (2006), Nr. 4, 82–90. <https://hal.inria.fr/inria-00350283>
- [GG17] GUANGRUI, F. ; GENG, W.: Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment. In: *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*, 2017, S. 79–83. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291357> - DOI 10.1109/ICRAE.2017.8291357
- [GL99] GOULERMAS, J. Y. ; LIATSIS, P.: Incorporating Gradient Estimations in a Circle-Finding Probabilistic Hough Transform. In: *Pattern Analysis & Applications* 2 (1999), Nr. 3, S. 239–250. <http://dx.doi.org/10.1007/s100440050032>. – DOI 10.1007/s100440050032. – ISSN 1433–7541
- [Gru41] GRUNERT, Johann A.: Das Pothenotische Problem in erweiterter Gestalt nebst Über seine Anwendungen in der Geodäsie. In: *Grunerts Archiv für Mathematik und Physik, Band 1* (1841), S. 238–248

- [HAGF16] HASHEMI, Nazanin S. ; AGHDAM, Roya B. ; GHIASI, Atieh Sadat B. ; FATEMI, Parastoo: *Template Matching Advances and Applications in Image Analysis*. <https://arxiv.org/pdf/1610.07231>. Version: 2016
- [Har21] HARIK, El Houssein C.: Design and Implementation of an Autonomous Charging Station for Agricultural Electrical Vehicles. In: *Applied Sciences* 11 (2021), Nr. 13, S. 6168. <http://dx.doi.org/10.3390/app11136168>. – DOI 10.3390/app11136168
- [Hay16] HAYASHI, Junya: *groove-x/mqtt.bridge*. [https://github.com/groove-x/mqtt\\_bridge](https://github.com/groove-x/mqtt_bridge). Version: 2016
- [HBS<sup>+</sup>15] HYUNGAN OH ; BYUNGCHUL AN ; SMITH, A. L. ; RAGHAVAN, M. ; PARK, F. C.: An RFID localization algorithm for a plug-in electric vehicle recharging robot. In: *2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2015, S. 176–177. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICCE.2015.7066369> - DOI 10.1109/ICCE.2015.7066369
- [HHC96] HUTCHINSON, S. ; HAGER, G. D. ; CORKE, P. I.: A tutorial on visual servo control. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12 (1996), Nr. 5, S. 651–670. <http://dx.doi.org/10.1109/70.538972>. – DOI 10.1109/70.538972. – ISSN 1042296X
- [HLON91] HARALICK, Robert ; LEE, Deukhee ; OTTENBURG, K. ; NÖLLE, Michael: Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem. In: *1991 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1991. – ISBN 0–8186–2148–6, S. 592 – 598. – <https://dx.doi.org/10.1109/CVPR.1991.139759> - DOI 10.1109/CVPR.1991.139759
- [HMGZ18] HUANG, Panfeng ; MENG, Zhongjie ; GUO, Jian ; ZHANG, Fan: Chapter 3 - Pose Measurement Based on Vision Perception. Version: 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812309-6.00003-8>. In: ZHANG, Fan (Hrsg.) ; LIU, Jian G. (Hrsg.) ; HUANG, Panfeng (Hrsg.) ; MENG, Zhongjie (Hrsg.): *Tethered space robot*. London : Academic Press, 2018. – DOI 10.1016/B978-0-12-812309-6.00003-8. – ISBN 978-0-12-812309-6, 75–119
- [HZ04] HARTLEY, Richard ; ZISSERMAN, Andrew: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. Cambridge University Press, 2004. – <https://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511811685> - DOI 10.1017/CBO9780511811685
- [IMH02] IPIÑA, Diego López-de ; MENDONCA, Paulo ; HOPPER, Andy: TRIP: a Low-Cost Vision-Based Location System for Ubiquitous Computing. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 6 (2002), 05, S. 206–219. <http://dx.doi.org/10.1007/s007790200020>. – DOI 10.1007/s007790200020
- [Inn19] INNOGY SE: *Roboter zeigt automatisches Schnellladen*. <https://news.innogy.com/roboter-zeigt-automatisches-schnellladen/>. Version: 2019, Ab-ruf: 08.09.2019

- [JC18] JOSEPH, Lentin ; CACACE, Jonathan: *Mastering ROS for Robotics Programming: Design, build, and simulate complex robots using the Robot Operating System*. Second Edition. Birmingham : Packt Publishing Limited, 2018. – ISBN 978–1–78847–895–3
- [JKF13] JOCHEM, Patrick ; KASCHUB, Thomas ; FICHTNER, Wolf: How to integrate electric vehicles in the future energy system? / Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2013. (Working Paper Series in Production and Energy). – Forschungsbericht. – ISSN 2196–7296. – <https://dx.doi.org/10.5445/IR/1000035023> - DOI 10.5445/IR/1000035023
- [Jos18] JOSEPH, Lentin: *Robot Operating System for Absolute Beginners: Robotics Programming Made Easy*. Berkeley, CA : Apress, 2018 <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1821599>. – ISBN 9781484234051. – <https://dx.doi.org/10.1007/978-1-4842-3405-1> - DOI 10.1007/978-1-4842-3405-1
- [Kar15] KARLE, Anton: *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis*. 1. Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl., 2015. – ISBN 978–3–44–644417–1. – <https://dx.doi.org/10.3139/9783446444171> - DOI 10.3139/9783446444171
- [KB99] KATO, Hirokazu ; BILLINGHURST, Mark: Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmentedreality conferencing system, 1999. – ISBN 0–7695–0359–4, S. 85–94. – <https://dx.doi.org/10.1109/IWAR.1999.803809> - DOI 10.1109/IWAR.1999.803809
- [KC14] KERMORGANT, Olivier ; CHAUMETTE, Francois: Dealing With Constraints in Sensor-Based Robot Control. In: *IEEE Transactions on Robotics* 30 (2014), Nr. 1, S. 244–257. <http://dx.doi.org/10.1109/TRO.2013.2281560>. – DOI 10.1109/TRO.2013.2281560. – ISSN 1552–3098
- [KFS13] KNEIP, L. ; FURGALE, P. ; SIEGWART, R.: Using multi-camera systems in robotics: Efficient solutions to the NPnP problem. In: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, S. 3770–3776. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2013.6631107> - DOI 10.1109/ICRA.2013.6631107
- [KFW20] KALLWIES, Jan ; FORKEL, Bianca ; WUENSCH, Hans-Joachim: Determining and Improving the Localization Accuracy of AprilTag Detection. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, 2020. – ISBN 978–1–7281–7395–5, S. 8288–8294. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197427> - DOI 10.1109/ICRA40945.2020.9197427
- [KK21] KRONER, Markus ; KUCKUCK, Carsten: *Automatisierte Ladevorrichtung zum konduktiven Laden von batterieelektrischen Fahrzeugen*. 2021. – DE 10 2020 115 440 A1 , DE Patent Offenlegungsschrift
- [KKS96] KLETTE, Reinhard ; KOSCHAN, Andreas ; SCHLÜNS, Karsten: *Computer Vision: Räumliche Information aus digitalen Bildern*. Wiesbaden and s.l. : View-



- eg+Teubner Verlag, 1996 (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-11999-9>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-11999-9>. – ISBN 978-3-663-11999-9
- [KLS14] KNEIP, Laurent ; LI, Hongdong ; SEO, Yongduek: UPnP: An Optimal  $O(n)$  Solution to the Absolute Pose Problem with Universal Applicability. In: *Computer Vision – ECCV 2014*. Springer International Publishing, 2014, S. 127–142. – [https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10590-1\\_9](https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10590-1_9)
- [KMM<sup>+</sup>21] KNEISSL, Maximilian ; MADHUSUDHANAN, Anil K. ; MOLIN, Adam ; ESEN, Hasan ; HIRCHE, Sandra: A Multi-Vehicle Control Framework With Application to Automated Valet Parking. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 22 (2021), Nr. 9, S. 5697–5707. – ISSN 1524-9050. – <https://dx.doi.org/10.1109/TITS.2020.2990294> - DOI 10.1109/TITS.2020.2990294
- [Kou19] KOUBAA, Anis (Hrsg.): *Studies in Computational Intelligence*. Bd. 778: *Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 3)*. Cham : Springer International Publishing, 2019. – ISBN 9783319915906. – <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-91590-6> - DOI 10.1007/978-3-319-91590-6
- [KPS17] KARAMI, Ebrahim ; PRASAD, Siva ; SHEHATA, Mohamed: *Image Matching Using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: Performance Comparison for Distorted Images*. <http://dx.doi.org/10.48550/ARXIV.1710.02726>. Version: 2017
- [KR17] KE, Tong ; ROUMELIOTIS, Stergios I.: An Efficient Algebraic Solution to the Perspective-Three-Point Problem. In: *CoRR* abs/1701.08237 (2017). <http://dx.doi.org/10.48550/ARXIV.1701.08237>. – DOI 10.48550/ARXIV.1701.08237
- [Kra14] KRAUTWALD, Tim: *Entwicklung eines Manipulators zur automatischen, konduktiven Fahrzeug-Netz-Kopplung: Konstruktionssystematische Entwicklung und Auslegung eines Manipulators*, TU Dortmund, Unveröffentlichte Masterarbeit, 2014
- [KSS11] KNEIP, L. ; SCARAMUZZA, D. ; SIEGWART, R.: A novel parametrization of the perspective-three-point problem for a direct computation of absolute camera position and orientation. In: *CVPR 2011*, 2011, S. 2969–2976. – <https://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2011.5995464> - DOI 10.1109/CVPR.2011.5995464
- [KUK20] KUKA: *KUKA Carla Connect: Charging Robot for Electric Vehicles*. <https://www.red-dot.org/project/kuka-carlaconnect-45874>. Version: 2020, Abruf: 30.08.2021
- [LBN07] LADIKOS, A. ; BENHIMANE, Selim ; NAVAB, Nassir: A real-time tracking system combining template-based and feature-based approaches. In: *VISAPP*, 2007. – <https://dx.doi.org/10.5220/0002042303250332> - DOI 10.5220/0002042303250332
- [LCHL19] LV, Xincan ; CHEN, Guangzeng ; HU, Haopeng ; LOU, Yunjiang: A Robotic Charging Scheme for Electric Vehicles Based on Monocular Vision and Force Perception. In:

- 2019 *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2019, S. 2958–2963
- [LD20] LOU, Y. ; DI, S.: Design of a Cable-Driven Auto-Charging Robot for Electric Vehicles. In: *IEEE Access* 8 (2020), S. 15640–15655. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966528>. – DOI 10.1109/ACCESS.2020.2966528
- [LK81] LUCAS, Bruce ; KANADE, Takeo: An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. In: *Proceedings of the 7th international joint conference on Artificial intelligence 2* (1981), 04, S. 674–679
- [LLF05] LEPETIT, Vincent ; LAGGER, Pascal ; FUA, Pascal: Randomized Trees for Real-Time Keypoint Recognition. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)* Bd. 2, 2005. – ISBN 0-7695-2372-2, S. 775–781 vol. 2. – <https://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2005.288> - DOI 10.1109/CVPR.2005.288
- [LMNF09] LEPETIT, Vincent ; MORENO-NOGUER, Francesc ; FUA, Pascal: EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem. In: *International Journal of Computer Vision* 81 (2009), 02. <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-008-0152-6>. – DOI 10.1007/s11263-008-0152-6
- [Low04] LOWE, David: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2004), 11, S. 91–110. <http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>. – DOI 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94
- [Lue21] LUEDTKE, Mathias: *ros-industrial/ros\_canopen*. [https://github.com/ros-industrial/ros\\_canopen](https://github.com/ros-industrial/ros_canopen). Version: 2021
- [Luh10] LUHMANN, Thomas: *Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften : Reihe C, Dissertationen*. Bd. 645: *Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*. München : Beck, 2010. – ISBN 978-3-7696-5057-0
- [Lun07] LUNZE, Jan: *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 6., neu bearbeitete Aufl. Berlin : Springer, 2007 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783540707905. – <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-70791-2> - DOI 10.1007/978-3-540-70791-2
- [Mü21] MÜLLER, Julian: *Entwicklung einer Versuchsumgebung zur Analyse der Posenbestimmung eines Manipulatorarms*, TU Dortmund, Unveröffentlichte Fachwissenschaftliche Projektarbeit, 2021
- [Man18] MANAGER MAGAZIN: *Diese Autos wachsen am schnellsten*. <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/studie-diese-autos-wachsen-am-schnellsten-a-1206578.html>. Version: 2018, Abruf: 05.11.2021

- [Mar18] MARK KANE: *Bjørn Nyland Visits Samsung's EVAR Autonomous Charging Robot: Video*. <https://insideevs.com/news/339815/bjoern-nyland-visits-samsungs-evar-autonomous-charging-robot-video/>. Version: 2018, Abruf: 15.10.2019
- [MB17] MISTRY, Darshana ; BANERJEE, Asim: Comparison of Feature Detection and Matching Approaches: SIFT and SURF. In: *GRD Journals- Global Research and Development Journal for Engineering 2* (2017), 03, S. 7–13
- [MBH<sup>+</sup>19] MALYUTA, Danylo ; BROMMER, Christian ; HENTZEN, Daniel ; STASTNY, Thomas ; SIEGWART, Roland ; BROCKERS, Roland: Long-duration fully autonomous operation of rotorcraft unmanned aerial systems for remote-sensing data acquisition. In: *Journal of Field Robotics* (2019), August, arXiv:1908.06381. <http://dx.doi.org/10.1002/rob.21898>. – DOI 10.1002/rob.21898
- [MC00] MALIS, Ezio ; CHAUMETTE, François: 2 1/2 D Visual Servoing with Respect to Unknown Objects Through a New Estimation Scheme of Camera Displacement. In: *International Journal of Computer Vision* 37 (2000), 06, S. 79–97. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008181530296>. – DOI 10.1023/A:1008181530296
- [MCB98] MALIS, E. ; CHAUMETTE, Francois ; BOUDET, S.: 2 1/2 D Visual Servoing. INRIA. inria-00073302 (1998). – <https://hal.inria.fr/inria-00073302/document>
- [MCB99] MALIS, E. ; CHAUMETTE, Francois ; BOUDET, S.: 2 1/2 D Visual Servoing. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15 (1999), Nr. 2, S. 238–250. – <https://dx.doi.org/10.1109/70.760345> - DOI 10.1109/70.760345
- [MCM03] MA, Lili ; CHEN, YangQuan ; MOORE, Kevin L.: A Family of Simplified Geometric Distortion Models for Camera Calibration. In: *CoRR* cs.CV/0308003 (2003). <http://dx.doi.org/10.48550/ARXIV.CS/0308003>. – DOI 10.48550/ARXIV.CS/0308003
- [Mic19] MICROSOFT 2019 ; MICROSOFT 2019 (Hrsg.): *Microsoft Robotics Developer Studio 4*. <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=29081>. Version: 2019, Abruf: 21.09.2019
- [MRW<sup>+</sup>17] MISEIKIS, Justinas ; RUTHER, Matthias ; WALZEL, Bernhard ; HIRZ, Mario ; BRUNNER, Helmut: 3D Vision Guided Robotic Charging Station for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles. In: *CoRR* abs/1703.05381 (2017). <http://dx.doi.org/10.48550/ARXIV.1703.05381>. – DOI 10.48550/ARXIV.1703.05381
- [MSC05] MARCHAND, E. ; SPINDLER, F. ; CHAUMETTE, F.: ViSP for visual servoing: a generic software platform with a wide class of robot control skills. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12 (2005), Nr. 4, S. 40–52. <http://dx.doi.org/10.1109/MRA.2005.1577023>. – DOI 10.1109/MRA.2005.1577023. – ISSN 1070–9932
- [MUS16] MARCHAND, E. ; UCHIYAMA, H. ; SPINDLER, F.: Pose Estimation for Augmented Reality: A Hands-On Survey. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer*

- Graphics* 22 (2016), Nr. 12, S. 2633–2651. <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2015.2513408>. – DOI 10.1109/TVCG.2015.2513408
- [MV07] MALIS, Ezio ; VARGAS, Manuel: Deeper understanding of the homography decomposition for vision-based control. (2007). – Research Report] RR-6303, INRIA. 2007, S.90 inria-00174036v3
- [MVT] MVTEC: HALCON – The power of machine vision. <https://www.mvtec.com/de/produkte/halcon>, Abruf: 17.01.2021
- [Nie21] NIEDER, Thomas: *Datenservice Erneuerbare Energien*. <https://www.zsw-bw.de/mediathek/datenservice.html#c8590>. Version: 2021, Abruf: 06.01.2022
- [Nik11] NIKU, Saeed B.: *Introduction to robotics: Analysis, control, applications*. 2. ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2011. – ISBN 9780470604465
- [NVI20] NVIDIA CORPORATION: *3D Object Pose Estimation with DOPE*. [https://docs.nvidia.com/isaac/packages/object\\_pose\\_estimation/doc/dope.html](https://docs.nvidia.com/isaac/packages/object_pose_estimation/doc/dope.html). Version: 2018-2020, Abruf: 25.01.2022
- [Ols11] OLSON, E.: AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, S. 3400–3407. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2011.5979561> - DOI 10.1109/ICRA.2011.5979561
- [Ope] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION: *Is ROS For Me?* <https://www.ros.org/is-ros-for-me/>, Abruf: 21.09.2019
- [OTM<sup>+</sup>11] OUYANG, Wanli ; TOMBARI, Federico ; MATTOCCIA, Stefano ; DI STEFANO, Luigi ; CHAM, Wai-Kuen: Performance Evaluation of Full Search Equivalent Pattern Matching Algorithms. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2011), 05. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2011.106>. – DOI 10.1109/TPAMI.2011.106
- [Oxf] OXFORD MOBILE ROBOTICS GROUP ; OXFORD MOBILE ROBOTICS GROUP (Hrsg.): *What is MOOS?* <http://www.robots.ox.ac.uk/~mobile/MOOS/wiki/pmwiki.php/Main/Introduction>, Abruf: 21.09.2019
- [PBAN12] PETROV, P. ; BOUSSARD, C. ; AMMOUN, S. ; NASHASHIBI, F.: A hybrid control for automatic docking of electric vehicles for recharging. In: *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, S. 2966–2971. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICRA.2012.6225087> - DOI 10.1109/ICRA.2012.6225087
- [PLH<sup>+</sup>18] PAN, W. ; LYU, M. ; HWANG, K. ; JU, M. ; SHI, H.: A Neuro-Fuzzy Visual Servoing Controller for an Articulated Manipulator. In: *IEEE Access* 6 (2018), S. 3346–3357. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2787738>. – DOI 10.1109/ACCESS.2017.2787738

- [PM05] PRESSIGOUT, Muriel ; MARCHAND, Éric: Real Time Planar Structure Tracking for Visual Servoing: a Contour and Texture Approach. In: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, S. 251 – 256. – <https://dx.doi.org/10.1109/IROS.2005.1545223> - DOI 10.1109/IROS.2005.1545223
- [PN18] PERSSON, Mikael ; NORDBERG, Klas: Lambda Twist: An Accurate Fast Robust Perspective Three Point (P3P) Solver. In: FERRARI, Vittorio (Hrsg.) ; HEBERT, Martial (Hrsg.) ; SMINCHISESCU, Cristian (Hrsg.) ; WEISS, Yair (Hrsg.): *Computer Vision - ECCV 2018*. Cham : Springer International Publishing, 2018 (Image Processing, Computer Vision, Pattern Recognition, and Graphics). – ISBN 978–3–030–01225–0, S. 334–349. – [https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-01225-0\\_20](https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-01225-0_20)
- [PNL<sup>+</sup>13] PÉREZ, Joshué ; NASHASHIBI, Fawzi ; LEFAUDEUX, Benjamin ; RESENDE, Paulo ; POLLARD, Evangeline: Autonomous docking based on infrared system for electric vehicle charging in urban areas. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 13 (2013), Nr. 2, S. 2645–2663. <http://dx.doi.org/10.3390/s130202645>. – DOI 10.3390/s130202645
- [PSLW20] PAN, Ming Q. ; SUN, Cheng ; LIU, Jizhu ; WANG, Yangjun: Automatic recognition and location system for electric vehicle charging port in complex environment. In: *IET Image Process.* 14 (2020), S. 2263–2272. – <https://dx.doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.1138> - DOI 10.1049/iet-ipr.2019.1138
- [PT20] PITZER, Benjamin ; TORIS, Russell: *ros-drivers/usb\_cam*. [https://github.com/ros-drivers/usb\\_cam](https://github.com/ros-drivers/usb_cam). Version: 2020
- [QCG<sup>+</sup>09] QUIGLEY, Morgan ; CONLEY, Ken ; GERKEY, Brian ; FAUST, Josh ; FOOTE, Tully ; LEIBS, Jeremy ; WHEELER, Rob ; NG, Andrew: ROS: an open-source Robot Operating System, 2009
- [QL99] QUAN, Long ; LAN, Zhong-Dan: Linear N-Point Camera Pose Determination. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21 (1999), August, Nr. 8, 774–780. <http://dx.doi.org/10.1109/34.784291>. – DOI 10.1109/34.784291
- [QLL<sup>+</sup>21] QUAN, Pengkun ; LOU, Ya’nan ; LIN, Haoyu ; LIANG, Zhuo ; DI, Shichun: Research on Fast Identification and Location of Contour Features of Electric Vehicle Charging Port in Complex Scenes. In: *IEEE Access* (2021), S. 1. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3092210>. – DOI 10.1109/ACCESS.2021.3092210. – ISSN 2169–3536
- [RD05] ROSTEN, E. ; DRUMMOND, T.: Fusing points and lines for high performance tracking. In: *Tenth IEEE International Conference on Computer Vision*. Los Alamitos, Calif : IEEE Computer Society, 2005. – ISBN 0–7695–2334–X, S. 1508–1515 Vol. 2. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICCV.2005.104> - DOI 10.1109/ICCV.2005.104
- [RE21] RICOLFE-VIALA, CARLOS ; ESPARZA, ALICIA: The Influence of Autofocus Lenses in the Camera Calibration Process. In: *IEEE Transactions on Instrumentation*

- and Measurement* 70 (2021), S. 1–15. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2021.3055793>. – DOI 10.1109/TIM.2021.3055793. – ISSN 1557–9662
- [ROS14] ROS, Wiki: *Concepts*. <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>. Version: 2014, Abruf: 24.08.2020
- [ROS17] ROS, Wiki: *Create your own urdf file*. <http://wiki.ros.org/urdf/Tutorials/Create%20your%20own%20urdf%20file>. Version: 2017, Abruf: 24.08.2020
- [RSO13] RICHARDSON, A. ; STROM, J. ; OLSON, E.: AprilCal: Assisted and repeatable camera calibration. In: *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, S. 1814–1821. – <https://dx.doi.org/10.1109/IROS.2013.6696595> - DOI 10.1109/IROS.2013.6696595
- [SAL09] SYAFARUDY ABU, Mohd. ; LIM, Eng A.: Visual-Based Automatic Coin-Counting System Using Neural Network. In: *MATEMATIKA* 25 (2009), Nr. 2, S. 147–156
- [SBT<sup>+</sup>16] SCHWESINGER, Ulrich ; BURKI, Mathias ; TIMPNER, Julian ; ROTTMANN, Stephan ; WOLF, Lars ; PAZ, Lina M. ; GRIMMETT, Hugo ; POSNER, Ingmar ; NEWMAN, Paul ; HANE, Christian ; HENG, Lionel ; LEE, Gim H. ; SATTLER, Torsten ; POLLEFEYS, Marc ; ALLODI, Marco ; VALENTI, Francesco ; MIMURA, Keiji ; GOEBELSMANN, Bernd ; DERENDARZ, Wojciech ; MUHLFELLNER, Peter ; WONEBERGER, Stefan ; WALDMANN, Rene ; GRYSZYK, Sebastian ; LAST, Carsten ; BRUNING, Stefan ; HORSTMANN, Sven ; BARTHOLOMAUS, Marc ; BRUMMER, Clemens ; STELLMACHER, Martin ; PUCKS, Fabian ; NICKLAS, Marcel ; SIEGWART, Roland: Automated valet parking and charging for e-mobility. In: *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, IEEE, 6/19/2016 - 6/22/2016. – ISBN 978–1–5090–1821–5, S. 157–164. – <https://dx.doi.org/10.1109/IVS.2016.7535380> - DOI 10.1109/IVS.2016.7535380
- [Sch21] SCHRAMM, Christian: *Entwicklung einer markerlosen Posenerkennung eines Elektrofahrzeuginlets für einen Laderoboter*, TU Dortmund, Unveröffentlichte Masterarbeit, 2021
- [Schos] SCHAAL, SEBASTIAN ; ELECTRIVE.NET (Hrsg.): *Electrify America plant Laderoboter für autonome Autos*. <https://www.electrive.net/2019/08/02/electrify-america-arbeitet-an-laderobotern-fuer-autonome-autos/>. Version: Electrify America plant Laderoboter für autonome Autos, Abruf: 08.12.2019
- [SSS<sup>+</sup>17] SAGITOV, Artur ; SHABALINA, Ksenia ; SABIROVA, Leysan ; LI, Hongbing ; MAGID, Evgeni: ARTag, AprilTag and CALTag Fiducial Marker Systems: Comparison in a Presence of Partial Marker Occlusion and Rotation. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 2: ICINCO INSTICC*, SciTePress, 01 2017. – ISBN 978–989–758–264–6, S. 182–191. – <https://dx.doi.org/10.5220/0006478901820191> - DOI 10.5220/0006478901820191

- [SZ15] SIMONYAN, Karen ; ZISSERMAN, Andrew: Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. (2015). <http://dx.doi.org/10.48550/ARXIV.1409.1556>. – DOI 10.48550/ARXIV.1409.1556
- [Tar17] TARAGLIO, Sergio: Robotised Fast Charging of Electric Buses. In: *Italian National Agency For New Technologies, Energy And Sustainable Economic Development, 5.1 Rapporto Tecnico ENEA* (2017). <http://hdl.handle.net/20.500.12079/6767>. – ISSN 0393–3016
- [TL20] TERZAKIS, George ; LOURAKIS, Manolis: A Consistently Fast and Globally Optimal Solution to the Perspective-n-Point Problem. In: VEDALDI, Andrea (Hrsg.) ; BISCHOF, Horst (Hrsg.) ; BROX, Thomas (Hrsg.) ; FRAHM, Jan-Michael (Hrsg.): *Computer Vision – ECCV 2020*. Cham : Springer International Publishing and Imprint: Springer, 2020 (Image Processing, Computer Vision, Pattern Recognition, and Graphics). – ISBN 978–3–030–58452–8, S. 478–494
- [TTM<sup>+</sup>18] TO, Thang ; TREMBLAY, Jonathan ; MCKAY, Duncan ; YAMAGUCHI, Yukie ; LEUNG, Kirby ; BALANON, Adrian ; CHENG, Jia ; HODGE, William ; BIRCHFIELD, Stan: *NDDS: NVIDIA Deep Learning Dataset Synthesizer*. 2018. – [https://github.com/NVIDIA/Dataset\\_Synthesizer](https://github.com/NVIDIA/Dataset_Synthesizer)
- [TTS<sup>+</sup>18a] TREMBLAY, Jonathan ; TO, Thang ; SUNDARALINGAM, Balakumar ; XIANG, Yu ; FOX, Dieter ; BIRCHFIELD, Stan: *Deep Object Pose Estimation - ROS Inference*. [https://github.com/NVlabs/Deep\\_Object\\_Pose](https://github.com/NVlabs/Deep_Object_Pose). Version: 2018, Abruf: 25.01.2022
- [TTS<sup>+</sup>18b] TREMBLAY, Jonathan ; TO, Thang ; SUNDARALINGAM, Balakumar ; XIANG, Yu ; FOX, Dieter ; BIRCHFIELD, Stan: Deep Object Pose Estimation for Semantic Robotic Grasping of Household Objects. In: *CoRR* abs/1809.10790 (2018). <http://arxiv.org/abs/1809.10790>
- [Vis20a] VISP: *Tutorial: Bridge over OpenCV (Camera parameters conversions)*. <https://visp-doc.inria.fr/doxygen/visp-daily/tutorial-bridge-opencv.html>. Version: 2020, Abruf: 08.03.2022
- [Vis20b] VISP: *Tutorial: How to boost your visual servo control law*. <https://visp-doc.inria.fr/doxygen/visp-daily/tutorial-boost-vs.html>. Version: 2020, Abruf: 25.08.2020
- [VLF04] VACCHETTI, Luca ; LEPETIT, Vincent ; FUA, Pascal: Combining Edge and Texture Information for Real-Time Accurate 3D Camera Tracking. In: *Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, 2004. – ISBN 0–7695–2191–6, S. 48–56. – <https://dx.doi.org/10.1109/ISMAR.2004.24> - DOI 10.1109/ISMAR.2004.24
- [Vol18] VOLKSWAGEN AG ; VOLKSWAGEN AG (Hrsg.): *Carla lädt das Auto auf*. <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2018/03/karla-charges-the-car.html>. Version: 2018, Abruf: 15.10.2019

- [WBAK20] WANI, M. A. ; BHAT, Farooq A. ; AFZAL, Saduf ; KHAN, Asif I.: *Studies in big data*. Bd. 57: *Advances in deep learning*. Singapore : Springer, 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-6794-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-6794-6>. – ISBN 978-981-13-6793-9
- [WBRB15] WISSING, Christian ; BRAUN, Jan ; RÖSMANN ; BERTRAM, Thorsten: Entwicklung eines Regelungskonzeptes für einen Knick-Arm-Roboter für das automatisierte Laden. In: *VDI Fachtagung Mechatronik, Dortmund, Deutschland*, 2015, S. 31–36
- [Wie20] WIEGAND, Bastian: *Entwicklung und Implementierung der Steuerung fuer einen automatischen Laderoboter fuer Elektrofahrzeuge im ROS*, TU Dortmund, Unveröffentlichte Masterarbeit, 2020
- [Win16] WINKLER, Alexander: *Sensorgeführte Bewegungen stationärer Roboter*. Dissertation: Universitätsverlag Chemnitz, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/70.538974>. <http://dx.doi.org/10.1109/70.538974>. – ISBN 978-3-944640-78-5
- [WO16] WANG, John ; OLSON, Edwin: AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection. In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 10 2016. – ISBN 978-1-5090-3762-9, S. 4193–4198. – <https://dx.doi.org/10.1109/IROS.2016.7759617> - DOI 10.1109/IROS.2016.7759617
- [Wu18] WU, Jimmy: *Robotic Object Pose Estimation with Deep Neural Networks*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Masterarbeit, 2018
- [WV16] WESSELAK, Viktor (Hrsg.) ; VOSWINCKEL, Sebastian (Hrsg.): *Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2016 (Technik im Fokus). – ISBN 978-3-662-48905-5. – <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48906-2> - DOI 10.1007/978-3-662-48906-2
- [WWB96] WILSON, W. J. ; WILLIAMS HULLS, C. C. ; BELL, G. S.: Relative end-effector control using Cartesian position based visual servoing. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12 (1996), Nr. 5, S. 684–696. <http://dx.doi.org/10.1109/70.538974>. – DOI 10.1109/70.538974. – ISSN 1042296X
- [XD11] XU, Anqi ; DUDEK, G.: Fourier Tag: A Smoothly Degradable Fiducial Marker System with Configurable Payload Capacity. In: *2011 Canadian Conference on Computer and Robot Vision* (2011), S. 40–47. – <https://dx.doi.org/10.1109/CRV.2011.13> - DOI 10.1109/CRV.2011.13
- [XSNF18] XIANG, Yu ; SCHMIDT, Tanner ; NARAYANAN, Venkatraman ; FOX, Dieter: PoseCNN: A Convolutional Neural Network for 6D Object Pose Estimation in Cluttered Scenes. In: *Robotics: Science and Systems XIV*, Robotics: Science and Systems Foundation, 2018. – ISBN 978-0-9923747-4-7. – <https://dx.doi.org/10.15607/RSS.2018.XIV.019> - DOI 10.15607/RSS.2018.XIV.019



- [XXJH03] XIAO-SHAN GAO ; XIAO-RONG HOU ; JIANLIANG TANG ; HANG-FEI CHENG: Complete solution classification for the perspective-three-point problem. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 25 (2003), Nr. 8, S. 930–943. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2003.1217599>. – DOI 10.1109/TPAMI.2003.1217599
- [YHD21] YU, Guoxing ; HU, Yongtao ; DAI, Jingwen: TopoTag: A Robust and Scalable Topological Fiducial Marker System. In: *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 27 (2021), Nr. 9, S. 3769–3780. <http://dx.doi.org/10.1109/TVCG.2020.2988466>. – DOI 10.1109/TVCG.2020.2988466
- [YDPK89] YUEN, H. K. ; PRINCEN, J. ; DLINGWORTH, J. ; KITTLER, J.: A Comparative Study of Hough Transform Methods for Circle Finding. In: BAKER, K. D. (Hrsg.): *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1989*, Alvey Vision Club, 1989, S. 29.1–29.6. – <https://dx.doi.org/10.5244/C.3.29> - DOI 10.5244/C.3.29
- [ZH96] ZHANG, Zhongfei ; HANSON, Allen: 3D Reconstruction Based on Homography Mapping. In: *In ARPA Image Understanding Workshop*, 1996, S. 0249–6399
- [Zha00] ZHANG, ZHENGYOU: A flexible new technique for camera calibration. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22 (2000), Nr. 11, S. 1330–1334. – ISSN 1939–3539. – <https://dx.doi.org/10.1109/34.888718> - DOI 10.1109/34.888718
- [ZKS<sup>+</sup>13] ZHENG, Y. ; KUANG, Y. ; SUGIMOTO, S. ; ÅSTRÖM, K. ; OKUTOMI, M.: Revisiting the PnP Problem: A Fast, General and Optimal Solution. In: *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013, S. 2344–2351. – <https://dx.doi.org/10.1109/ICCV.2013.291> - DOI 10.1109/ICCV.2013.291

# A Anhang - Bildverarbeitung

## A.0.1 Endoskopkamera

Tabelle A.1: Technische Daten der Endsokopkamera: *Voltcraft USB Endoskop BS-26*

Technische Daten	Wert
Eingangsspannung	5V/DC über USB, 200 mA
Kamerasensor	CMOS 1/6'
Kameraauflösung	1600 x 1200 Pixel
Videauflösung	640 x 480 Pixel, 30 FPS
Sichtfeld	54°
Fokussierung	30-60 mm
Kamerakopfdurchmesser	Ø8 mm
Kamerakopflänge	44 mm

## A.0.2 IR-Passfilter

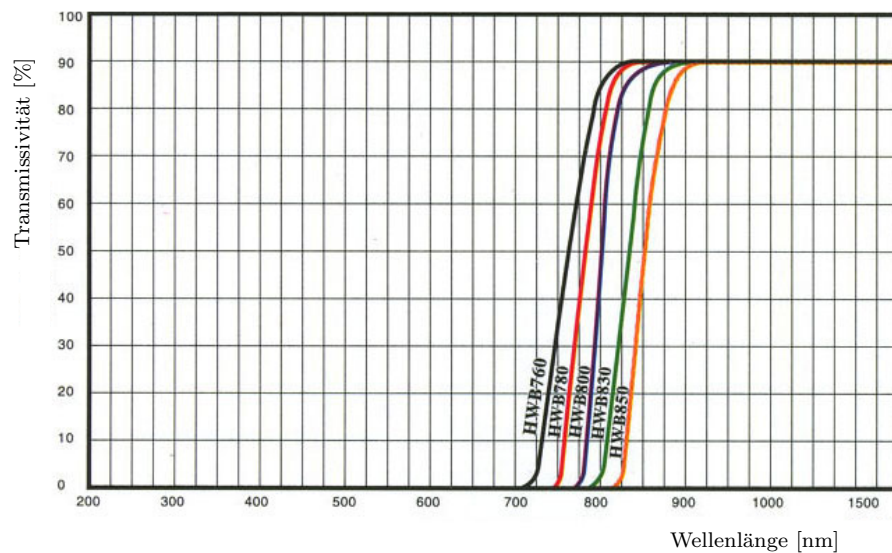


Abbildung A.1: Durchlässiger Wellenlängenbereich des IR-Passfilters HWB850

### A.0.3 IR-LED Blob-Detektion

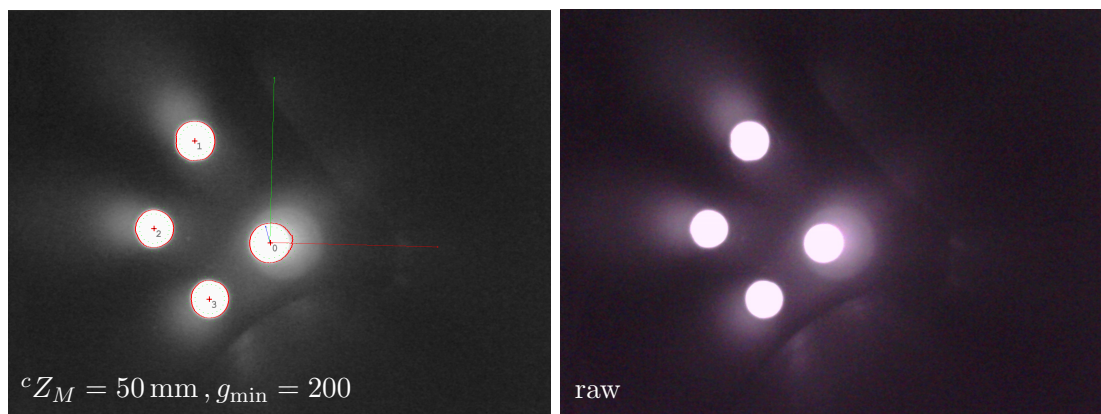


Abbildung A.2: Fehlerhafte Erkennung durch falschen Graustufenwert außerhalb des Bereichs

### A.0.4 Webcam

Tabelle A.2: Technische Daten der *Logitech C920 Pro HD Webcam*

Technische Daten	Wert
Maximale Auflösung	720p - 1080p bei 30 FPS
Fokus	Autofokus
Sichtfeld	78°

## B Anhang - Spindelantrieb des Unterarms

$$\begin{aligned}
\frac{dl}{d\beta} = & (45 \sin(\beta) - 55 \cos(\beta) + (2\sqrt{8501} \cos(2 \arctan(T_2/(T_3)) - \\
& 5757066166353931/9007199254740992)((45 \cos(\beta) + 55 \sin(\beta) - (T_4)/ \\
& (2\sqrt{1045 \cos(\beta) - 855 \sin(\beta) + 4911}))/ (T_3) + \\
& ((55 \cos(\beta) - 45 * \sin(\beta))T_2)/(T_3^2))/((T_2)^2/(T_3)^2 + 1))/ \\
& \sin(2 \arctan(T_2/(T_3))) - (2 \cos(2 \arctan(T_2/(T_3))) * \\
& ((45 \cos(\beta) + 55 \sin(\beta) - (T_4)/(2\sqrt{(1045 * \cos(\beta) - 855 \sin(\beta) + 4911}))/ (T_3) + \\
& ((55 \cos(\beta) - 45 \sin(\beta))T_2)/(T_3^2)(45 \cos(\beta) + 55 \sin(\beta) + \sqrt{8501} * \\
& \sin(2 \arctan(T_2/(T_3)) - 5757066166353931/9007199254740992)))/ \\
& (\sin(2 \arctan(T_2/(T_3)))^2((T_2)^2/(T_3)^2 + 1)) \\
T_2 = & (55 \cos(\beta) - 45 \sin(\beta) - 3\sqrt{6} * \sqrt{1045 \cos(\beta) - 855 \sin(\beta) + 4911} + 513) \\
T_3 = & 45 \cos(\beta) + 55 \sin(\beta) + 55 \\
T_4 = & 3\sqrt{6}(855 \cos(\beta) + 1045 \sin(\beta))
\end{aligned} \tag{B.1}$$

## C Anhang - Kollaborierender Roboter UR10

**Tabelle C.1:** Technische Daten des kollaborierenden Roboters UR10 (*Universal Robots*)

<b>Technische Daten</b>	<b>Wert</b>
Maximale Nutzlast	10 kg
Reichweite	1300 mm
Wiederholgenauigkeit	$\pm 0,1$ mm

# D Anhang - Untersuchung der Posenbestimmung

## D.0.1 Versuchsplan

Tabelle D.1: Versuchsplan  ${}^cZ_{M,\text{ref}} = 60 \text{ mm}$ 

Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^cX_{M,\text{ref}}$	${}^cY_{M,\text{ref}}$	${}^cZ_{M,\text{ref}}$	${}^c\theta_{X_{M,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Y_{M,\text{ref}}}$	${}^c\theta_{Z_{M,\text{ref}}}$
1	-10	1	60	172,5	-7,5	-5
2	-10	1	60	172,5	-5	-5
3	-10	1	60	172,5	0	-5
4	-10	1	60	172,5	5	-5
5	-10	1	60	172,5	7,5	-5
6	-10	1	60	180	-7,5	-5
7	-10	1	60	180	-5	-5
8	-10	1	60	180	0	-5
9	-10	1	60	180	5	-5
10	-10	1	60	180	7,5	-5
11	-10	1	60	-172,5	-7,5	-5
12	-10	1	60	-172,5	-5	-5
13	-10	1	60	-172,5	0	-5
14	-10	1	60	-172,5	5	-5
15	-10	1	60	-172,5	7,5	-5
16	-10	1	60	172,5	-7,5	0
17	-10	1	60	172,5	-5	0
18	-10	1	60	172,5	0	0
19	-10	1	60	172,5	5	0
20	-10	1	60	172,5	7,5	0
21	-10	1	60	180	-7,5	0
22	-10	1	60	180	-5	0
23	-10	1	60	180	0	0
24	-10	1	60	180	5	0
25	-10	1	60	180	7,5	0
26	-10	1	60	-172,5	-7,5	0
27	-10	1	60	-172,5	-5	0
28	-10	1	60	-172,5	0	0
29	-10	1	60	-172,5	5	0
30	-10	1	60	-172,5	7,5	0
31	-10	1	60	172,5	-7,5	5
32	-10	1	60	172,5	-5	5
33	-10	1	60	172,5	0	5
34	-10	1	60	172,5	5	5
35	-10	1	60	172,5	7,5	5
36	-10	1	60	180	-7,5	5
37	-10	1	60	180	-5	5
38	-10	1	60	180	0	5
39	-10	1	60	180	5	5
40	-10	1	60	180	7,5	5
41	-10	1	60	-172,5	-7,5	5
42	-10	1	60	-172,5	-5	5
43	-10	1	60	-172,5	0	5
44	-10	1	60	-172,5	5	5
45	-10	1	60	-172,5	7,5	5
46	-10	0	60	172,5	-7,5	-5
47	-10	0	60	172,5	-5	-5
48	-10	0	60	172,5	0	-5
49	-10	0	60	172,5	5	-5
50	-10	0	60	172,5	7,5	-5
51	-10	0	60	180	-7,5	-5
52	-10	0	60	180	-5	-5
53	-10	0	60	180	0	-5
54	-10	0	60	180	5	-5
55	-10	0	60	180	7,5	-5

Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^c X_{M,ref}$	${}^c Y_{M,ref}$	${}^c Z_{M,ref}$	${}^c \theta_{X_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Y_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Z_{M,ref}}$
56	-10	0	60	-172,5	-7,5	-5
57	-10	0	60	-172,5	-5	-5
58	-10	0	60	-172,5	0	-5
59	-10	0	60	-172,5	5	-5
60	-10	0	60	-172,5	7,5	-5
61	-10	0	60	172,5	-7,5	0
62	-10	0	60	172,5	-5	0
63	-10	0	60	172,5	0	0
64	-10	0	60	172,5	5	0
65	-10	0	60	172,5	7,5	0
66	-10	0	60	180	-7,5	0
67	-10	0	60	180	-5	0
68	-10	0	60	180	0	0
69	-10	0	60	180	5	0
70	-10	0	60	180	7,5	0
71	-10	0	60	-172,5	-7,5	0
72	-10	0	60	-172,5	-5	0
73	-10	0	60	-172,5	0	0
74	-10	0	60	-172,5	5	0
75	-10	0	60	-172,5	7,5	0
76	-10	0	60	172,5	-7,5	5
77	-10	0	60	172,5	-5	5
78	-10	0	60	172,5	0	5
79	-10	0	60	172,5	5	5
80	-10	0	60	172,5	7,5	5
81	-10	0	60	180	-7,5	5
82	-10	0	60	180	-5	5
83	-10	0	60	180	0	5
84	-10	0	60	180	5	5
85	-10	0	60	180	7,5	5
86	-10	0	60	-172,5	-7,5	5
87	-10	0	60	-172,5	-5	5
88	-10	0	60	-172,5	0	5
89	-10	0	60	-172,5	5	5
90	-10	0	60	-172,5	7,5	5
91	-10	-4	60	172,5	-7,5	-5
92	-10	-4	60	172,5	-5	-5
93	-10	-4	60	172,5	0	-5
94	-10	-4	60	172,5	5	-5
95	-10	-4	60	172,5	7,5	-5
96	-10	-4	60	180	-7,5	-5
97	-10	-4	60	180	-5	-5
98	-10	-4	60	180	0	-5
99	-10	-4	60	180	5	-5
100	-10	-4	60	180	7,5	-5
101	-10	-4	60	-172,5	-7,5	-5
102	-10	-4	60	-172,5	-5	-5
103	-10	-4	60	-172,5	0	-5
104	-10	-4	60	-172,5	5	-5
105	-10	-4	60	-172,5	7,5	-5
106	-10	-4	60	172,5	-7,5	0
107	-10	-4	60	172,5	-5	0
108	-10	-4	60	172,5	0	0
109	-10	-4	60	172,5	5	0
110	-10	-4	60	172,5	7,5	0
111	-10	-4	60	180	-7,5	0
112	-10	-4	60	180	-5	0
113	-10	-4	60	180	0	0
114	-10	-4	60	180	5	0
115	-10	-4	60	180	7,5	0
116	-10	-4	60	-172,5	-7,5	0
117	-10	-4	60	-172,5	-5	0
118	-10	-4	60	-172,5	0	0
119	-10	-4	60	-172,5	5	0
120	-10	-4	60	-172,5	7,5	0
121	-10	-4	60	172,5	-7,5	5
122	-10	-4	60	172,5	-5	5
123	-10	-4	60	172,5	0	5
124	-10	-4	60	172,5	5	5
125	-10	-4	60	172,5	7,5	5
126	-10	-4	60	180	-7,5	5
127	-10	-4	60	180	-5	5
128	-10	-4	60	180	0	5
129	-10	-4	60	180	5	5
130	-10	-4	60	180	7,5	5
131	-10	-4	60	-172,5	-7,5	5

Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^c X_{M,ref}$	${}^c Y_{M,ref}$	${}^c Z_{M,ref}$	${}^c \theta_{X_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Y_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Z_{M,ref}}$
132	-10	-4	60	-172,5	-5	5
133	-10	-4	60	-172,5	0	5
134	-10	-4	60	-172,5	5	5
135	-10	-4	60	-172,5	7,5	5
136	-5	1	60	172,5	-7,5	-5
137	-5	1	60	172,5	-5	-5
138	-5	1	60	172,5	0	-5
139	-5	1	60	172,5	5	-5
140	-5	1	60	172,5	7,5	-5
141	-5	1	60	180	-7,5	-5
142	-5	1	60	180	-5	-5
143	-5	1	60	180	0	-5
144	-5	1	60	180	5	-5
145	-5	1	60	180	7,5	-5
146	-5	1	60	-172,5	-7,5	-5
147	-5	1	60	-172,5	-5	-5
148	-5	1	60	-172,5	0	-5
149	-5	1	60	-172,5	5	-5
150	-5	1	60	-172,5	7,5	-5
151	-5	1	60	172,5	-7,5	0
152	-5	1	60	172,5	-5	0
153	-5	1	60	172,5	0	0
154	-5	1	60	172,5	5	0
155	-5	1	60	172,5	7,5	0
156	-5	1	60	180	-7,5	0
157	-5	1	60	180	-5	0
158	-5	1	60	180	0	0
159	-5	1	60	180	5	0
160	-5	1	60	180	7,5	0
161	-5	1	60	-172,5	-7,5	0
162	-5	1	60	-172,5	-5	0
163	-5	1	60	-172,5	0	0
164	-5	1	60	-172,5	5	0
165	-5	1	60	-172,5	7,5	0
166	-5	1	60	172,5	-7,5	5
167	-5	1	60	172,5	-5	5
168	-5	1	60	172,5	0	5
169	-5	1	60	172,5	5	5
170	-5	1	60	172,5	7,5	5
171	-5	1	60	180	-7,5	5
172	-5	1	60	180	-5	5
173	-5	1	60	180	0	5
174	-5	1	60	180	5	5
175	-5	1	60	180	7,5	5
176	-5	1	60	-172,5	-7,5	5
177	-5	1	60	-172,5	-5	5
178	-5	1	60	-172,5	0	5
179	-5	1	60	-172,5	5	5
180	-5	1	60	-172,5	7,5	5
181	-5	0	60	172,5	-7,5	-5
182	-5	0	60	172,5	-5	-5
183	-5	0	60	172,5	0	-5
184	-5	0	60	172,5	5	-5
185	-5	0	60	172,5	7,5	-5
186	-5	0	60	180	-7,5	-5
187	-5	0	60	180	-5	-5
188	-5	0	60	180	0	-5
189	-5	0	60	180	5	-5
190	-5	0	60	180	7,5	-5
191	-5	0	60	-172,5	-7,5	-5
192	-5	0	60	-172,5	-5	-5
193	-5	0	60	-172,5	0	-5
194	-5	0	60	-172,5	5	-5
195	-5	0	60	-172,5	7,5	-5
196	-5	0	60	172,5	-7,5	0
197	-5	0	60	172,5	-5	0
198	-5	0	60	172,5	0	0
199	-5	0	60	172,5	5	0
200	-5	0	60	172,5	7,5	0
201	-5	0	60	180	-7,5	0
202	-5	0	60	180	-5	0
203	-5	0	60	180	0	0
204	-5	0	60	180	5	0
205	-5	0	60	180	7,5	0
206	-5	0	60	-172,5	-7,5	0
207	-5	0	60	-172,5	-5	0



Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^c X_{M,ref}$	${}^c Y_{M,ref}$	${}^c Z_{M,ref}$	${}^c \theta X_{M,ref}$	${}^c \theta Y_{M,ref}$	${}^c \theta Z_{M,ref}$
208	-5	0	60	-172,5	0	0
209	-5	0	60	-172,5	5	0
210	-5	0	60	-172,5	7,5	0
211	-5	0	60	172,5	-7,5	5
212	-5	0	60	172,5	-5	5
213	-5	0	60	172,5	0	5
214	-5	0	60	172,5	5	5
215	-5	0	60	172,5	7,5	5
216	-5	0	60	180	-7,5	5
217	-5	0	60	180	-5	5
218	-5	0	60	180	0	5
219	-5	0	60	180	5	5
220	-5	0	60	180	7,5	5
221	-5	0	60	-172,5	-7,5	5
222	-5	0	60	-172,5	-5	5
223	-5	0	60	-172,5	0	5
224	-5	0	60	-172,5	5	5
225	-5	0	60	-172,5	7,5	5
226	-5	-4	60	172,5	-7,5	-5
227	-5	-4	60	172,5	-5	-5
228	-5	-4	60	172,5	0	-5
229	-5	-4	60	172,5	5	-5
230	-5	-4	60	172,5	7,5	-5
231	-5	-4	60	180	-7,5	-5
232	-5	-4	60	180	-5	-5
233	-5	-4	60	180	0	-5
234	-5	-4	60	180	5	-5
235	-5	-4	60	180	7,5	-5
236	-5	-4	60	-172,5	-7,5	-5
237	-5	-4	60	-172,5	-5	-5
238	-5	-4	60	-172,5	0	-5
239	-5	-4	60	-172,5	5	-5
240	-5	-4	60	-172,5	7,5	-5
241	-5	-4	60	172,5	-7,5	0
242	-5	-4	60	172,5	-5	0
243	-5	-4	60	172,5	0	0
244	-5	-4	60	172,5	5	0
245	-5	-4	60	172,5	7,5	0
246	-5	-4	60	180	-7,5	0
247	-5	-4	60	180	-5	0
248	-5	-4	60	180	0	0
249	-5	-4	60	180	5	0
250	-5	-4	60	180	7,5	0
251	-5	-4	60	-172,5	-7,5	0
252	-5	-4	60	-172,5	-5	0
253	-5	-4	60	-172,5	0	0
254	-5	-4	60	-172,5	5	0
255	-5	-4	60	-172,5	7,5	0
256	-5	-4	60	172,5	-7,5	5
257	-5	-4	60	172,5	-5	5
258	-5	-4	60	172,5	0	5
259	-5	-4	60	172,5	5	5
260	-5	-4	60	172,5	7,5	5
261	-5	-4	60	180	-7,5	5
262	-5	-4	60	180	-5	5
263	-5	-4	60	180	0	5
264	-5	-4	60	180	5	5
265	-5	-4	60	180	7,5	5
266	-5	-4	60	-172,5	-7,5	5
267	-5	-4	60	-172,5	-5	5
268	-5	-4	60	-172,5	0	5
269	-5	-4	60	-172,5	5	5
270	-5	-4	60	-172,5	7,5	5
271	0	1	60	172,5	-7,5	-5
272	0	1	60	172,5	-5	-5
273	0	1	60	172,5	0	-5
274	0	1	60	172,5	5	-5
275	0	1	60	172,5	7,5	-5
276	0	1	60	180	-7,5	-5
277	0	1	60	180	-5	-5
278	0	1	60	180	0	-5
279	0	1	60	180	5	-5
280	0	1	60	180	7,5	-5
281	0	1	60	-172,5	-7,5	-5
282	0	1	60	-172,5	-5	-5
283	0	1	60	-172,5	0	-5

Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^c X_{M,ref}$	${}^c Y_{M,ref}$	${}^c Z_{M,ref}$	${}^c \theta_{X_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Y_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Z_{M,ref}}$
284	0	1	60	-172,5	5	-5
285	0	1	60	-172,5	7,5	-5
286	0	1	60	172,5	-7,5	0
287	0	1	60	172,5	-5	0
288	0	1	60	172,5	0	0
289	0	1	60	172,5	5	0
290	0	1	60	172,5	7,5	0
291	0	1	60	180	-7,5	0
292	0	1	60	180	-5	0
293	0	1	60	180	0	0
294	0	1	60	180	5	0
295	0	1	60	180	7,5	0
296	0	1	60	-172,5	-7,5	0
297	0	1	60	-172,5	-5	0
298	0	1	60	-172,5	0	0
299	0	1	60	-172,5	5	0
300	0	1	60	-172,5	7,5	0
301	0	1	60	172,5	-7,5	5
302	0	1	60	172,5	-5	5
303	0	1	60	172,5	0	5
304	0	1	60	172,5	5	5
305	0	1	60	172,5	7,5	5
306	0	1	60	180	-7,5	5
307	0	1	60	180	-5	5
308	0	1	60	180	0	5
309	0	1	60	180	5	5
310	0	1	60	180	7,5	5
311	0	1	60	-172,5	-7,5	5
312	0	1	60	-172,5	-5	5
313	0	1	60	-172,5	0	5
314	0	1	60	-172,5	5	5
315	0	1	60	-172,5	7,5	5
316	0	0	60	172,5	-7,5	-5
317	0	0	60	172,5	-5	-5
318	0	0	60	172,5	0	-5
319	0	0	60	172,5	5	-5
320	0	0	60	172,5	7,5	-5
321	0	0	60	180	-7,5	-5
322	0	0	60	180	-5	-5
323	0	0	60	180	0	-5
324	0	0	60	180	5	-5
325	0	0	60	180	7,5	-5
326	0	0	60	-172,5	-7,5	-5
327	0	0	60	-172,5	-5	-5
328	0	0	60	-172,5	0	-5
329	0	0	60	-172,5	5	-5
330	0	0	60	-172,5	7,5	-5
331	0	0	60	172,5	-7,5	0
332	0	0	60	172,5	-5	0
333	0	0	60	172,5	0	0
334	0	0	60	172,5	5	0
335	0	0	60	172,5	7,5	0
336	0	0	60	180	-7,5	0
337	0	0	60	180	-5	0
338	0	0	60	180	0	0
339	0	0	60	180	5	0
340	0	0	60	180	7,5	0
341	0	0	60	-172,5	-7,5	0
342	0	0	60	-172,5	-5	0
343	0	0	60	-172,5	0	0
344	0	0	60	-172,5	5	0
345	0	0	60	-172,5	7,5	0
346	0	0	60	172,5	-7,5	5
347	0	0	60	172,5	-5	5
348	0	0	60	172,5	0	5
349	0	0	60	172,5	5	5
350	0	0	60	172,5	7,5	5
351	0	0	60	180	-7,5	5
352	0	0	60	180	-5	5
353	0	0	60	180	0	5
354	0	0	60	180	5	5
355	0	0	60	180	7,5	5
356	0	0	60	-172,5	-7,5	5
357	0	0	60	-172,5	-5	5
358	0	0	60	-172,5	0	5
359	0	0	60	-172,5	5	5

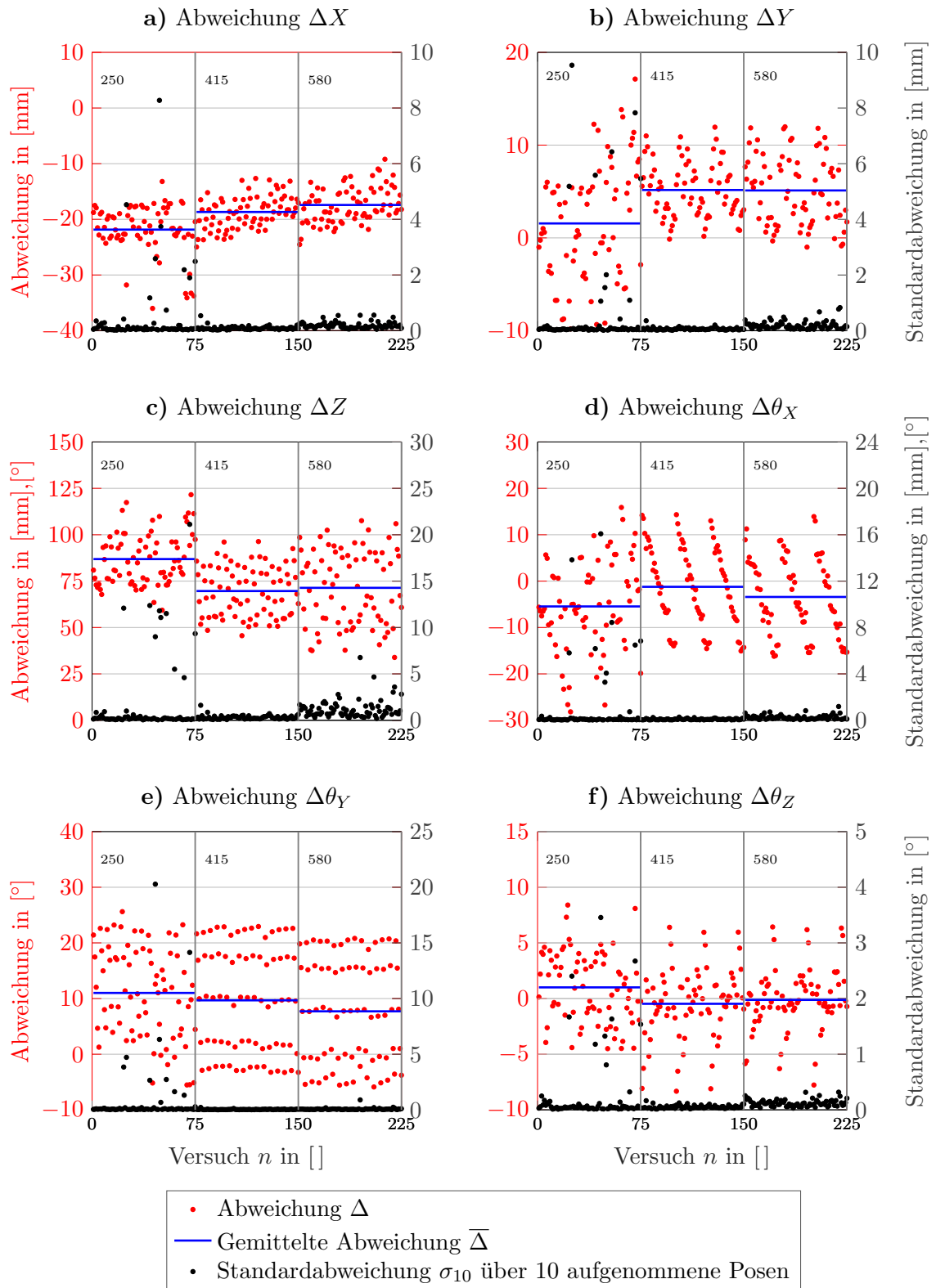
Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^c X_{M,ref}$	${}^c Y_{M,ref}$	${}^c Z_{M,ref}$	${}^c \theta X_{M,ref}$	${}^c \theta Y_{M,ref}$	${}^c \theta Z_{M,ref}$
360	0	0	60	-172,5	7,5	5
361	0	-4	60	172,5	-7,5	-5
362	0	-4	60	172,5	-5	-5
363	0	-4	60	172,5	0	-5
364	0	-4	60	172,5	5	-5
365	0	-4	60	172,5	7,5	-5
366	0	-4	60	180	-7,5	-5
367	0	-4	60	180	-5	-5
368	0	-4	60	180	0	-5
369	0	-4	60	180	5	-5
370	0	-4	60	180	7,5	-5
371	0	-4	60	-172,5	-7,5	-5
372	0	-4	60	-172,5	-5	-5
373	0	-4	60	-172,5	0	-5
374	0	-4	60	-172,5	5	-5
375	0	-4	60	-172,5	7,5	-5
376	0	-4	60	172,5	-7,5	0
377	0	-4	60	172,5	-5	0
378	0	-4	60	172,5	0	0
379	0	-4	60	172,5	5	0
380	0	-4	60	172,5	7,5	0
381	0	-4	60	180	-7,5	0
382	0	-4	60	180	-5	0
383	0	-4	60	180	0	0
384	0	-4	60	180	5	0
385	0	-4	60	180	7,5	0
386	0	-4	60	-172,5	-7,5	0
387	0	-4	60	-172,5	-5	0
388	0	-4	60	-172,5	0	0
389	0	-4	60	-172,5	5	0
390	0	-4	60	-172,5	7,5	0
391	0	-4	60	172,5	-7,5	5
392	0	-4	60	172,5	-5	5
393	0	-4	60	172,5	0	5
394	0	-4	60	172,5	5	5
395	0	-4	60	172,5	7,5	5
396	0	-4	60	180	-7,5	5
397	0	-4	60	180	-5	5
398	0	-4	60	180	0	5
399	0	-4	60	180	5	5
400	0	-4	60	180	7,5	5
401	0	-4	60	-172,5	-7,5	5
402	0	-4	60	-172,5	-5	5
403	0	-4	60	-172,5	0	5
404	0	-4	60	-172,5	5	5
405	0	-4	60	-172,5	7,5	5
406	3	1	60	172,5	-7,5	-5
407	3	1	60	172,5	-5	-5
408	3	1	60	172,5	0	-5
409	3	1	60	172,5	5	-5
410	3	1	60	172,5	7,5	-5
411	3	1	60	180	-7,5	-5
412	3	1	60	180	-5	-5
413	3	1	60	180	0	-5
414	3	1	60	180	5	-5
415	3	1	60	180	7,5	-5
416	3	1	60	-172,5	-7,5	-5
417	3	1	60	-172,5	-5	-5
418	3	1	60	-172,5	0	-5
419	3	1	60	-172,5	5	-5
420	3	1	60	-172,5	7,5	-5
421	3	1	60	172,5	-7,5	0
422	3	1	60	172,5	-5	0
423	3	1	60	172,5	0	0
424	3	1	60	172,5	5	0
425	3	1	60	172,5	7,5	0
426	3	1	60	180	-7,5	0
427	3	1	60	180	-5	0
428	3	1	60	180	0	0
429	3	1	60	180	5	0
430	3	1	60	180	7,5	0
431	3	1	60	-172,5	-7,5	0
432	3	1	60	-172,5	-5	0
433	3	1	60	-172,5	0	0
434	3	1	60	-172,5	5	0
435	3	1	60	-172,5	7,5	0

Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^c X_{M,ref}$	${}^c Y_{M,ref}$	${}^c Z_{M,ref}$	${}^c \theta_{X_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Y_{M,ref}}$	${}^c \theta_{Z_{M,ref}}$
436	3	1	60	172,5	-7,5	5
437	3	1	60	172,5	-5	5
438	3	1	60	172,5	0	5
439	3	1	60	172,5	5	5
440	3	1	60	172,5	7,5	5
441	3	1	60	180	-7,5	5
442	3	1	60	180	-5	5
443	3	1	60	180	0	5
444	3	1	60	180	5	5
445	3	1	60	180	7,5	5
446	3	1	60	-172,5	-7,5	5
447	3	1	60	-172,5	-5	5
448	3	1	60	-172,5	0	5
449	3	1	60	-172,5	5	5
450	3	1	60	-172,5	7,5	5
451	3	0	60	172,5	-7,5	-5
452	3	0	60	172,5	-5	-5
453	3	0	60	172,5	0	-5
454	3	0	60	172,5	5	-5
455	3	0	60	172,5	7,5	-5
456	3	0	60	180	-7,5	-5
457	3	0	60	180	-5	-5
458	3	0	60	180	0	-5
459	3	0	60	180	5	-5
460	3	0	60	180	7,5	-5
461	3	0	60	-172,5	-7,5	-5
462	3	0	60	-172,5	-5	-5
463	3	0	60	-172,5	0	-5
464	3	0	60	-172,5	5	-5
465	3	0	60	-172,5	7,5	-5
466	3	0	60	172,5	-7,5	0
467	3	0	60	172,5	-5	0
468	3	0	60	172,5	0	0
469	3	0	60	172,5	5	0
470	3	0	60	172,5	7,5	0
471	3	0	60	180	-7,5	0
472	3	0	60	180	-5	0
473	3	0	60	180	0	0
474	3	0	60	180	5	0
475	3	0	60	180	7,5	0
476	3	0	60	-172,5	-7,5	0
477	3	0	60	-172,5	-5	0
478	3	0	60	-172,5	0	0
479	3	0	60	-172,5	5	0
480	3	0	60	-172,5	7,5	0
481	3	0	60	172,5	-7,5	5
482	3	0	60	172,5	-5	5
483	3	0	60	172,5	0	5
484	3	0	60	172,5	5	5
485	3	0	60	172,5	7,5	5
486	3	0	60	180	-7,5	5
487	3	0	60	180	-5	5
488	3	0	60	180	0	5
489	3	0	60	180	5	5
490	3	0	60	180	7,5	5
491	3	0	60	-172,5	-7,5	5
492	3	0	60	-172,5	-5	5
493	3	0	60	-172,5	0	5
494	3	0	60	-172,5	5	5
495	3	0	60	-172,5	7,5	5
496	3	-4	60	172,5	-7,5	-5
497	3	-4	60	172,5	-5	-5
498	3	-4	60	172,5	0	-5
499	3	-4	60	172,5	5	-5
500	3	-4	60	172,5	7,5	-5
501	3	-4	60	180	-7,5	-5
502	3	-4	60	180	-5	-5
503	3	-4	60	180	0	-5
504	3	-4	60	180	5	-5
505	3	-4	60	180	7,5	-5
506	3	-4	60	-172,5	-7,5	-5
507	3	-4	60	-172,5	-5	-5
508	3	-4	60	-172,5	0	-5
509	3	-4	60	-172,5	5	-5
510	3	-4	60	-172,5	7,5	-5
511	3	-4	60	172,5	-7,5	0

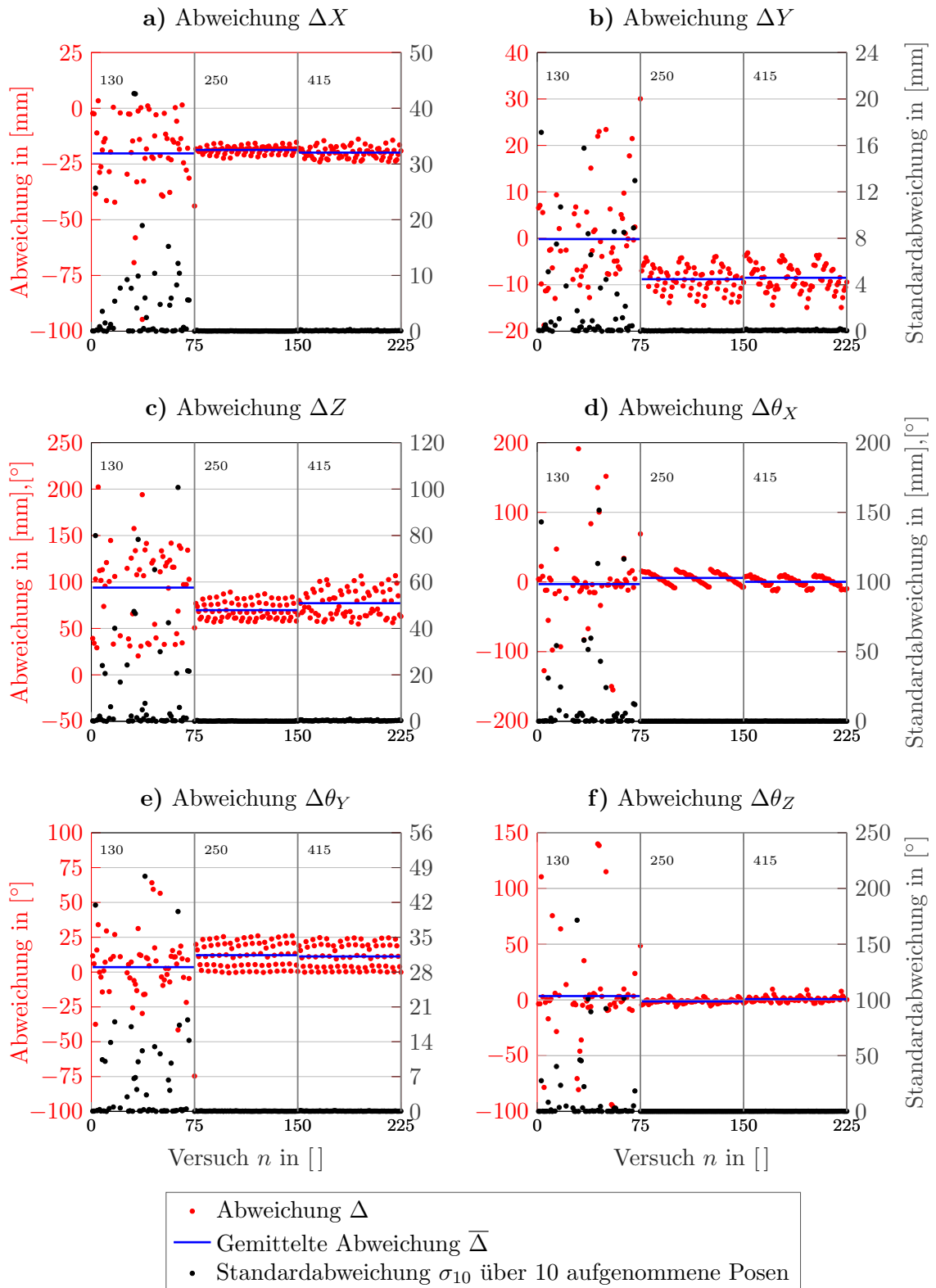
Versuch $n$	Translation in [mm]			Rotation in [°]		
	${}^c X_{M,\text{ref}}$	${}^c Y_{M,\text{ref}}$	${}^c Z_{M,\text{ref}}$	${}^c \theta_{X_{M,\text{ref}}}$	${}^c \theta_{Y_{M,\text{ref}}}$	${}^c \theta_{Z_{M,\text{ref}}}$
512	3	-4	60	172,5	-5	0
513	3	-4	60	172,5	0	0
514	3	-4	60	172,5	5	0
515	3	-4	60	172,5	7,5	0
516	3	-4	60	180	-7,5	0
517	3	-4	60	180	-5	0
518	3	-4	60	180	0	0
519	3	-4	60	180	5	0
520	3	-4	60	180	7,5	0
521	3	-4	60	-172,5	-7,5	0
522	3	-4	60	-172,5	-5	0
523	3	-4	60	-172,5	0	0
524	3	-4	60	-172,5	5	0
525	3	-4	60	-172,5	7,5	0
526	3	-4	60	172,5	-7,5	5
527	3	-4	60	172,5	-5	5
528	3	-4	60	172,5	0	5
529	3	-4	60	172,5	5	5
530	3	-4	60	172,5	7,5	5
531	3	-4	60	180	-7,5	5
532	3	-4	60	180	-5	5
533	3	-4	60	180	0	5
534	3	-4	60	180	5	5
535	3	-4	60	180	7,5	5
536	3	-4	60	-172,5	-7,5	5
537	3	-4	60	-172,5	-5	5
538	3	-4	60	-172,5	0	5
539	3	-4	60	-172,5	5	5
540	3	-4	60	-172,5	7,5	5

**D.0.2 DOPE****Tabelle D.3:** Datensätze für das Training des neuronalen Netztes für den AC-Teil des Inlets und die jeweiligen virtuellen Eigenschaften [Sch21]

<b>Datensatzgröße gesamt</b>	<b>Virtuelle Kamerabewegung</b>	<b>Umgebung</b>	<b>Abstand in UE4</b>	<b>Lichtquelle</b>
30.000	Randomisiert (X,Y: $\pm 40$ mm)	Randomisiert	variierend 30-80 mm	randomisiert
60.000	Orbital (0°-20°)	Randomisiert	variierend 30-80 mm	randomisiert
80.000	Randomisiert (X,Y: $\pm 70$ mm)	Randomisiert	variierend 50-150 mm	randomisiert
100.000	Orbital (0°-20°)	Randomisiert	variierend 50-150 mm	randomisiert



**Abbildung D.1:** Abweichung zwischen ermittelter und Soll-Pose bei den einzelnen Abständen  ${}^cZ_{I,\text{ref}} = \{250, 415, 580\}$  für die Posenbestimmung des Inlets mit DOPE. Die Standardabweichung bezieht sich auf die zehn aufgenommenen Posen pro Untersuchungspunkt.



**Abbildung D.2:** Abweichung zwischen ermittelter und Soll-Pose bei den einzelnen Abständen  ${}^c Z_{I,\text{ref}} = \{130, 250, 415\}$  für die Posenbestimmung des AC-Teils mit DOPE. Die Standardabweichung bezieht sich auf die zehn aufgenommenen Posen pro Untersuchungspunkt.