

FAU Studien aus dem Maschinenbau 312

Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung



Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 312

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack **Christina Ramer**

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen FAU University Press 2018 Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Bitte zitieren als

Ramer, Christina. 2018. Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung.FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 312. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-154-6.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative Commons Lizenz BY-NC-ND.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

Verlag und Auslieferung: FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-153-9 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-154-6 (Online-Ausgabe) ISSN: 2625-9974 DOI: 10.25593/978-3-96147-154-6

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung

Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christina Ramer aus Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung:	18.06.2018
Vorsitzender des Promotionsorgans:	Prof. DrIng. Reinhard Lerch
Gutachter:	Prof. DrIng. Jörg Franke
	Prof. DrIng. Annika Raatz,
	Leibniz Universität Hannover

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Leiter dieses Lehrstuhls, danke ich besonders für das in mich gesetzte Vertrauen, seine stetige Unterstützung und konstruktiven Anregungen zur Realisierung dieser Arbeit sowie für den mir gewährten Freiraum in Wissenschaft und Lehre. Darüber hinaus möchte ich mich herzlich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz für die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken. Gedankt sei ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Nöth als weiterem Mitglied des Prüfungskollegiums.

Diese Dissertation beruht zu großen Teilen auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes "Assistenzsysteme für die Produktion und Medizin nahe Anwendungen" (AsProMed), das durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und den Freistaat Bayern im Rahmen des bayerischen Clusters Medizintechnik gefördert wurde. Den an diesem Projekt beteiligten Partnern aus Forschung und Industrie möchte ich an dieser Stelle für die gute fachliche Zusammenarbeit danken.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls bedanke ich mich für die kollegiale und angenehme Arbeitsatmosphäre, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Hervorheben möchte ich dabei alle Erlangener Kollegen, insbesondere des Forschungsbereichs Biomechatronik, für die erfolgreiche Bearbeitung gemeinsamer Projekte sowie die vielen fachlichen und kritischen Diskussionen. Mein besonderer Dank für das Korrekturlesen dieser Arbeit geht an Herrn Dipl.-Ing. Maximilian Landgraf sowie meinen langjährigen Bürokollegen, Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Reitelshöfer. Zudem geht mein Dank an Herrn Dipl.-Ing. Matthias Brossog, der durch seine hervorragende Betreuung meiner Diplomarbeit wesentlich dazu beigetragen hat, am Lehrstuhl als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig zu werden. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen Studierenden, die mich während meiner Zeit am Lehrstuhl im Rahmen einer studentischen Arbeit oder einer Hiwi-Tätigkeit bei Forschungs- und Industrieprojekten sowie bei der Realisierung von Lehrveranstaltungen unterstützt haben.

Mein Dank gilt zuletzt vor allem meiner Familie, die mir durch ihre Unterstützung die Realisierung dieser Arbeit ermöglichte.

Erlangen, im September 2018

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christina Ramer

Inhaltsverzeichnis

Ab	Abkürzungsverzeichnisix				
1	Ein	Einleitung 1			
	1.1	Motiv	ration 1		
	1.2	Zielst	ellung und Aufbau der Arbeit 3		
2	Star assi	Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme			
	2. 1	Grund robot	llagen und normative Randbedingungen ischer Assistenzsysteme		
		2.1.1	Klärung von Begriffen im Umfeld der Mensch-Roboter-Kooperation7		
		2.1.2	Aktuelle Gesetzes- und Normenlage zur Sicherheit von Industrierobotern in Deutschland 10		
	2.2	Autor	nome Bahnplanungsverfahren für Industrieroboter 18		
		2.2.1	Klassische Bahnplanungsansätze 21		
		2.2.2	Stichprobenbasierte Bahnplanungsansätze 28		
		2.2.3	Bahnplanungsverfahren für Sechsachs- Knickarmroboter 30		
2.3 Open Source-Bibliotheken und -I von Roboter-Assistenzsystemen.		Open von R	Source-Bibliotheken und -Frameworks zur Realisierung oboter-Assistenzsystemen		
		2.3.1	Allgemeine Robotik-Frameworks 33		
		2.3.2	Bibliotheken zur Bahnplanung 36		
		2.3.3	Bibliotheken zur Kollisionsprüfung 38		
		2.3.4	Bibliotheken zur Bildverarbeitung 40		
2.4 Aktuelle Entwicklungen und am Markt verfügbare Syste im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation		elle Entwicklungen und am Markt verfügbare Systeme reich der Mensch-Roboter-Kooperation 41			
		2.4.1	Industriell und zu Forschungszwecken einsetzbare MRK-fähige Industrierobotersysteme		
		2.4.2	Aktuelle Forschungsansätze MRK-fähiger Industrieroboter 46		

3	Konzeption eines sicheren und flexiblen Roboter-Assistenzsystems in der Fertigung		
	3.1	Identi Autor	ifizierung bestehender Defizite hinsichtlich Sicherheit und nomie im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation
	3.2	Umse Indus	tzung zentraler Handlungsbedarfe in einem trieroboter basierten Unterstützungssystem
4	3D- des	Kamer Robot	ra basierte Erfassung und Interpretation rerarbeitsraums
	4.1 Notwendige Grundlagen zur Realisierung der Umgebungswahrnehmung und -modellierung		endige Grundlagen zur Realisierung der bungswahrnehmung und -modellierung
		4.1.1	Kommunikationsschnittstelle zur Robotersteuerung 57
		4.1.2	Kinematische und geometrische Modellierung der eingesetzten Industrieroboter
		4.1.3	Einsatz der ToF-Kameratechnologie zur Generierung von Tiefeninformationen der Szene
		4.1.4	Kamerakalibrierung
	4.2	Umgebungserfassung und Objektdetektion während des Robotereinsatzes	
		4.2.1	Hintergrundmodellierung des Roboterarbeitsraums
		4.2.2	Segmentierung des Roboters aus den Kamerabildern
		4.2.3	Objekterkennung und -tracking im Roboterumfeld
		4.2.4	Bereitstellung von Objektdaten an nachgelagerte Programmmodule
	4.3	.3 Evaluierung der entwickelten Umgebungserfassung und Möglichkeiten zur weiteren Optimierung	
		4.3.1	Entwicklung eines Famos-Interface-Plugins zur 3D-Visualisierung 103
		4.3.2	Praxistests und Diskussion der Ergebnisse 105
		4.3.3	Weitere Optimierungsmöglichkeiten 107

Auto auf	onome Bahngenerierung für serielle Industrieroboter Basis der Zellzerlegung 109			
5.1	Ein generalisiertes Verfahren zur autonomen Roboterpfadplanung mittels Zellzerlegung des Arbeitsraums 110			
	5.1.1	Die approximative Zellzerlegung als Grundlage des Verfahrens 110		
	5.1.2	Bestimmung kollisionsfreier Zellen im Arbeitsraum des Roboters zur Generierung von TCP-Pfaden 113		
	5.1.3	Standardsuchverfahren zur Ermittlung kurzer Bewegungsbahnen 122		
5.2 Konkretisierung des verallgemeinerten Ansatzes für Sechsachs-Knickarmroboter mit Zentralhand		etisierung des verallgemeinerten Ansatzes für .chs-Knickarmroboter mit Zentralhand 125		
	5.2.1	Einsatz eines geometrischen Lösers zur zeiteffizienten Realisierung der inversen Transformation 125		
	5.2.2	Ermittlung realisierbarer Roboterkonfigurationen auf Basis kollisionsfreier TCP-Pfade133		
	5.2.3	Generierung von Roboterpfaden durch Kombination gültiger Konfigurationen 136		
5.3 Evaluierung		erung des realisierten Bahnplanungsverfahrens 140		
	5.3.1	Weiterentwicklung eines Famos-Interface-Plugins zur Simulation des Planers 140		
	5.3.2	Nachweis der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit des vorgestellten Ansatzes 141		
	5.3.3	Bestehende Defizite und mögliche Weiterentwicklungen des Bahnplanungsverfahrens143		
Sich zwis	ere Ko schen I	llisionsvermeidung ndustrierobotern und Personen145		
6.1 Online-Kollisionsvermeidung auf zu dynamischen Objekten		e-Kollisionsvermeidung auf Basis von Mindestabständen amischen Objekten 145		
6.2	Realisi für akt	erung der Kollisionsvermeidung über Abstandstests uelle Umweltmodelle		
6.3	Diskus	sion des vorgestellten Ansatzes 148		
	Auto auf 5.1 5.2 5.3 5.3 5.3 6.1 6.2 6.3	Autonome auf Basis d 5.1 Ein ger mittels 5.1 $5.1.1$ $5.1.2$ $5.1.2$ $5.1.2$ $5.1.3$ 5.2 Konkro Sechsa 5.2 Konkro Sechsa 5.2 $5.2.1$ $5.2.2$ $5.2.2$ 5.3 Evaluid $5.3.1$ 5.3 $5.3.2$ $5.3.2$ $5.3.3$ Sichere Ko zwichen I 6.1 Online zu dyn 6.2 Realisi für akt 6.3 Diskus		

7	Integration in ein Montagesystem zur Unterstützung leistungsgeminderter Mitarbeiter 149		
	7.1	Motivation und Randbedingungen für den Einsatz eines Roboter-Assistenzsystems in einer Behindertenwerkstatt 149	
	7.2	Aufbau und Teilkomponenten des Montage-Assistenzsystems 150	
	7.3	Diskussion des realisierten Demonstratorsystems 153	
8	Zusammenfassung und Ausblick 155		
9	Summary and prospects 159		
Lite	ratu	rverzeichnis 163	

Abkürzungsverzeichnis

AABBA	Axis-Aligned Bounding Box
AASSCA	xis-Aligned Sphere-swept Circle
AD*A	Anytime Dynamic A*
APASA	Automatischer Produktionsassistent
APIA	Application Programming Interface, Programmierschnittstelle
ARA	Augmented Reality, erweiterte Realität
ARA*A	Anytime Repairing A*
ARTA	Advanced Realtime Tracking
ASICA	Application Specific Integrated Circuit
BFLB	Bayesian Filtering Library
BGB	Berufsgenossenschaft
BGIAIn	nstitut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
U	Jnfallversicherung (IFA), veraltete Bezeichnung
BSDB	Berkeley Software Distribution
BSPB	Binary Space Partitioning
BVB	Bounding Volume, Hüllkörper
BVHB	Bounding Volume Hierarchy, Hüllkörperhierarchie
BWSB	Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen,
E	Electro-Sensitive Protective Equipment (ESPE)
CADC	Computer-Aided Design
СЕС	Conformité Européenne
CFFC	Common Cause Failure Fraction,
A	Ausfälle in Folge gemeinsamer Ursache
CHOMPC	Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning
СМUС	Carnegie Mellon University
<i>CO</i> C	Configuration Space Obstacle, Konfigurationsraumhindernis
СРС	Continuous Path, Bahnsteuerung
CPLINC	Continuous Path Linear, Bahnsteuerung mit Linearbahn
CSGC	Constructive Solid Geometry
DARPAD	Defense Advanced Research Projects Agency

DCDiagnostic Coverage, Diagnosedeckungsgrad
DCSDual Check Safety
DEADielektrische Elastomeraktoren
DFKIDeutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
DGUVDeutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DHDenavit-Hartenberg
EAPElektroaktive Polymere
EGEuropäische Gemeinschaft
EMExpectation-Maximization
ENEuropäische Norm
ENSTAÉcole Nationale Supérieure de Techniques Avancées
ESLEmbedded Systems Lab,
Lehrstuhl für Eingebettete Systeme der Universität Passau
ESPEElectro-Sensitive Protective Equipment,
Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS)
ESTExpansive-Spaces Trees
EUEuropäische Union
EWREuropäischer Wirtschaftsraum
FCLFlexible Collision Library
FPGAField Programmable Gate Array
fpsframes per second
FRIDA Friendly Robot for Industrial Dual Arm Assembly
GBGigabyte
GJKGilbert-Johnson-Keerthi (-Algorithmus)
GPLGNU General Public License
GPUGraphics Processing Unit, Graphikprozessor
GVDGeneralized Voronoi Diagram
HCHuman Collaborative
HRChuman-robot cooperation, human-robot collaboration
HWPHandwurzelpunkt
HzHertz
I-COLLIDE .Interactive and exact Collision Detection

IceInternet Communications Engine IDLInterface Definition Language IFR.....International Federation of Robotics IITIstituto Italiano di Tecnologia iiwa.....intelligent industrial work assistant IK.....Inverse Kinematik IMS.....Integrated Manufacturing System, Integriertes Fertigungssystem IP.....Internet Protocol IPAFraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IR.....Infrarot ISI.....Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung k-d.....k-dimensional k-DOP......Discrete-orientation Polytope KDLKinematics and Dynamics Library KTHKöniglich Technische Hochschule LIDAR.....Light Detection and Ranging LBRLeichtbauroboter LEDLicht-emittierende Diode, light-emitting diode LGPLGNU Lesser General Public License LRTLehrstuhl für Informatik VII, Robotik und Telematik LUTLookup-Tabelle MERL Mitsubishi Electric Research Laboratory MIT Massachusetts Institute of Technology MOOS......Mission Oriented Operating Suite MPK Motion Planning Kit MRG.....Mobile Robotics Group MRIMensch-Roboter-Interaktion MRK Mensch-Roboter-Kooperation, Mensch-Roboter-Kollaboration MRL Maschinenrichtlinie MSL.....Motion Strategy Library MTTF_d......Mean Time To Dangerous Failure, mittlere Zeit bis zu einem gefahrbringenden Ausfall

OBB.....Oriented-Bounding Box

OMPLOpen Motion Planning Library

OOPSMP Object-Oriented Programming System for Motion Planning

OpenCV.....Open Source Computer Vision

OpenMP Open Multi-Processing

OpenRAVE.Open Robotics Automation Virtual Environment

OPP.....Opportunistic Path Planner, opportunistischer Pfadplaner

OROCOS Open Robot Control Software

OSRF.....Open Source Robotics Foundation

OTS.....Ohne trennende Schutzeinrichtungen

PbDProgramming by Demonstration

PC.....Personal Computer

PCA Principal Component Analysis, Hauptkomponentenanalyse

PCLPoint Cloud Library

PMD.....Photonenmischdetektor, Photonic Mixer/ Mixing Device

PQP.....Proximity Query Package

PRMProbabilistic Roadmap

ProdSG......Produktsicherheitsgesetz

ProdSV......Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz

PL.....Performance Level

PTP.....Point-to-Point, Punkt-zu-Punkt

RADAR Radio Detection and Ranging

RAM Random-Access Memory

RAPID......Robust and Accurate Polygon Interference Detection

RGB-Dred, green, blue, depth

RICRobotics Innovation Center

RL.....Richtlinie/

Robotics Library

Rock Robot Construction Kit

ROS.....Robot Operating System

RPCRemote Procedure Call

RPPRandomized Path Planner

- RRTRapidly-Exploring Random Trees
- RSS.....Rectangle Swept Sphere
- RSVROBOTstarV
- RTTReal-Time Toolkit
- SATSeparating-Axis-Test
- SBL.....Single-query, Bi-directional, Lazy collision-checking
- SBPL.....Search-Based Planning Library
- SCARA Selective Compliance Assembly Robot Arm
- SDK.....Software Development Kit
- SEA.....Series Elastic Actuator
- SILSicherheits-Integritätslevel, Safety Integrity Level
- SLAMSimultaneous Localization and Mapping
- SOLID Software Library for Interference Detection
- SPStützpose
- SPESensitive Protective Equipment, sensitive Schutzeinrichtung
- SRP/CS......Safety-Related Parts of Control Systems, sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen
- SS1Safe Stop 1, Stopp-Kategorie 1
- SS2.....Safe Stop 2, Stopp-Kategorie 2
- SSCSphere-swept Circle
- SSLSphere-swept Line
- SSRSphere-swept Rectangle
- SSV.....Sphere-swept Volume
- STAIR.....Stanford Artificial Intelligence Robot
- STOSafe Torque Off, Stopp-Kategorie o
- STOMP Stochastic Trajectory Optimization for Motion Planning
- SWIFT......Speedy Walking via Improved Feature Testing
- SWIFT++Speedy Walking via Improved Feature Testing for non-convex objects
- TCPTransmission Control Protocol/ Tool-Center-Point
- ToF.....Time-of-Flight, Laufzeit

1 Einleitung

Traditionell werden Industrieroboter hinter abgetrennten Schutzeinrichtungen zur automatisierten Fertigung bei hohen Stückzahlen, beispielsweise beim Schweißen oder Lackieren von Karosserieteilen in der Automobilproduktion, eingesetzt. In der Massenproduktion können ihre Vorteile hinsichtlich Geschwindigkeit, Anzahl an Freiheitsgraden, Wiederholgenauigkeit auf Grund hoher Steifigkeiten und Zuverlässigkeit bei einem breiten Spektrum an Traglasten genutzt werden, was sich in weltweit steigenden Absatzzahlen von Industrierobotern widerspiegelt [1]. Bestehende Nachteile sind erhebliche Investitions- und Integrationskosten in Fertigungs- oder Montagezellen, z. B. durch notwendige Spezialgreifer, die Realisierung der Teilezuführung, -vereinzelung, -ordnung sowie die zeitaufwändige und wenig intuitive Programmierung bei der Inbetriebnahme oder Produktwechseln durch speziell geschultes Fachpersonal.

1.1 Motivation

Auf Grund der sich durch die eingangs erwähnten Defizite ergebenden niedrigen Flexibilität dominiert in vielen Bereichen mit hoher Variantenvielfalt, kleinen Losgrößen sowie komplexem Aufgabenprofil die manuelle Fertigung und Montage. In Industrieländern mit hohen Personalkosten soll der Verlagerung dieser Produktionsprozesse in Niedriglohnländer entgegengewirkt werden. Zudem ist es wünschenswert, Mitarbeiter von monotonen und physisch belastenden Tätigkeiten zu entlasten und somit den Bedürfnissen der durch den demographischen Wandel bedingten, steigenden Zahl älterer und auch leistungsgeminderter Werker gerecht zu werden. Dies erfordert den Einsatz neuartiger robotischer Unterstützungssysteme, welche als hybride Fertigungs- und Montagesysteme flexibel einsetzbar sind und sicher mit dem Menschen zusammenarbeiten können. Anders als herkömmliche, meist positionsgeregelte, mit wenig Sensorik ausgestattete und vom Menschen abgetrennt arbeitende Industrieroboter müssen die zur Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) geeigneten Systeme einfach bedienbar sein, ihre Umgebung wahrnehmen und situationsangepasst reagieren, um einerseits die gewünschte Flexibilität herstellen und andererseits das Gefährdungspotential für Werker minimieren zu können oder die Sicherheit auf Grund ihrer speziellen Bauweise sicherstellen.

Die Realisierung solch intelligenter, autonomer und trotz der notwendigen Integration zusätzlicher Komponenten möglichst kostengünstiger Roboter wird durch eine Reihe aktueller Entwicklungen begünstigt, was sich auch im durch die International Federation of Robotics (IFR) prognostizierten Wachstum [1] für den generellen Bereich der Servicerobotik zeigt. Viele der für den

Einsatz in Medizin, Rehabilitation und Pflege, Logistik, Verkehr, Haushalt oder Landwirtschaft benötigten Fähigkeiten dieser zukünftig zu erwartenden Systeme lassen sich auf die Anforderungen in der industriellen Fertigung übertragen. Einzusetzende Hardware-Komponenten wie Prozessoren und Sensoren werden immer leistungsfähiger, kompakter und kostengünstiger. Beispielsweise erschien 2010 mit der Microsoft Kinect-Kamera zur intuitiven Kommandoeingabe bei der Spielekonsole Xbox erstmals eine relativ hochauflösende 3D-Kamera als preiswertes Konsumgüterprodukt auf dem Markt und bot die Voraussetzung für einen erschwinglichen und damit breiten Einsatz von an sich ungefährlichen (Service-)Robotersystemen mit Möglichkeiten zur Umgebungswahrnehmung und -interpretation. Mittlerweile gibt es eine Reihe weiterer kostengünstiger und leistungsfähigerer Tiefenkameras, beispielsweise von Asus mit der Xtion Pro Live, Microsoft mit der Kinect-Kamera der zweiten Generation oder Intel mit der RealSense-Kamera. Ein anderer in den letzten Jahren zu beobachtender Trend ist der steigende Einsatz von Open Source-Software, was die Neuentwicklung häufig benötigter Algorithmen entfallen lässt oder beschleunigt und die Konzentration auf innovative Technologielösungen ermöglicht. So basieren der 2012 auf dem US-amerikanischen Markt erschienene Industrieroboter Baxter als auch der seit 2015 erhältliche und mit einem Roboterarm ausgestattete mobile Serviceroboter Fetch [2] auf dem frei verfügbaren Software-Framework ROS (Robot Operating System). Neben der Marktreife immer leistungsfähigerer Serviceroboter ist eine Zunahme von industriellen und auf Basis ihrer Konstruktion und Steuerung grundsätzlich zur Mensch-Roboter-Kooperation geeigneten Leichtbaurobotern zu beobachten, was sich beispielsweise am rapiden Umsatzwachstum von Universal Robots [3], dem dänischen Hersteller der Roboterserien UR3, UR5 und UR10, zeigt. Auch die Normung trägt dem Bedarf nach neuartigen kollaborierenden Robotersystemen Rechnung, indem beispielsweise feste Grenzwerte der alten Industrieroboternorm von 2006 [4] in der aktuellen Fassung aus dem Jahr 2011 [5] entfallen und der Risikobeurteilung ein höherer Stellenwert eingeräumt wird [6]. Ein weiterer aktuell zu beobachtender Trend und Treiber für die Mensch-Roboter-Kooperation ist die Ausrichtung von Fertigungsanlagen auf die Anforderungen der sogenannten Industrie 4.0, der 4. industriellen Revolution. Hierunter fallen die zunehmende Digitalisierung und Vernetzung von einzelnen Produktionsgütern, Maschinen, Zellen und ganzen Fabriken und damit die Ermöglichung von höherer Adaptivität, Produktivität und Wirtschaftlichkeit von Fertigungsanlagen durch Cyberphysische Systeme. Sichere, intelligente und auf Grund geringen Planungs-, Installations- und Einrichtungsaufwands nach Bedarf flexibler einsetzbare kollaborierende Robotersysteme können hierfür einen wesentlichen Beitrag leisten.

1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit entwickelt einen Beitrag zur Realisierung eines Industrieroboter basierten Assistenzsystems zur Befähigung der Mensch-Roboter-Kooperation in der Fertigung. Hierbei werden insbesondere Lösungsansätze zur Überwindung zentraler bestehender Probleme der Sicherheit sowie der Flexibilität beim Einsatz klassischer Industrieroboter mit inhärentem Gefährdungspotential entwickelt. Als Grundlage dient die seit wenigen Jahren verfügbare, hohe Bildwiederholraten bereitstellende und für den Anwendungsbereich vergleichsweise hochauflösende 3D-Kameratechnologie, welche zur sensorischen Erfassung des Roboterarbeitsraums eingesetzt wird. Auf Basis der Interpretation der Sensordaten können dynamische Objekte detektiert und ein aktuelles Umgebungsmodell des Roboters generiert werden. Dieses bietet die Basis für eine Online-Kollisionsvermeidung von Standard-Industrierobotern, um während des Betriebs ohne trennende Schutzeinrichtungen Kollisionen mit Menschen sowie der Peripherie sicher zu vermeiden. Des Weiteren werden die Daten zur Realisierung einer autonomen Bewegungsgenerierung des Roboters genutzt, um bei sich ändernden Fertigungsbedingungen auf eine aufwändige Programmerstellung und -anpassung durch Experten verzichten zu können. Der Aufbau dieser Arbeit ist in Bild 1 zusammenfassend skizziert.

Zunächst wird im folgenden Kapitel der Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme dargestellt. Neben der Klärung notwendiger Begriffe und der relevanten aktuellen Gesetzes- und Normenlage in Deutschland werden autonome Bahnplanungsverfahren für Industrieroboter, Open Source-Software im Bereich der Robotik sowie am Markt verfügbare Systeme und aktuelle Forschungsansätze zur Mensch-Roboter-Kooperation erläutert.

Darauf basierend werden in Kapitel 3 bestehende Defizite im Bereich kollaborierender Industrierobotersysteme identifiziert und ein Gesamtkonzept zur Umsetzung zentraler Handlungsbedarfe für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem entwickelt.

Als Basis für die weiteren Teilkomponenten der Online-Kollisionsvermeidung sowie der autonomen Bahnplanung behandelt Kapitel 4 die 3D-Kamera gestützte Erfassung und Interpretation des Roboterarbeitsraums. Dabei wird auf die notwendigen Grundlagen, die einzelnen Ablaufschritte sowie die Evaluierung der Umgebungswahrnehmung detailliert eingegangen.

In Kapitel 5 erfolgt die Darstellung eines neuartigen Bahnplanungsverfahrens für serielle Industrieroboter auf Basis der Zellzerlegung des Roboterarbeitsraums. Zielstellung hierbei ist die Generierung eines möglichst intuitiv nachvollziehbaren, kollisionsfreien Pfads unter Ausnutzung möglicher Konfigurationswechsel. Beginnend mit einem generalisierten Ansatz werden anschließend eine Konkretisierung für den weit verbreiteten Sechsachs-Knickarmroboter mit Zentralhand sowie eine Bewertung des Verfahrens vorgenommen.

Stand der Wissenschaft und Technik von robotischen Assistenzsystemen (Kapitel 2)

- Begriffsdefinitionen, Gesetzes- und Normenlage
- Autonome Bahnplanungsverfahren für Industrieroboter
- Open-Source-Software f
 ür Roboter-Assistenzsysteme
 - MRK-Systeme aus Industrie und Forschung

Konzeption eines Roboter-Assistenzsystems in der Fertigung (Kapitel 3)

Identifizierung bestehender Defizite

 Umsetzung zentraler Handlungsbedarfe in einem Industrieroboter basierten Unterstützungssystem

3D-Kamera basierte Erfassung und Interpretation des Arbeitsraums (Kapitel 4)

- Grundlagen zur Realisierung der Umgebungswahrnehmung
 - Umgebungserfassung und Objektdetektion
 - Evaluierung und Möglichkeiten zur Optimierung

Autonome Bahngenerierung für serielle Industrieroboter (Kapitel 5)

Ein generalisiertes Verfahren auf Basis der Zellzerlegung des Arbeitsraums

- Konkretisierung für einen Sechsachs-Knickarmroboter mit Zentralhand
 - Evaluierung des realisierten Bahnplanungsverfahrens

Sichere Kollisionsvermeidung zwischen Industrierobotern und Personen (Kapitel 6)

- Online-Kollisionsvermeidung auf Basis von Mindestabständen
 - Realisierung der Kollisionsvermeidung
 - Diskussion des vorgestellten Ansatzes

Integration in ein Montagesystem zur Unterstützung leistungsgeminderter Mitarbeiter (Kapitel 7)

- Motivation und Randbedingungen
- Aufbau und Teilkomponenten
- Diskussion des Demonstratorsystems

Zusammenfassung und Ausblick (Kapitel 8)/ Summary and prospects (Kapitel 9)

Bild 1: Aufbau der Arbeit

Während der Bewegung des Roboters ist zur Realisierung eines sicheren, kollaborierenden Systems mit vorhandenem Verletzungspotential eine Gefährdung von Personen durch Einhaltung von Mindestabständen sicher zu vermeiden. Hierfür stellt Kapitel 6 einen Ansatz mittels Abstandstests auf Basis aktueller Umweltmodelle vor.

Die Integration der zuvor entwickelten Lösungsansätze in ein beispielhaftes, Industrieroboter basiertes Montagesystem zur Unterstützung leistungsgeminderter Personen in einer Behindertenwerkstatt wird im siebten Kapitel beschrieben.

Abschließend erfolgen eine Zusammenfassung der wesentlichen Beiträge dieser Arbeit sowie ein Ausblick auf weitere Entwicklungs- und Forschungsbedarfe des Themenfelds.

2 Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme

Die folgenden Teilkapitel dienen zur Darstellung der notwendigen Grundlagen im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme. Neben der Klärung von auftretenden Begrifflichkeiten und der Einordnung in die geltende Rechts- und Normenlage hinsichtlich der Sicherheit von Industrierobotern werden die Grundlagen der autonomen Roboterbahnplanung erläutert, auf vorhandene Open Source-Software zur Erstellung robotischer Assistenzsysteme eingegangen sowie am Markt verfügbare und aktuelle Forschungslösungen im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation evaluiert.

2.1 Grundlagen und normative Randbedingungen robotischer Assistenzsysteme

Um den Rahmen und die Zielsetzung dieser Arbeit abzugrenzen, werden wichtige auftretende Begriffe im Umfeld der Mensch-Roboter-Kooperation auf Basis aktueller Normen und technischer Regeln definiert und relevante Gesetze und Normen zur Sicherheit von Industrierobotern in Deutschland dargestellt.

2.1.1 Klärung von Begriffen im Umfeld der Mensch-Roboter-Kooperation

Für ein einheitliches Verständnis werden im Folgenden Definitionen wichtiger Begriffe, die im Fortlauf dieser Arbeit verwendet werden, aufgeführt. Andere Fachbegriffe werden im Kontext des jeweiligen Themenbereichs erläutert. Soweit vorhanden, wird auf in Deutschland gültige Normen bzw. aktuelle Normenentwürfe und Regelwerke zurückgegriffen. Dies sind u. a. VDI-Richtlinien und die E DIN EN ISO 8373:2010 "Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch" [7], der Entwurf der zu ersetzenden gleichnamigen Norm aus dem Jahr 1996, und Teil zwei der aktuellen Industrieroboternorm DIN EN ISO 10218-2: 2011 "Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration" [8].

Industrieroboter sind nach [7] "automatisch gesteuerte(…), frei programmierbare(…) Mehrzweck-(…)Manipulator[en] (…) [, die] in drei oder mehr Achsen (…) programmierbar (…) [sind] und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein (…) [können]". 2 Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme

Ein Manipulator ist hierbei eine "Maschine, deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht, die durch Gelenke oder gegeneinander verschieblich verbunden sind, mit dem Zweck, Gegenstände (Werkstücke oder Werkzeuge) zu greifen und/oder zu bewegen, üblicherweise mit mehreren Freiheitsgraden" [7]. Als Anmerkung ist in der Norm aufgeführt, dass ein Industrieroboter somit den Manipulator, einschließlich dessen Antrieb, die Steuerung mit Programmierhandgerät und Kommunikationsschnittstelle umfasst. Serviceroboter werden klar von Industrierobotern abgegrenzt, indem deren Anwendung nicht im industriellen Einsatz liegen soll. Zu dieser Unterscheidung ist anzumerken, dass in der Forschungs- und Industriepraxis eine derart strikte Trennung nicht immer erfolgt. Vielmehr liegt beim Serviceroboter der Fokus auf dem Unterstützungsgedanken und der daraus abgeleiteten Annahme einer größeren Intelligenz und Autonomie zur Ausführung komplexerer Tätigkeiten auf Basis von Sensordaten. Beispielsweise werden bei einer 2012 veröffentlichten Studie [9] zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von Servicerobotik-Anwendungen der Fraunhofer-Institute für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) und für System- und Innovationsforschung (ISI) auch assistierende Roboter in der Produktion zur Servicerobotik gezählt.

Die VDI-Richtlinie 2860 "Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole" [10] aus dem Jahr 1990 enthält ebenfalls Definitionen zu den beiden Begriffen des Industrieroboters und des Manipulators. Industrieroboter sind nach [10] "universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen". Die VDI-Richtlinie weicht hier insofern von der ISO 8373 ab, als dass sie Industrieroboter und Manipulatoren als unterschiedliche Gruppen von Bewegungseinrichtungen, einerseits autonom agierend und andererseits manuell gesteuert, und Industrieroboter somit nicht als eine spezielle Art von Manipulatoren ansieht. Hinsichtlich des Verständnisses des Begriffs Industrieroboter können beide Definitionen im weiteren Verlauf dieser Arbeit angewandt werden.

Ein **Industrierobotersystem** besteht nach [7] aus einem oder mehreren "Industrieroboter(n) (...)[,] Endeffektor(en) (...) [und] allen Maschinen, Einrichtungen [,] Geräten oder Sensoren, die den Roboter bei der Ausführung der Aufgabe unterstützen". In [8] wird eine Industrieroboterzelle definiert als "ein Robotersystem oder mehrere Robotersysteme einschließlich dazugehöriger Maschinen und Ausrüstung sowie dem dazugehörigen, geschützten Bereich und Schutzmaßnahmen".

In der VDI-Richtlinie 6222 Blatt 1 "Bionik - Bionische Roboter" [11] werden **bionische Roboter** definiert als *"Roboter, (...) [die] mindestens ein umgesetztes dominantes biologisches Prinzip in sich (...) [tragen] und zumeist nach dem Prozess des bionischen Arbeitens entstanden [sind]*". Als Beispiel werden unter anderem leichte und nachgiebige Robotersysteme für die direkte, ungefährlichere Kooperation mit dem Menschen, in Abgrenzung zu herkömmlichen, *starren und präzisen Industrierobotern, genannt. Bionische Roboter sind* nicht Gegenstand des Assistenzsystems dieser Arbeit.

Als **Kobots** bzw. **Cobots** (kollaborierende Roboter) werden spezielle, halbautonome Manipulatoren bezeichnet, die manuell gesteuert und innerhalb virtueller Wände kraftverstärkt bewegt werden [12]. Im Gegensatz zu sogenannten, zum Handhaben von Lasten dienenden **Balancern** (bzw. handgeführten Manipulatoren, Ausgleichshebern), können sie neben der Schwerkraft auch Trägheits- und Reibkräfte ausgleichen [13].

Gemäß [7] ist unter Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) ein "Austausch von Informationen und Handlungen zwischen Mensch und Roboter (...) zur Ausführung einer Aufgabe" zu verstehen. Bei der Kollaboration wird "Arbeit (...) von (einem) Roboter(n) (...) und (einem) Menschen zur Erfüllung einer Auf*qabe gemeinsam erlediqt*" [7]. Ein **kollaborierender Roboter** ist *"für das di*rekte Zusammenwirken mit einem Menschen konstruiert" [7]. Nach der DGUV-Information 209-074 (ehemals BG-Information 5123) "Industrieroboter" [14] dürfen "[k]ollaborierende (assistierende) Roboter (...) mit Personen in Kontakt kommen, um sie bei manuellen Tätigkeiten zu unterstützen, z. B. zur Verbesserung der Arbeitsergonomie". In der Literatur findet sich neben der Mensch-Roboter-Kooperation (z. B. bei [15] [16]) und der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) (z. B. bei [17] [18]) auch der Begriff der Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) (z. B. bei [19] [20]). Sie werden teilweise synonym für das gemeinsame Arbeiten in einem überlappenden Arbeitsraum oder mit differenzierterer und abstufender Bedeutung (z. B. bei [21]) verwendet. Der in diesem Kontext ebenfalls relevante Begriff der Mensch-Roboter-Koexistenz (z. B. bei [22] [23]) wird in der Literatur einheitlicher verstanden als gemeinsam geteilter Arbeitsraum von Werker und Roboter ohne eines geplanten direkten Kontakts und kann damit als Spezialfall einer MRK interpretiert werden. Da in der relevanten Norm [7] sowohl Kooperation als auch Kollaboration mit einer ähnlichen Definition vertreten sind, werden sie in dieser Arbeit als gleichbedeutend angesehen. Im weiteren Verlauf wird jedoch bevorzugt der Begriff der Mensch-Roboter-Kooperation verwendet und hier2 Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme

unter im Speziellen ein Industrierobotersystem verstanden, das **ohne trennende Schutzeinrichtungen (OTS)** in der direkten Umgebung von Personen und somit in einem gemeinsamen Arbeitsraum einsetzbar ist.

Der Begriff eines Roboter-Assistenzsystems bzw. -Unterstützungssystems leitet sich durch die Unterstützungsfunktion von Mitarbeitern bei der Handhabung, Montage oder Bearbeitung ab. Die Begriffe Unterstützungssystem und Assistenzsystem sind in der Literatur nicht einheitlich definiert und synonym verwendbar [24]. In der vorliegenden Arbeit werden diese, anders als in [24], nicht von autonomen und teilautonomen Systemen anhand ihres Automatisierungsgrades abgegrenzt, sondern gemäß ihrer direkten Wortbedeutung und des allgemeinen Sprachgebrauchs von Assistenz interpretiert. Für die direkte Kooperation geeignete Industrieroboter-Unterstützungssysteme übernehmen nach dem Verständnis in dieser Arbeit autonom oder teilautonom Aufgaben, welche den Werker körperlich entlasten (z. B. durch das Handhaben schwerer Werkstücke), den Produktionsprozess vereinfachen und beschleunigen (z. B. als Haltevorrichtung bei Montagevorgängen) oder bei hoher Variantenvielfalt und geringen Losgrößen durch einfache Programmierung flexible, hybride und auch in direkter Umgebung für den Menschen ungefährliche Automatisierungslösungen darstellen. Die mögliche Einteilung in vier verschiedene Kategorien von kollaborierenden Robotern gemäß der gültigen Industrieroboternorm erfolgt im nächsten Teilkapitel im Rahmen der Darstellung der geltenden Sicherheitsbestimmungen.

2.1.2 Aktuelle Gesetzes- und Normenlage zur Sicherheit von Industrierobotern in Deutschland

Gesetzliche Grundlage der maßgebenden Sicherheitsvorgaben für Industrieroboter in Deutschland ist die seit 2006 im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) gültige **Maschinenrichtlinie (MRL)** 2006/42/EG. Sie regelt die Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen hinsichtlich der Konstruktion und des Baus von in der Richtlinie erfassten Maschinen, bevor sie zum ersten Mal in Verkehr gebracht werden dürfen [25] [26]. In Deutschland ist die EU (Europäische Union)- bzw. EG (Europäische Gemeinschaft)-Maschinenrichtlinie, welche keine unmittelbare rechtliche Wirkung, sondern einen verbindlichen, nationalen Gesetzgebungsauftrag darstellt, durch die 9. Verordnung (**Maschinenverordnung**, 9. ProdSV) zum **Produktsicherheitsgesetz** (ProdSG) in nationales Recht umgesetzt [26] [27]. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht relevanter Rechtsvorschriften, technischer Spezifikationen und Normen zur Sicherheit von Maschinen bezüglich Industrieroboter. Tabelle 1: Übersicht verbindlicher Rechtsvorschriften, technischer Spezifikationen und Normen zur Maschinensicherheit bezüglich Industrieroboter unter Nutzung von [26]

Rechtsvorschriften						
EU-Richtlinien (keine unmittelbare rechtliche Wirkung, sondern verbindli- cher, nationaler Ge- setzgebungsauftrag)	Deutsche Gesetze (stellen wie Verord- nungen verbindliche Rechtssätze dar)	Verord (Rechts Exekuti Gesetz)	Inungen snormen der ive zu einem	Technische Regeln (TR) (Empfehlungen und technische Vor- schläge zum Einhal- ten eines Geset- zes/ einer Verord- nung)		
Maschinenrichtlinie 2006/42/EG	Produktsicherheits- gesetz (ProdSG)	9. Vero ProdSG ordnun	rdnung zum 6 (Maschinenver- 1g, 9. ProdSV)	-		
Technische Spezifikat	tionen					
Berufsgenossenschaft	liches Regelwerk					
DGUV-Vorschriften (Unfallverhütungsvor- schriften, rechtsver- bindlich für Unter- nehmer und Versi- cherte)	DGUV-Regeln (Konkretisierung staatlicher Arbeits- schutz- oder DGUV- Vorschriften)	DGUV-Informationen (Hinweise und Empfeh- lungen zur praktischen Anwendung von Rege- lungen)		DGUV-Grundsätze (Maßstäbe in be- stimmten Verfahrens- fragen)		
-	-	DGUV- 209-074 5123) "I DGUV- HM-08 rende F	Information 4 (ehemals BGI ndustrieroboter" Information FB o "Kollaborie- Robotersysteme"	-		
VDE-Bestimmungen						
Normen						
Harmonisierte EN-Norr (Konformitätsvermutur	nen Nationale Nor	men	Harmonisierte EN-NormenNationale NormenNicht harmonisierte EN- und ISO- Normen			

Neben der Maschinenrichtlinie gibt es weitere europäische Richtlinien (RL) wie die Niederspannungs-RL oder die Arbeitsmittelbenutzungs-RL zum Arbeitsschutz - und deren Umsetzungen in deutsches Recht. Da sie allgemeine, aber keine speziellen Vorgaben für industrielle Roboter aufweisen, werden sie nicht näher behandelt. Die Maschinenrichtlinie verpflichtet Hersteller zur Durchführung einer Risikobeurteilung, um alle nötigen Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen ihrer Produkte zu ermitteln [25]. Zur Konkretisierung der in Anhang I der MRL genannten grundlegenden Anforderungen dienen **harmonisierte EN-Normen** (EN, Europäische Norm), welche unter einem Mandat der Europäischen Kommission erarbeitet werden, im Amtsblatt der EU zur jeweiligen Richtlinie aufgeführt und von den 2 Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme

Mitgliedsstaaten unverändert als nationale Normen zu übernehmen sind [26]. Normen sind, anders als Gesetze und Verordnungen, nicht rechtsverbindlich, sondern stellen lediglich technische Empfehlungen dar [26] [27]. Von harmonisierten EN-Normen geht jedoch die sogenannte **Konformitätsvermutungswirkung** aus, nach der Hersteller bei deren Anwendung davon ausgehen können, alle Anforderungen der Maschinenrichtlinie zu erfüllen [26].

Eine Auswahl wichtiger deutscher Sicherheitsnormen bzw. normenähnlicher Veröffentlichungen im Rahmen von kollaborierenden, nicht leistungsbegrenzten Industrierobotersystemen ist in Tabelle 2 aufgelistet. Dabei wird angegeben, ob die Normen nach der MRL harmonisiert sind. Weitere, in diesem Kontext weniger relevante Normen, wie beispielsweise zu feststehenden, trennenden Schutzeinrichtungen, werden hierbei nicht aufgeführt.

Zur Dokumentation der Übereinstimmung mit der MRL (und ggf. weiteren Richtlinien) ist von Herstellern für verwendungsfertige, vollständige Maschinen eine **EG-Konformitätserklärung**, für unvollständige Maschinen eine **Einbauerklärung**, einschließlich einer Montageanleitung, auszustellen. Anschließend darf für vollständige Maschinen eine **CE-Kennzeichnung** (CE, Conformité Européenne) angebracht werden. Einbauerklärungen geben darüber Auskunft, welche Anforderungen der Maschinenrichtlinie eingehalten werden. Eine CE-Kennzeichnung stellt somit grundsätzlich eine Selbstzertifizierung dar [27]. Roboter sind nach der MRL unvollständige Maschinen und besitzen somit keine CE-Kennzeichnung. Als vollständige Maschine gilt erst das für eine bestimmte Anwendung integrierte Industrierobotersystem. [26]

Neben Normen existieren auch technische Spezifikationen zur Maschinensicherheit (vgl. Tabelle 1), wie berufsgenossenschaftliche Regelwerke oder VDE-Bestimmungen [26]. Das Regelwerk der Berufsgenossenschaften, welche mit den Unfallversicherungsträgern der öffentlichen Hand im Dachverband der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) zusammengeschlossen sind, gliedert sich hierarchisch in die vier Ebenen der DGUV-Vorschriften, -Regeln, -Informationen und -Grundsätze [26]. DGUV-Vorschriften, sogenannte Unfallverhütungsvorschriften, stellen dabei nach dem Sozialgesetzbuch autonomes Satzungsrecht dar und sind für die Versicherten und Mitgliedsunternehmer der Berufsgenossenschaften verbindlich [26]. DGUV-Informationen enthalten Hinweise und Empfehlungen zur praktischen Anwendung von Regelungen [26]. Zur Sicherheit von Industrierobotern kann die DGUV-Information 209-074, ehemals BG-Information 5123, "Industrieroboter" [14] sowie für speziell leistungs- und kraftbegrenzte Robotersysteme die 2015 erstmals veröffentlichte DGUV-Information "Kollaborierende Robotersysteme" [28] verwendet werden.

Tabelle 2: Auswahl wichtiger deutscher Normen u. Ä. zur Sicherheit von kollaborierenden, nicht leistungsbegrenzten Industrierobotern, Auflistung nach A-, B- und C-Norm sowie aufsteigender Nummer unter Nutzung von [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [5] [8] [39] [40] [41]

Norm-Typ o.Ä.	Nummer	Titel (Hauptanwendungsbereich hervorgehoben)	
Typ-A-Norm (harmonisiert)	DIN EN ISO 12100:2011	Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungs- leitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung	
Technischer Bericht	DIN ISO/TR 14121-2:2013 (DIN SPEC 33885)	Sicherheit von Maschinen - Risikobeurteilung - Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele	
Typ-A-Norm	DIN EN 61508 :2011 (Teile 1-7) (VDE 0803)	Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektri- scher/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme	
Typ-B-Norm (harmonisiert)	DIN EN ISO 11161:2010	Sicherheit von Maschinen - Integrierte Fertigungssys- teme - Grundlegende Anforderungen	
Typ-B-Norm (harmonisiert)	DIN EN ISO 13849-1 :2016	Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestal- tungsleitsätze	
	DIN EN ISO 13849-2:2013	Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung	
Typ-B-Norm (harmonisiert)	DIN EN ISO 13855:2010	Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzein- richtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwin- digkeiten von Körperteilen	
Typ-B-Norm (harmonisiert)	DIN EN ISO 1 3857 :2008	Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsabstände ge- gen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen	
Typ-B-Norm	DIN EN 62046 :2013 (VDE 0113-211)	Sicherheit von Maschinen - Anwendungen von Schutz- ausrüstungen zur Anwesenheitserkennung von Per- sonen	
Typ-C-Norm	DIN EN ISO 10218-1:2012	Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter	
(harmonisiert)	DIN EN ISO 10218-2:2012	Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration	
Typ-C-Norm (harmonisiert)	DIN EN 60204-1: 2007 (VDE 0113-1)	Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen	
Typ-C-Norm (harmonisiert)	DIN EN 61496-1: 2014 (VDE 0113-201)	Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 1: Allgemeine Anforderun- gen und Prüfungen	
Typ-C-Norm (harmonisiert)	DIN EN 62061 :2016 (VDE 0113-50)	Sicherheit von Maschinen - Funktionale Sicherheit si- cherheitsbezogener elektrischer , elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssys- teme	

2 Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme

Die Sicherheitsgrundnorm DIN EN ISO 12100 [30] stellt allgemeine Gestaltungsleitsätze zur Sicherheit von Maschinen bei deren Risikobeurteilung und Risikominderung auf. Sicherheitsnormen werden in Typ-A-, Typ-B- und Typ-C-Normen eingeteilt. Typ-A-Normen (Sicherheitsgrundnormen) geben allgemeine Gestaltungsleitsätze für Maschinen vor, während sich Typ-B-Normen (Sicherheitsfachgrundnormen) auf bestimmte Sicherheitsaspekte (Typ-B1-Normen), beispielsweise Sicherheitsabstände, oder Schutzeinrichtungen (Typ-B2-Normen) beziehen. [30] Sicherheitsanforderungen für eine spezielle Maschinenart werden in Typ-C-Normen (Maschinensicherheitsnormen) behandelt, welche bei einer Abweichung zu allgemeineren Normen Vorrang haben. Nach DIN EN ISO 12100 besteht eine Risikobeurteilung aus einer Risikoanalyse und einer Risikobewertung. Bei der Risikoanalyse müssen die Grenzen der Maschine festgelegt, Gefährdungen identifiziert und die damit verbundenen Risiken eingeschätzt werden. Die Risikobewertung ergibt daraufhin, ob eine Risikominderung notwendig ist. Diese ist zunächst immer durch eine inhärent sichere Konstruktion und erst in einem zweiten Schritt durch technische und ergänzende Schutzmaßnahmen umzusetzen. Erst anschließend können noch bestehende Restrisiken durch Benutzerinformationen verringert werden. [30] Ein praktischer Leitfaden zur Risikobeurteilung wird in DIN ISO/TR 14121-2 [31] gegeben.

In der Sicherheitsgrundnorm DIN EN 61508 [32] werden grundsätzliche Anforderungen an die funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Systeme festgelegt. Die Auslegung sicherheitsrelevanter Steuerungen für Maschinen können nach der Typ-B-Norm DIN EN ISO 13849-1 oder der DIN EN 62061 realisiert werden, wobei sich erstere bevorzugt für nichtelektrische bzw. nichtelektronische Komponenten anbietet, da sie explizit auch für hydraulische, pneumatische und mechanische Systeme anwendbar ist [32]. In der DIN EN ISO 13849-1 [34] wird der qualitative Ansatz der Einteilung sicherheitsbezogener Teile einer Steuerung (engl. "Safety-Related Parts of Control Systems", SRP/CS) in Kategorien aus der Vorgängernorm EN 954-1 [42] übernommen und um quantitative Größen in Form von Ausfallwahrscheinlichkeiten ergänzt. Für sicherheitsbezogene Teile einer Steuerung wird ein Performance Level (PL) bestimmt, der die Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls pro Stunde und damit deren Widerstandsfähigkeit gegenüber Fehlern in Form von fünf Stufen, PL a bis PL e, beschreibt. Der Performance Level a bezeichnet hierbei eine hohe und der Performance Level e eine geringe durchschnittliche gefahrbringende Ausfallwahrscheinlichkeit. Er wird u. a. durch die Systemstruktur, den Diagnosedeckungsgrad (engl. "Diagnostic Coverage", DC), der Ausfälle in Folge gemeinsamer Ursache (engl. "Common Cause Failure Fraction", CFF) und der mittleren Zeit bis zu einem gefahrbringenden Ausfall (engl. "Mean Time To Dangerous Failure", MTTF_d) bestimmt.

Wird der Sicherheitsfunktion von sicherheitsbezogenen Teilen einer Steuerung im Rahmen einer Risikobewertung eine hohe Risikominderung zugewiesen, müssen diese SRP/CS auch über einen hohen Performance Level verfügen. Der erforderliche Performance Level einer Sicherheitsfunktion kann über einen Risikograph nach DIN EN ISO 13849-1 anhand des Verletzungsgrads, der Häufigkeit bzw. Dauer der Gefährdungsexposition und der Möglichkeit der Gefährdungsvermeidung ermittelt werden, wie in Bild 2 links dargestellt. Die DIN EN **62o61** [41] beschreibt Anforderungen für **Sicherheits-Integritätslevel** (engl. "Safety Integrity Level", **SIL**), die ebenfalls die Fähigkeit sicherheitsbezogener Steuerungen eine Sicherheitsfunktion auszuführen, angeben. Von einem SIL kann auf einen PL geschlossen werden, umgekehrt ist dies jedoch nicht möglich. [43] Eine entsprechende Zuordnung zeigt Bild 2 rechts.



Bild 2: Risikograph nach DIN EN ISO 13849-1 zur Ermittlung des erforderlichen Performance Level (PL) (links) mit Schwere der Verletzung S (S1 leicht, S2 ernst), Häufigkeit und/ oder Dauer der Gefährdungsexposition F (F1 selten bis weniger häufig bzw. kurz, F2 häufig bis dauernd bzw. lang) und Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung P (P1 möglich, P2 kaum möglich); Zuordnung von Sicherheits-Integritätslevel (SIL) zu Performance Level (rechts); unter Nutzung von [34] [43]

In der DIN EN **60204-1** [39] werden allgemeine Sicherheitsanforderungen an die elektrische Ausrüstung von Maschinen gestellt. Hierbei werden drei **Stoppkategorien** definiert. Unter der Stoppkategorie o (engl. "Safe Torque Off", STO) wird ein ungesteuertes Stillsetzen durch ein sofortiges Unterbrechen der Energiezufuhr verstanden. Die beiden anderen Kategorien bezeichnen ein gesteuertes Stillsetzen, wobei beim Stopp der Kategorie 1 (engl. "Safe Stop 1", SS1) die Energiezufuhr erst nach Erreichen des Stillstands und bei der Kategorie 2 (engl. "Safe Stop 2", SS2) nicht unterbrochen wird. [39] [44]

Schutzeinrichtungen zählen zu den **technischen Schutzmaßnahmen** und werden unterteilt in feststehende und bewegliche trennende Schutzeinrichtungen, wie Zäune oder Tore, und nichttrennende, sensitive Schutzeinrichtungen (engl. "Sensitive Protective Equipment", SPE) zur Detektion von 2 Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme

Personen [30]. Werden feststehende, trennende Schutzeinrichtungen verwendet, können notwendige **Sicherheitsabstände** der Typ-B-Norm DIN EN ISO **13857** [37] entnommen werden. Informationen zur Anwendung von sensitiven Schutzeinrichtungen zur **Anwesenheitserkennung von Personen** stellt die Sicherheitsfachgrundnorm DIN EN **62046** [38] bereit. Sensitive Schutzeinrichtungen können in druckempfindliche Schutzeinrichtungen, wie Schaltmatten und Leisten, und elektrosensitive (engl. "Electro-Sensitive Protective Equipment", ESPE) bzw. **berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS)**, wie Lichtvorhänge oder -gitter, eingeteilt werden [30] [8]. Teil 1 der Typ-C-Norm DIN EN **61496** [40] behandelt allgemeine Anforderungen berührungslos wirkender Schutzeinrichtungen, die weiteren Teile 2 bis 4 [45] [46] [47] [48] legen spezielle Anforderungen für einzelne Funktionsprinzipien dar. Die Typ-B-Norm DIN EN ISO **13855** [36] stellt u. a. **Annäherungsgeschwindigkeiten** für die Berechnung von Mindestabständen sensitiver Schutzeinrichtungen bereit.

Die Maschinensicherheitsnorm DIN EN ISO 10218 legt Sicherheitsanforderungen für Industrieroboter fest. In Teil 1 [5] werden die Gestaltung und der Bau des Roboters behandelt, Teil 2 [8] bezieht sich auf das komplette Robotersystem. Die DIN EN ISO 10218-1 fordert hinsichtlich der sicherheitsbezogenen Leistungsfähigkeit von Steuerungssystemen einen Performance Level (PL) d mit Struktur der Kategorie 3 nach DIN EN ISO 13849-1 oder einen Safety Integrity Level (SIL) 2 nach DIN EN 62061, falls eine Risikobeurteilung nichts anderes ergibt. Die Kategorie 3 besagt hierbei unter anderem, dass ein einzelner Fehler nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen darf [34]. Im Rahmen der Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb werden vier verschiedene Betriebsarten genannt, die in Bild 3 aufgeführt sind. Beim sicherheitsbewerteten überwachten Halt stoppt der Roboter seine Bewegung oder reduziert seine Geschwindigkeit bis zu einem Stopp der Kategorie 2 nach DIN EN 60204-1, sobald eine Person den Kollaborationsraum betritt. Der Stillstand wird über ein sicherheitsbezogenes Steuerungssystem überwacht und ein Ausfall der Stoppfunktion bewirkt einen Stopp der Kategorie o. [5] Bei der Betriebsart der Handführung muss sich diese nahe am Endeffektor befinden und über einen manuell auslösbaren Not-Halt, der zu einer Wegnahme der Energie an den Roboterantrieben führt und als Stoppkategorie o oder 1 nach DIN EN 60204-1 ausgeführt ist, sowie eine Zustimmungseinrichtung verfügen. Die maximale Geschwindigkeit ist durch eine Risikobeurteilung festzulegen und die Geschwindigkeit sicher zu überwachen. Wird ein Roboter in der Kollaborationsart der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung betrieben, sind eine festgelegte Geschwindigkeit und ein festgelegter Abstand zu Personen unter Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeiten und der Anforderungen an den Mindestabstand nach
2.1 Grundlagen und normative Randbedingungen robotischer Assistenzsysteme



Bild 3: Anforderungen an die vier Kollaborationsarten für Industrieroboter nach DIN EN ISO 10218-1:2012 [5]

DIN EN ISO 13855 einzuhalten. Die Benutzerinformation muss über eine Anleitung zur Realisierung der Geschwindigkeiten und Abstände verfügen und ein erkannter Ausfall der Geschwindigkeits- und Abstandsfunktion zu einem Sicherheitshalt führen, der anders als ein Not-Halt auch automatisch auslös- und zurückstellbar sein kann. Verfügt ein Roboter über eine zusätzliche neben einer als Stoppkategorie o oder 1 ausgeführte Sicherheitshalt-Funktion, kann diese auch die Stoppkategorie 2 mit einer anschließenden Überwachung des Stillstands anwenden, wobei eine unbeabsichtigte Roboterbewegung oder ein Ausfall der Sicherheitshalt-Funktion einen Stopp der Kategorie o auslösen müssen. Zusätzlich ist die DIN EN ISO 10218-2 zur Gestaltung des

kollaborierenden Betriebs im Gesamtsystem anzuwenden. Es wird, wie auch bei der Kollaborationsart der Leistungs- und Kraftbegrenzung, auf die ISO/TS 15066 "Robots and robotic devices - Safety requirements - Industrial collaborative workspace" verwiesen. Diese technische Spezifikation soll biomechanische Grenzwerte für zulässige Kontakte zwischen Roboter und Mensch enthalten [49] und basiert auf den "BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie - Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern" [50] [51]. Die Leistungs- und Kraftbegrenzung kann entweder durch eine inhärent sichere Konstruktion oder durch steuerungstechnische Maßnahmen realisiert werden. Bei Überschreitung eines Grenzwertes muss ein Sicherheitshalt erfolgen. Einzelheiten zum Einstellen von Grenzwerten sind in der Benutzerinformation anzugeben. Auch hier ist die DIN EN ISO 10218-2 zur Gestaltung des kollaborierenden Betriebs im Gesamtsystem anzuwenden. [5] Konkrete Grenzwerte der Vorgängernorm [4], wie eine maximale Robotergeschwindigkeit von 250 mm/s bei der Geschwindigkeits- und Positionsüberwachung oder eine Begrenzung der statischen Kraft auf 150 N und der dynamischen Leistung auf 80 W, sind in der aktuellen Norm nicht mehr enthalten [51]. Bei der Festlegung von Grenzwerten spielt die Risikobeurteilung nun eine wichtigere Rolle [6]. Der aktive kollaborierende Betrieb muss durch eine visuelle Anzeige signalisiert werden. [5]

Abschließend sei noch erwähnt, dass die DIN EN ISO 11161 [33] Sicherheitsanforderungen für integrierte Fertigungssysteme (engl. "Integrated Manufacturing Systems", IMS) vorgibt. Bei Service- bzw. Haushalts- und Assistenzrobotern, die nicht dem industriellen und medizinischen Bereich zuzuordnen sind, ist die Typ-C-Norm DIN EN ISO 13482:2014 "Roboter und Robotikgeräte - Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter" [52] zu beachten.

2.2 Autonome Bahnplanungsverfahren für Industrieroboter

Die Bahn- bzw. Pfad- oder Wegplanung (engl. "path planning") geht auf das sogenannte "Piano Movers' Problem" zurück, das die Suche eines kollisionsfreien Wegs für einen polygonalen Roboter (wie einen zu verschiebenden, vereinfacht betrachteten Flügel) in der Ebene beschreibt [53] [54]. Unter einer **Bahn** (engl. "path") eines Roboters wird die rein geometrische Anordnung von anzufahrenden Punkten im Achs- oder Arbeitsraum verstanden, während eine **Trajektorie** (engl. "trajectory") eine zeitabhängige Bahn, z. B. auf Basis von Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen an jedem Wegpunkt, bezeichnet [54]. Die Begriffe Bahn, Pfad und Weg werden im deutschen Sprachgebrauch in der Regel synonym verwendet. Die Bahnplanung kann der **Bewegungsplanung** (engl. "motion planning") zugeordnet werden, die u. a. die vier Teilbereiche Navigation (engl. "navigation"), Abdeckung (engl. "coverage"), Lokalisierung (engl. "localization") und Kartierung (engl. "mapping") umfasst (siehe Bild 4) [55]. Neben dieser Begriffseinordnung sind jedoch auch andere Eingruppierungen denkbar. Beispielsweise kann die Abdeckung als Unterkategorie der Navigation angesehen werden.



Bild 4: Wesentliche Teilbereiche der Roboterbewegungsplanung unter Nutzung von [55]

Ziel der Abdeckung (engl. "coverage") ist es, alle Punkte eines definierten Bereichs, wie beim Lackieren oder Staubsaugen, abzufahren [55]. Bei der Lokalisierung (engl. "localization") ist die aktuelle Pose, d. h. die Position und Orientierung, eines mobilen Roboters zu bestimmen [55]. Im Rahmen der Kartierung (engl. "mapping") wird mittels Sensoren eine Karte einer unbekannten Umgebung erstellt. Bei Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) werden die Lokalisierung und Kartierung gleichzeitig ausgeführt. Unter Navigation wird die Planung einer kollisionsfreien Bewegung zwischen einem Start- und Zielzustand verstanden [55] und beinhaltet die Bahnals auch Trajektorienplanung (engl. "path/ trajectory planning").

Die Aufgabe der **Bahnplanung** ist es, einen kollisionsfreien Pfad zwischen einer Start- und einer Zielpose unter Verwendung der vollständigen geometrischen Beschreibung eines Roboters und dessen Arbeitsraum *W* (engl. "workspace" bzw. Operationsraum, "operational space" [56] oder "taskspace" [57]) zu finden [58]. In der praktischen Anwendung entspricht der Arbeitsraum dem zwei- oder dreidimensionalen euklidischen Umgebungsraum, der durch den Roboter(-Endeffektor) erreichbar ist. Das Bahnplanungsproblem wird üblicherweise im **Konfigurationsraum** *C* (engl. "configuration space", "*C*-space" bzw. Achs- oder Gelenkraum [57], "joint space" [56]) definiert, der den Raum aller möglichen Achskonfigurationen eines Roboters repräsentiert [55]. Unter einer Konfiguration *q* wird die vollständige Beschreibung der Position aller Punkte eines Robotersystems [55] durch die Angabe aller Gelenkkoordinaten verstanden. Ein kollisionsfreier Pfad lässt sich somit als stetige Abbildung $\tau: [0, 1] \rightarrow C$ mit $\tau(0) = q_{start}$ und $\tau(1) = q_{Ziel}$ darstellen, bei welcher der Pfad keine Konfiguration enthält, bei der es zu einer Kollision

zwischen dem Roboter und einem Hindernis kommt [55]. Der freie Arbeitsraum W_{free} wird definiert als Menge aller Punkte des Arbeitsraums, die zu keinem Hindernis gehören

$$W_{free} = W \setminus \left(\bigcup_{i} WO_i \right) \tag{2.1}$$

wobei WO_i die Menge aller Punkte des i-ten Hindernisses im Arbeitsraum bezeichnet [55], das **Konfigurationsraumhindernis** CO_i (engl. "configuration space obstacle")

$$CO_i = \left\{ q \in C \mid R(q) \bigcap WO_i \neq \emptyset \right\}$$
(2.2)

entspricht der Menge aller Konfigurationen, bei denen der Roboter R ein Arbeitsraumhindernis WO_i schneidet, [55] und der **freie Raum** bzw. **freie Konfigurationsraum** C_{free}

$$C_{free} = C \setminus \left(\bigcup_{i} CO_{i} \right) \tag{2.3}$$

ergibt sich zur Menge aller Konfigurationen, bei denen der Roboter kein Hindernis schneidet [55]. Der Vorteil einer Planung im Konfigurationsraum besteht darin, dass ein beliebig komplexer Roboter als Punkt abgebildet wird und sich somit die eigentliche Planungsaufgabe erheblich vereinfacht. Problematisch gestaltet sich hingegen die Erstellung der Konfigurationsraumhindernisse, die nur bei niedrigdimensionalen Problemen explizit erfolgen kann.

Bei der **Trajektorienplanung** ist eine Trajektorie als kollisionsfreier Pfad mit zugehörigen Geschwindigkeiten in einem Zustandsraum (engl. "state space") zu ermitteln. Der Begriff der Trajektorienplanung wird teilweise auch synonym zur **kinodynamischen Planung** (engl. "kinodynamic planning") verwendet, die zusätzlich Beschleunigungen und ggf. weitere Randbedingungen berücksichtigt. [59] [58]

Bahnplanungsverfahren, die den freien Raum explizit darstellen, werden **kombinatorische Methoden** genannt [59]. Es kommen meist sogenannte vollständige Algorithmen zum Einsatz, die in einer endlichen Zeit immer eine Lösung finden oder feststellen, dass keine Lösung existiert [55]. Beispiele für kombinatorische Verfahren sind die Landkarten- und die Zellzerlegungsmethode [59]. Wie in Bild 5 dargestellt werden sie in dieser Arbeit zusammen mit der Potentialfeldmethode als **klassische Bahnplanungsverfahren** bezeichnet, da deren grundlegenden Ansätze bereits 1991 in [53] beschrieben sind. In den 1990er Jahren entwickelten sich **stichprobenbasierte** (engl. "sampling-based") bzw. **probabilistische Verfahren** (engl. "probabilistic planners"), die den freien Raum nicht mehr vollständig abbilden, sondern

einzelne Konfigurationen auswählen, auf Kollisionsfreiheit prüfen und zu Landkarten oder Bäumen verbinden [55] [54]. Sie eignen sich besonders für höherdimensionale Problemstellungen, für die sie häufig Lösungen in einer vergleichsweise kurzen Berechnungszeit finden. Anders als bei vielen kombinatorischen Verfahren kann jedoch nicht garantiert werden, dass eine Lösung gefunden wird [59].

Bahnplanungsverfahren										
Klassische Verfahren							Stichprobenbasierte Verfahren			
Kombinatorische Verfahren										
Landkarten- methode			Zell legu metl	zer- ngs- hode	Potential- feld- methode	Multi-Query- Verfahren	Single-Query- Verfahren			
Sichtbarkeitsgraph	Voronoi-Diagramm	Freeway-Methode	Silhouetten-Methode	Exakte Zellzerlegung	Approximative Zellzerlegung		Probabilistic Roadmaps (PRM)	Expansive- Spaces Trees (EST)	Rapidly-Exploring Random Trees (RRT)	Single-query Bi-directional Lazy collision checking (SBL)

Bild 5: Einteilung von ausgewählten Bahnplanungsverfahren unter Nutzung von [55] [53]

In den folgenden beiden Teilkapiteln werden ausgewählte, wichtige klassische und stichprobenbasierte Bahnplanungsverfahren im Allgemeinen und anschließend für den speziellen Fall des im industriellen Umfeld sehr häufig vorkommenden Sechsachs-Knickarmroboters erläutert.

2.2.1 Klassische Bahnplanungsansätze

Bei der Landkartenmethode (engl. "roadmap method") werden Straßenbzw. Landkarten im freien Raum, wie Sichtbarkeitsgraphen oder Voronoi-Diagramme erstellt, die für unterschiedliche Suchanfragen (engl. "queries") verwendet werden. Ein Pfad wird unter Nutzung der bestehenden Karte und ihrer Anbindung zur jeweiligen Start- und Zielkonfiguration geplant. Die Straßenkarten stellen dabei Graphen dar, die aus Knoten und Kanten bestehen und mittels Standardalgorithmen nach den kürzesten Wegen durchsucht werden können. [55] [53]

Die Erstellung von **Sichtbarkeitsgraphen** (engl. "visibility graphs") erfolgt in zweidimensionalen Konfigurationsräumen mit polygonalen Konfigurationsraumhindernissen wie in Bild 6 links beispielhaft dargestellt. Die Sichtbarkeitsgraph-Methode nach [60] kann als eines der ersten Bahnplanungsverfahren betrachtet werden und zielt darauf ab, möglichst kurze Wege zu realisieren [53]. Die Knoten des Sichtbarkeitsgraphen bestehen aus der Startund Zielkonfiguration sowie allen Eckpunkten der Konfigurationsraumhindernisse. Seine Kanten sind Liniensegmente zwischen zwei Knoten, die in Sichtkontakt liegen. [55] [53] Die Berechnung aller sichtbaren Kanten eines jeden Knoten kann mit Hilfe des rotatorischen Plane-Sweep-Algorithmus durchgeführt werden, bei dem eine Halbgerade um einen Eckpunkt rotiert und auf Überschneidung mit allen Hinderniskanten geprüft wird [55].



Bild 6: Beispiele für einen Sichtbarkeitsgraphen (links) mit polygonalen und ein Voronoi-Diagramm (rechts) mit punktförmigen Konfigurationsraumhindernissen im zweidimensionalen Konfigurationsraum

Das generalisierte Voronoi-Diagramm (engl. "Generalized Voronoi Diagram", GVD), auch "maximum-clearance roadmap" genannt [59], entsteht durch ein sogenanntes Retraktionsverfahren (engl. "retraction method") und weist mindestens zu den zwei nächstgelegenen Hindernissen maximalen und somit gleichen Abstand auf. Es wird auch der Begriff des Voronoi-Diagramms verwendet, der ursprünglich jedoch für Punkthindernisse definiert wurde. [55] [53] Das Voronoi-Diagramm besteht aus Voronoi-Kanten, den Grenzen zwischen benachbarten Voronoi-Regionen, d. h. Bereichen, die einem Hindernis am nächsten liegen, und Voronoi-Knoten als Schnittpunkten von Voronoi-Kanten (siehe Bild 6 rechts). Bei beliebig geformten Konfigurationsraumhindernissen kann das Voronoi-Diagramm mit Hilfe des Brushfire-Algorithmus approximiert werden, indem der Konfigurationsraum mit einer Gitterstruktur versehen wird und Werte benachbarter Gitterelement ausgehend von Hindernissen iterativ erhöht werden. Die aufeinandertreffenden Wellen verschiedener Hindernisse ergeben den Bereich maximaler Abstände zu nächstgelegenen Hindernissen und damit das Voronoi-Diagramm. [55]

Ein weiteres Landkartenverfahren ist die **Freeway-Methode** nach [61], die dem Voronoi-Diagramm ähnelnde Straßenkarten ergibt. Für einen translatorisch und rotatorisch frei bewegbaren, polygonalen Roboter wird ein Netzwerk aus sogenannten Freeways zwischen polygonalen Hindernissen in einem zweidimensionalen Arbeitsraum erstellt. Freeways ergeben sich dabei als generalisierte Zylinder zwischen zwei Hinderniskanten und entsprechen Polygonen mit maximal acht Kanten. Das Verfahren ist in vielen Fällen laufzeiteffizient, aber nicht vollständig, d. h. eine existierende Lösung wird nicht immer gefunden. [53]

Die von Canny in [62] ursprünglich als "roadmap algorithm" veröffentlichte und in [63] zum opportunistischen Pfadplaner (engl. "Opportunistic Path Planner", OPP) verallgemeinerte Silhouetten-Methode ist im Gegensatz zu den drei vorgenannten Landkartenmethoden auf höherdimensionale Konfigurationsräume anwendbar. Bei der Silhouetten-Methode wird eine als Scheibe (engl. "slice") bezeichnete (n - 1)-dimensionale Hyperebene rekursiv entlang einer beliebig gewählten Richtung des n-dimensionalen Konfigurationsraums bewegt. Die Extrempunkte einer bezüglich dieser Scheibe definierten Projektionsfunktion bilden die Silhouetten-Linien. Sind diese tangential zu den sogenannten kritischen Scheiben, an denen sich die Anzahl der Silhouetten-Linien verändert, ergeben sich kritische Punkte. Hier wird der Algorithmus jeweils mit einer um eine Dimension reduzierten Scheibe rekursiv aufgerufen, bis keine kritischen Punkte mehr vorhanden sind oder eine eindimensionale Scheibe erreicht ist. Alle so gebildeten Silhouetten-Linien unter Einbindung der Start- und Zielkonfiguration ergeben eine auf einen kürzesten Weg zu durchsuchende Landkarte. Bild 7 zeigt die Anwendung der Silhouetten-Methode für einen beispielhaften zweidimensionalen Konfigurationsraum mit zwei Hindernissen. Hierbei entstehen die Silhouetten-Linien durch die Bewegung der zu q_2 parallelen, eindimensionalen Scheibe entlang der q_1 -Richtung als Extrema der Projektionsfunktion $\pi_2(q) = q_2$. [55] [53]

Weitere kombinatorische Bahnplanungsverfahren stellen die exakte und die approximative Zellzerlegung dar. Bei der **exakten Zellzerlegung** (engl. "exact cell decomposition") wird der freie Raum vollständig in nicht überlappende Zellen einfacher geometrischer Form aufgeteilt, sodass angrenzende Zellen leicht bestimmt werden können [53]. Bei der **approximativen Zellzerlegung** (engl. "approximate cell decomposition") (siehe z. B. Bild 38) hingegen wird der freie Raum meist nicht komplett abgedeckt, sondern durch Zellen vordefinierter einfacher Form konservativ approximiert [53]. Die



Bild 7: Anwendung der Silhouetten-Methode für einen beispielhaften zweidimensionalen Konfigurationsraum (links) mit entstehenden Silhouetten-Linien und gelöster Suchanfrage (rechts) in Anlehnung an [55]

Aufteilung des freien Raums erfolgt meist hierarchisch bis zu einem vordefinierten Zerlegungsgrad durch Iteration einer einfachen Berechnungsvorschrift [53]. Die Approximationsgüte des freien Raums und die damit einhergehende Möglichkeit, einen existierenden kollisionsfreien Pfad zu finden, hängen von der resultierenden minimalen Zellgröße ab [53]. Die Bahnplanungsalgorithmen der approximativen Zellzerlegung sind somit im Gegensatz zu den vollständigen Algorithmen der exakten Zellzerlegung lediglich auflösungsvollständig [53]. Nur wenn innerhalb der gewählten Auflösung eine Lösung existiert, wird diese gefunden [55]. Bei den Verfahren der Zellzerlegung wird nach der Aufteilung in freie Zellen ein sogenannter Zusammenhangs- bzw. Nachbarschaftsgraph (engl. "connectivitiy graph") erstellt, der aneinandergrenzende Zellen durch mit Kanten verbundene Knoten repräsentiert [53]. Ein in diesem Graphen gefundener kollisionsfreier Pfad benachbarter, freier Zellen zwischen der Start- und Zielkonfiguration wird auch als Kanal (engl. "channel") bezeichnet [53]. Die Zellzerlegung kann neben der Bahnplanung zur Abdeckung eines bestimmten Raums genutzt werden, indem alle Knoten des Nachbarschaftsgraphen systematisch durchlaufen und innerhalb eines jeden Knoten, d. h. jeder Zelle, einfache Standardbewegungen ausgeführt werden [55].

Eines der bekanntesten Verfahren der exakten Zellzerlegung ist die **Trapezzerlegung**, bei der ein zweidimensionaler Konfigurationsraum mit polygonalen Hindernissen in trapez- oder dreiecksförmige Zellen aufgeteilt wird. Ähnlich des Plane-Sweep-Algorithmus oder der Vorgehensweise bei der Silhouetten-Methode wird eine Gerade entlang einer hierzu senkrechten Achsrichtung des Konfigurationsraums bewegt. An Schnittpunkten mit Ecken von Konfigurationsraumhindernissen werden zur Bewegungsrichtung senkrechte Linien zur Begrenzung einzelner Zellen eingefügt. Eine beispielhafte Trapezzerlegung mit zugehörigem Nachbarschaftsgraph und gelöster Suchanfrage veranschaulicht Bild 8. Das Prinzip der trapezförmigen Zerlegung lässt sich auch auf den dreidimensionalen Fall verallgemeinern. [55] [53]

Die **Morse-Zerlegung** nach [64] stellt eine exakte Zellzerlegung für allgemeinere Konfigurationsräume mit nicht polygonalen Hindernissen dar. Angelehnt an die Silhouetten-Methode von Canny wird ein Slice-Sweep-Verfahren verwendet, um an kritischen Punkten sogenannte kritische Scheiben als Begrenzung einzelner Zellen zu generieren. In Bild 8 entsprechen diejenigen Eckpunkte der Hindernispolygone kritischen Punkten, an welchen die einzuzeichnenden Linien in beide vertikale Richtungen verlängert werden können. Für dieses Beispiel ergäbe sich eine sogenannte Bustrophedon-Zerlegung nach [65] als spezielle Morse-Zerlegung, wenn alle Linien an nichtkritischen Punkten entfernt würden. Das aus dem Griechisch-Lateinischen stammende Wort "Bustrophedon" steht für *"sich wendend wie der Ochse beim Pflügen*" [66] und bezieht sich auf einfache Vor- und Zurück-Bewegungen, die ein Roboter bei Abdeckungsaufgaben durchführt. Die durch eine Morse-Zerlegung reduzierte Zellzahl ergibt vor allem für diesen Anwendungsbereich relevant kürzere Pfade. [55]



Bild 8: Beispielhafte Trapezzerlegung mit polygonalen Hindernissen im zweidimensionalen Konfigurationsraum (links) und zughöriger Nachbarschaftsgraph mit gelöster Suchanfrage (rechts)

Bei der **Quadtree**- bzw. **Oktree-Methode** entstehen bei der hierarchischen approximativen Zellzerlegung quader- bzw. würfelförmige Zellen im zweibzw. dreidimensionalen Raum. Eine Zelle besitzt den Zustand "frei", falls sie im freien Raum liegt, "vollständig belegt", falls sie vollständig, oder "teilweise belegt", falls sie teilweise durch ein Konfigurationsraumhindernis bedeckt ist. Ausgehend von einer Startzelle mit dem Zustand "teilweise belegt" wird der Raum iterativ in vier bzw. acht gleichförmige Zellen aufgeteilt, falls er nicht vollständig frei oder vollständig durch ein Hindernis belegt ist. Der hierbei entstehende gerichtete Graph ist ein 2^m-Baum mit einem Verzweigungsfaktor,

d. h. einer Anzahl an Kinderknoten, von 2^m, wobei *m* die Dimension des Konfigurationsraums bezeichnet. Im Zweidimensionalen entsteht somit ein Quadtree als 2²-Baum mit vier Kinderknoten, im Dreidimensionalen ein Oktree mit einem Verzweigungsfaktor von acht. [53]

Die **Potentialfeldmethode** ist ein feedbackbasiertes Planungsverfahren, das online nur für eine lokale Umgebung oder offline im Voraus global realisiert werden kann. Bei diesem Ansatz wird jeder Konfiguration q ein künstliches Potential $U: \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}$ zugeordnet (mit m als Dimension des Konfigurationsraums), das aus einem von der Zielkonfiguration ausgehenden anziehenden $U_{an}(q)$ und von Hindernissen resultierenden abstoßenden Potential $U_{ab}(q)$ gebildet wird: [55]

$$U(q) = U_{an}(q) + U_{ab}(q)$$
(2.4)

Jedem Punkt des Potentialfelds wird ein Vektor, der Gradient der Potentialfunktion ∇U , zugewiesen. Das so entstehende Vektorfeld gibt an jeder Konfiguration des Roboters über den Gradienten die Bewegungsrichtung an, die das Potential lokal maximiert. Der Gradient der Potentialfunktion ∇U ergibt sich als Produkt des Nabla-Operators $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial q_1}, \frac{\partial}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial q_m}\right)$ und des Skalarfelds U: [55]

$$\nabla U(q) = \left[\frac{\partial U}{\partial q_1}(q), \dots, \frac{\partial U}{\partial q_m}(q)\right]^T = \begin{bmatrix}\frac{\partial U}{\partial q_1}(q)\\\vdots\\\frac{\partial U}{\partial q_m}(q)\end{bmatrix}$$
(2.5)

Bewegt sich ein Punktroboter nun im Vektorfeld entlang des negativen Gradienten - ∇U , erreicht er unter Vermeidung von Hindernisse repräsentierenden Potentialbergen einen Ort minimalen Potentials. Problematisch sind lokale Minima, die nicht der Zielkonfiguration entsprechen, da der Roboter auch nach kleinen Ausweichbewegungen durch Gradientenabstieg wieder an diese zurückgeführt wird. Endet ein Potentialfeldplaner in einem solchen Minimum, ist er nicht vollständig, da er keine Lösung findet. Das anziehende Potential $U_{an}(q)$ soll mit wachsender Entfernung von der Zielkonfiguration, die das Potential null aufweist, zunehmen, was mit einer quadratischen Funktion erreicht werden kann. Mit ζ als frei wählbarem Skalierungsparameter und $d(q, q_{ziel})$ als Abstand zur Zielkonfiguration ergeben sich $U_{an}(q)$ und $\nabla U_{an}(q)$ zu [55]

$$U_{an}(q) = \frac{1}{2} \zeta d^2(q, q_{Ziel})$$
(2.6)

$$\nabla U_{an}(q) = \nabla \left(\frac{1}{2}\zeta d^2(q, q_{Ziel})\right) = \frac{1}{2}\zeta \nabla d^2(q, q_{Ziel}) = \zeta(q - q_{Ziel}).$$
(2.7)

Das abstoßende Potential $U_{ab}(q)$ soll bei der Annäherung an Hindernisse bei Unterschreitung einer Abstandsschwelle ansteigen. Mit η als Skalierungsparameter, Q^* der kritischen Distanz und D(q) als Hindernisentfernung lassen sich $U_{ab}(q)$ und $\nabla U_{ab}(q)$ darstellen als [55]

$$\begin{aligned} U_{ab}(q) &= \begin{cases} \frac{1}{2}\eta \left(\frac{1}{D(q)} - \frac{1}{Q^*}\right)^2, & falls \ D(q) \le Q^* \\ 0, & falls \ D(q) > Q^* \end{cases} \end{aligned} \tag{2.8} \\ \nabla U_{ab}(q) &= \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{Q^*} - \frac{1}{D(q)}\right) \frac{1}{D^2(q)} \nabla D(q), & falls \ D(q) \le Q^* \\ 0, & falls \ D(q) > Q^*. \end{cases} \end{aligned}$$

Der bereits bei der Bildung von Voronoi-Diagrammen erwähnte Brushfire-Algorithmus kann bei der Potentialfeldmethode zur Bestimmung von Hindernisabständen und damit des abstoßenden Potentials eingesetzt werden [55]. Der Wellenausbreitungs-Algorithmus (engl. "wave-front planner") verwendet ebenfalls eine Gitterstruktur, um ausgehend von der Zielkonfiguration angrenzenden Nachbarpixeln iterativ einen um jeweils eins erhöhten Wert zuzuweisen [55]. Wird anschließend beginnend bei der Startkonfiguration ein gitterbasierter Pfad gemäß des Gradientenabstiegs gesucht, können lokale Minima vermieden werden [55]. Potentialfeldmethoden auf Basis der Wellenausbreitung sind im Gegensatz zu den im Allgemeinen nicht vollständigen Ansätzen dieses Verfahrens auflösungsvollständig [53] [55]. Wird ein Potentialfeld eingesetzt, das neben instabilen Sattelpunkten nur die Zielkonfiguration als Minimum aufweist, wird auch von einer Navigationsfunktion (engl. "navigation function") gesprochen [53]. Einen Ansatz, um aus lokalen Minima zu entkommen, beinhaltet der Randomized Path Planner (RPP) [67] [68], indem er das Vorgehen des Gradientenabstiegs mit zufälligen Ausweichbewegungen des Roboters kombiniert. Er zählt zu den ersten stichprobenbasierten Bahnplanern [55].

Daneben existieren weitere, speziell für den zweidimensionalen Fall mobiler Roboter geeignete Verfahren, wie das auf einem kartesischen Histogrammgitter beruhende Vector Field Histogramm (VFH) [69] mit seinen Weiterentwicklungen VHF+ [70] und VHF* [71] oder der Trajektorienplaner Dynamic Window Approach (DWA) [72].

2.2.2 Stichprobenbasierte Bahnplanungsansätze

Stichprobenbasierte Bahnplanungsverfahren unterteilen sich in **Multi-Query-Planer**, bei denen eine im Voraus erstellte Landkarte für neue Anfragen der Planungsumgebung wiederverwendet wird, und in **Single-Query-Planer**, die für jede Anfrage einen neuen Baum im Konfigurationsraum erstellen. Sie unterscheiden sich zudem hinsichtlich der Stichprobenauswahl und der Verbindungsstrategie ausgewählter Konfigurationen zu gültigen Pfaden. Die Verfahren sind probabilistisch vollständig, falls die betrachteten Konfigurationen zufallsbasiert generiert werden. Die Wahrscheinlichkeit einen gültigen, existierenden Pfad zu finden, nimmt mit zunehmender Anzahl an Stichproben zu und geht im Unendlichen gegen eins. Erfolgt die Generierung der Stichproben hingegen deterministisch, z. B. auf Basis einer Gitterstruktur, ist der Planer auflösungsvollständig. [55]

Ein Multi-Query-Verfahren stellt der **Probabilistic Roadmaps (PRM)**-Planer [73] dar, der in Bild 9 links beispielhaft skizziert ist. Er besteht aus einer Lernphase, in der eine probabilistische Landkarte erstellt wird und einer Query-Phase zur Lösung der jeweiligen Anfrage. In der Lernphase werden zunächst solange zufällig Konfigurationen ausgewählt, bis eine definierte Anzahl kollisionsfreier Konfigurationen gefunden ist. Anschließend werden alle Konfigurationen zu einer vorgegebenen Zahl nächster, innerhalb einer maximalen Distanz liegender, Konfigurationen mittels eines lokalen Planers verbunden. Die Landkarte wird wie bei den vorgestellten klassischen Landkartenverfahren in Form eines Graphen gespeichert, dessen Knoten die Konfigurationen und dessen Kanten die durch den lokalen Planer generierten Pfade darstellen. In der Query-Phase werden die Start- und die Zielkonfiguration an die Landkarte angebunden und auf einen kürzesten Pfad durchsucht. [55]

Bekannte Vertreter der Single-Query-Verfahren sind u. a. Expansive-Spaces Trees (EST), Rapidly-Exploring Random Trees (RRT) und der Single-query, Bi-directional, Lazy collision-checking (SBL)-Planer. EST und RRT wurden für kinodynamische Bahnplanungsprobleme entwickelt. Hierbei werden meist zwei Bäume erstellt, die ihre Wurzeln in der Start- bzw. der Zielkonfiguration haben, in die Richtung des jeweils anderen wachsen und über einen lokalen Planer zusammengeführt werden. Es ist auch möglich, nur einen Baum ausgehend von der Startkonfiguration in Richtung der Zielkonfiguration oder umgekehrt erstellen zu lassen. Neue Konfigurationen werden in den Randbereichen der bestehenden Bäume generiert und diesen nur hinzugefügt, wenn sie über einen lokalen Planer mit einer bestehenden Konfiguration verbunden werden können. Im Gegensatz zur PRM-Methode wird nur der für eine



Bild 9: Beispiele für eine PRM-Landkarte (links) und einen RRT-Baum (rechts) im zweidimensionalen Konfigurationsraum

Planungsaufgabe notwendige Bereich des freien Raums abgedeckt. Konfigurationen, die in den Baum aufgenommen werden, hängen von der Start-, der Ziel- und vorher generierten Konfigurationen ab. [55]

Beim **Expansive-Spaces Trees (EST)**-Verfahren [74] werden Konfigurationen mit wenigen Nachbarn im Bereich des Baumwachstums bevorzugt. In der Umgebung einer solchen Konfiguration wird mit Hilfe einer Gleichverteilung eine zufällige Stichprobenkonfiguration generiert und getestet, ob diese über einen lokalen Planer mit der Ausgangskonfiguration verbunden werden kann. Bei Erfolg wird die neue Konfiguration und deren Verbindungskante dem bestehenden Baum hinzugefügt. Bei bidirektionalen EST versucht der lokale Planer, eine neue Konfiguration des einen Baums mit einer definierten Anzahl nächster Konfigurationen des zweiten Baums zu verbinden. [55]

Bei der Methode der **Rapidly-Exploring Random Trees (RRT)** [75] [76] wird anders als beim EST-Verfahren die Anzahl benachbarter Konfigurationen nicht bestimmt. Mittels der Gleichverteilung wird eine zufällige Konfiguration des Konfigurationsraums q_{rand} ausgewählt. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit kann hierbei auch die Zielkonfiguration herangezogen werden, um das Wachstum in diese Richtung zu lenken. Anschließend wird die im bestehenden Baum nächste Konfiguration q_{near} ermittelt und überprüft, ob eine neue Konfiguration q_{new} auf der Verbindungslinie zwischen q_{near} und q_{rand} mit vorgegebenem Abstand zu q_{near} erstellt werden kann. Falls die neue Konfiguration q_{new} kollisionsfrei ist, wird sie mit der zugehörigen Kante dem Baum hinzugefügt, wie in Bild 9 rechts skizziert. Bei bidirektionalen RRT wird angestrebt, eine neue Konfiguration des einen Baums mit der am nächsten liegenden Konfiguration des zweiten Baums zu verbinden. [55]

Der **Single-query, Bi-directional, Lazy collision-checking (SBL)**-Planer [77] ist ein bidirektionales EST-Verfahren mit einer sogenannten Lazy-Evaluation. Die Kollisionsprüfung erfolgt erst, nachdem ein Pfad von der Start- zur Zielkonfiguration gefunden wurde. Der SBL-Planer erstellt zwei Bäume, die in q_{Start} bzw. in q_{Ziel} ihre Wurzeln haben. Da deren Kanten und Knoten erst auf Kollision geprüft werden, falls sie Teil eines existierenden Pfades sind, kann erheblich Zeit eingespart werden. Im Gegensatz zum ursprünglichen EST-Verfahren wird zur Auswahl einer zu expandierenden Konfiguration ein Gitterverfahren eingesetzt. Dabei wird ein grobes Gitter über den Konfigurationsraum gelegt und zufällig eine Konfiguration aus einer nicht leeren Zelle ausgewählt, wobei Zellen mit weniger Konfigurationen im bestehenden Baum bevorzugt werden. [55]

2.2.3 Bahnplanungsverfahren für Sechsachs-Knickarmroboter

Nachdem in den vorangegangenen beiden Kapiteln allgemeine Verfahren für Bahnplanungsprobleme erläutert wurden, wird nun auf deren Anwendung für den in industriellen Anwendungen sehr häufig eingesetzten vertikalen Knickarmroboter mit sechs Rotationsachsen eingegangen. Viele kombinatorische Verfahren eignen sich auf Grund der expliziten Darstellung der Konfigurationsraumhindernisse und des freien Raums nur für niedrigdimensionale Problemstellungen. Realisierte Ansätze für Sechsachsroboter finden sich für die approximative Zellzerlegung sowohl im Arbeitsraum, beispielsweise bei [78], als auch im Konfigurationsraum, wie bei [79] oder [80]. In [78] wird ein Bahnplaner für Palettieraufgaben unter Nutzung zweier zylindrischer Zellzerlegungen für die Start- und Zielpose auf Basis des zu handhabenden Werkstücks beschrieben. Das Verfahren nach [79] erstellt sechsdimensionale Hyperwürfel im Konfigurationsraum, deren Berechnungen zur Realisierung einer Online-Planung auf mehreren Prozessoren parallelisiert werden. In [80] wird die approximative Zellzerlegung im Konfigurationsraum mit einem probabilistischen Ansatz verknüpft, um möglicherweise freie Bereiche gezielt untersuchen zu können.

Zur Online-Planung eignet sich nach [54] vor allem die Potentialfeldmethode. Hierbei werden mehrere Kontrollpunkte auf dem Roboter verteilt, wobei jedes Armelement mit mindestens einem Kontrollpunkt zu versehen ist. Während das abstoßende Potential zu Hindernissen auf alle Punkte wirkt, wird durch das anziehende Potential lediglich der Endeffektor-Punkt beeinflusst. Das Potential wird für alle Kontrollpunkte im Arbeitsraum berechnet und deren Gradienten mittels ihrer Jakobimatrizen in den Konfigurationsraum transferiert. Auf Grund der unterschiedlichen Kontrollpunkte können jedoch besonders viele lokale Minima auftreten. [54] [55] Kombinationen der Potentialfeldmethode mit weiteren Ansätzen werden beispielsweise in [81] und [82] vorgestellt. In [81] werden zusätzliche Führungsebenen eingeführt und der Ansatz nach [82] teilt das sechsdimensionale Problem auf zwei dreidimensionale Planer auf. Ein Verfahren, das lediglich ein Potential für den Endeffektor ermittelt und Verklemmungen, welche dadurch häufiger auftreten können, durch Korrekturvektoren für jedes Armelement löst, ist in [83] dargestellt und in [84] um ein Konzept zur Vermeidung von singulären Positionen im Arbeitsraum erweitert.

Ein Bahnplanungsansatz für mehrachsige Roboter stellt nach [54] die Reduktion der Konfigurationsraumdimension dar. Falls die letzten drei Achsen der kinematischen Kette im Vergleich zu den ersten drei Achsen einen relativen kleinen Teil des Arbeitsraums einnehmen, kann dieser bei der Berechnung konservativ approximiert und die Planung auf die ersten Achsen beschränkt werden [54]. Eine beispielhafte Implementierung dieses Ansatzes ist in [85] beschrieben.

Weitere mögliche Bahnplaner für Sechsachsroboter stellen die im vorherigen Kapitel erläuterten, speziell für höherdimensionale Probleme entworfenen stichprobenbasierten Verfahren sowie unterschiedlichste darauf aufbauende Abwandlungen dar. Als nachteilig können sich die durch zufällig ausgewählte Konfigurationen ergebenden Bahnen sowie das problematische Auffinden von Wegen bei engen Passagen erweisen.

2.3 Open Source-Bibliotheken und -Frameworks zur Realisierung von Roboter-Assistenzsystemen

Der Begriff Open Source bzw. Open Source-Software bezeichnet Software, deren Quellcode frei zugänglich ist, verändert, verbreitet und veröffentlicht werden darf, ohne dass hierfür Lizenzgebühren anfallen [86]. Sie kann in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen eingesetzt werden und unterliegt in Abhängigkeit von der mit ihr verbundenen Lizenz gewissen Bedingungen [87]. Im wissenschaftlichen Umfeld wird im Rahmen der Softwareerstellung häufig auf Open Source-Lösungen zurückgegriffen, um sich auf die eigentlichen Forschungsfragen fokussieren zu können ohne grundlegende Funktionalitäten vollständig neu zu entwickeln. In Forschungsprojekten entstandene und veröffentlichte Software der jüngeren Vergangenheit stellt in vielen Bereichen den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik der zugrunde liegenden Algorithmen dar. Aus diesem Grund werden im Folgenden weit verbreitete, freie Bibliotheken und Frameworks, die zur Realisierung von Roboter-Assistenzsystemen, insbesondere zur Umgebungswahrnehmung und autonomen, kollisionsfreien Roboterpfadgenerierung, eingesetzt werden können, vorgestellt. Tabelle 3 fasst die wichtigsten Daten zusammen.

Tabelle 3: Auswahl wichtiger Open Source-Bibliotheken und -Frameworks zur Realisierung von Roboter-Assistenzsystemen (mit k. A. für keine Angabe)

Kate- gorie	Bezeichnung	Open Source- Lizenz(en)	Anwendungsbereich/ besondere Merkmale	
	Robot Operating System (ROS)	BSD	Umfassende Paketsammlung	
ırks	Open Robot Control Software (OROCOS)	LGPL/ GPL mit Aus- nahme	Echtzeitanwendungen, Bayes- Filter, kinematische Ketten	
ewc	Robot Construction Kit (Rock)	k. A.	Softwareentwicklung	
am	Orca	LGP/ GPL	Mobile Robotik	
botik-Fr	Open Robotics Automation Vir- tual Environment (OpenRAVE)	LGPL/ Apache Ver- sion 2.0	Plugin basierte Architektur, Bahnplanungsalgorithmen	
Rol	Player/Stage/Gazebo	GPL/ LGPL	2D/3D-Simulator	
neine	Yet Another Robot Platform (YARP)	LGPL/ GPL	Humanoide Robotik	
Allgen	Universal Robotic Body Interface (URBI)	Kommerziell/ k. A.	Komponenten basierte Architektur, Roboter-Interface	
	Mission Oriented Operating Suite (MOOS)	k. A.	Autonome Unterwasser- und Landrobotik	
	Robotics Library (RL)	BSD	Versch. Robotikalgorithmen	
Bahn- planung	Open Motion Planning Library (OMPL)	BSD	Vielzahl stichprobenbasierter Bahnplaner	
	Search-Based Planning Library (SBPL)	BSD	Bahnplanungsalgorithmen auf Basis von Graphsuchverfahren	
	Software Library for Interference Detection (SOLID)	LGPL	Konvexe Objekte inkl. Kugeln, AABB-BVHs, GJK-Algorithmus	
gu	Interactive and exact Collision Detection (I-COLLIDE)	k. A.	Konv. Polyeder, AABB-Sweep- and-Prune, Lin-Canny-Alg.	
kennu	Speedy Walking via Improved Feature Testing (SWIFT)	k. A.	Funktionsumfang von I-COLLIDE, höhere Robustheit	
tandser	Speedy Walking via Improved Feature Testing for non-convex objects (SWIFT++)	k. A.	Basierend auf SWIFT, konvexe und konkave Objekte	
id Abs	Robust and Accurate Polygon Interference Detection (RAPID)	k. A.	Generelle Polygonmodelle, OBB-BVHs, SAT	
un -su	Accelerated Collision Detection for VRML (V-COLLIDE)	k. A.	AABB-Sweep-and-Prune von I-COLLIDE, SAT von RAPID	
Ilisio	Proximity Query Package (PQP)	k. A.	Einschließlich Abstandsberech- nung, SSR-BVHs	
Ko	Flexible Collision Library (FCL)	BSD	Erweiterbar, 3D-Punktewolken	
	Voronoi-clip (V-Clip)	k. A.	Konvexe Polyeder, optimierter Lin-Canny-Algorithmus	
	Bullet Physics	ZLib	Physik-Engine	
lver- oei- ng	Open Source Computer Vision (OpenCV)	BSD	Umfangreiche Algorithmen- sammlung	
Bild arl	Point Cloud Library (PCL)	BSD	Speziell für 3D-Punktewolken	

Zur Einordnung der mit der jeweiligen Software verbundenen Bedingungen werden vorab die in diesem Zusammenhang relevantesten Open Source-Lizenzen kurz erläutert. Die BSD-Lizenz (Berkeley Software Distribution) der Universität von Berkeley schreibt bei einer Weiterverwendung des Programmcodes eine Nennung aller Entwickler vor und schließt Haftungsansprüche aus. Da hiervon abgeleitete Software nicht den ursprünglichen Lizenzbedingungen entsprechen muss, kann unter der BSD-Lizenz veröffentlichte Software in kommerziellen Programmen verwendet werden. Die GPL (GNU General Public License) enthält ebenfalls einen Haftungsausschluss, ist aber zur kommerziellen Weiterverwendung nicht einsetzbar, da sie zusätzlich vorgibt, dass Software, die GPL-Code enthält, wiederum unter der GPL-Lizenz zu veröffentlichen und nicht weiter einzuschränken ist. Sie implementiert eine strenge Interpretation des sogenannten Copylefts. Die im Wesentlichen der GPL entsprechende LGPL (GNU Lesser General Public License) sieht hingegen ein beschränktes Copyleft vor. Kommerzielle Software kann mit unter dieser Lizenz stehenden Bibliotheken verknüpft werden, ohne selbst der GPL zu unterliegen. [86] [87] Bei der ZLib-Lizenz muss veränderter Quelltext gekennzeichnet werden und die Herkunft erkennbar sein. Sie schreibt jedoch kein Copyleft vor, sodass ein kommerzieller Einsatz möglich ist. [88]

2.3.1 Allgemeine Robotik-Frameworks

Das **Robot Operating System (ROS)** ist mittlerweile eines der weltweit am häufigsten genutzten Open Source-Frameworks für Robotikanwendungen in öffentlichen Forschungseinrichtungen und wird vermehrt auch im kommerziellen Bereich der Industrie- und Servicerobotik eingesetzt [89]. Es entstand ab 2007 im Rahmen des STAIR (Stanford Artificial Intelligence Robot)-Projektes der Stanford Universität und des Personal Robots-Programms der Firma Willow Garage [90] und wird seit 2013 von der gemeinnützigen US-Organisation OSRF (Open Source Robotics Foundation) gepflegt [91] [92]. Die Kernkomponenten von ROS sind unter der BSD-Lizenz veröffentlicht, alle anderen ROS-Pakete können eine eigene hiervon abweichende Lizenz besitzen [89].

ROS bietet als Middleware eine Kommunikationsinfrastruktur für einzelne Software-Module in verteilten Systemen. Daten zwischen Programmknoten, die als Client und/ oder Server agieren, werden auf Basis einer Peer-to-Peer-Architektur und XML-RPC (Extensible Markup Language Remote Procedure Call) ausgetauscht [90]. Die syntaktische Beschreibung von Nachrichten erfolgt mittels einer sprachneutralen Interface Definition Language (IDL) mit nativer Implementierung in der jeweiligen Hochsprache, sodass einzelne Knoten in unterschiedlichen Programmiersprachen, wie C++ oder Python, realisiert werden können [90]. Neben einer Reihe nützlicher Tools, wie der

3D-Visualisierung oder der Aufzeichnung von Sensordaten, existiert eine Vielzahl an Paketen für unterschiedlichste Teilaufgaben wie der Koordinatentransformation oder Roboternavigation sowie von Gerätetreibern. Zur Wiederverwendung anderer Open Source-Bibliotheken sind zudem Schnittstellen in eigenen ROS-Paketen realisiert, wie beispielsweise für den 3D-Simulator Gazebo oder die Bildverarbeitungsbibliothek OpenCV.

OROCOS (Open Robot Control Software) ist ein modulares, plattformübergreifendes Open Source-Robotik-Framework, dessen Entwicklung im Jahr 2001 an der belgischen Universität KU Leuven als EU-Forschungsprojekt begann [93] [94]. Neben dem Real-Time Toolkit (RTT) zur Entwicklung echtzeitfähiger Anwendungen, beispielsweise zur Bewegungssteuerung, enthält OROCOS Bibliotheken wie die Bayesian Filtering Library (BFL) zur Realisierung von Bayes-Filtern oder die Kinematics and Dynamics Library (KDL) zur Modellierung und Berechnung kinematischer Ketten, die auch in anderen Software-Projekten eingesetzt werden können [95]. So verwendet das ROS-Handhabungspaket Movelt! standardmäßig die KDL zur Lösung der inversen Kinematik [96]. Teile von OROCOS sind unter der LGPL bzw. der GPL mit einer Laufzeitbibliotheksausnahme lizenziert [97].

Ein weiteres Robotik-Framework ist das auf der OROCOS Toolchain basierende **Rock (Robot Construction Kit)** vom Robotics Innovation Center (RIC) des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI) GmbH [98]. Es verfügt über allgemeine Werkzeuge zur Softwareentwicklung sowie eine Reihe von Robotik-Paketen, beispielsweise zur Bildverarbeitung oder Navigation [99]. Mit der ROS-Rock-Bridge wird die Möglichkeit angeboten, Daten zwischen Rock-Ports und ROS-Topics auszutauschen [100].

Die Entwicklung des Robotik-Frameworks **Orca** begann 2001 im Rahmen des EU-Forschungsprojektes OROCOS unter dem Namen Orocos@KTH an der schwedischen Königlich Technischen Hochschule (KTH) und wird gegenwärtig hauptsächlich von australischen Universitäten in Sydney genutzt [101] [102]. Orca verfügt über Treiber und Algorithmen aus dem Bereich mobiler Robotik und kann als Middleware für Komponenten basierte Systeme eingesetzt werden [102] [103]. Die Kommunikation und Schnittstellenbeschreibung einzelner Komponenten nutzen die kommerziell sowie unter der GPL erhältliche Bibliothek Ice (Internet Communications Engine), die unterschiedliche Plattformen und Programmiersprachen unterstützt [102] [104]. Die meisten Bibliotheken und Komponenten von Orca sind unter der LGPL sowie der übrige Quellcode unter der GPL verfügbar [105].

Das plattformübergreifende Software-Framework **OpenRAVE (Open Robotics Automation Virtual Environment)** entstand ab 2006 am Robotics Institute der Carnegie Mellon University als Entwicklungs- und Testumgebung für Bahnplanungsalgorithmen und umfasste 2010 eine Gemeinde von mehr als 100 Nutzern [106] [107]. Die Kern-API (Application Programming Interface) von OpenRave ist unter der LGPL, Beispiele und Skripte unter der weniger restriktiven Apache Lizenz der Version 2.0 veröffentlicht [107]. OpenRave nutzt eine Plugin basierte Architektur, um bestehende Funktionalitäten zu erweitern, und verfügt über eine Reihe implementierter Algorithmen, beispielsweise zur Bahnplanung und Kollisionsprüfung [107]. Ein wichtiges Plugin ist IKfast, das für beliebig definierbare kinematische Ketten mit translatorischen und rotatorischen Gelenken analytische inverse Löser realisiert. Die hierbei generierten C++-Dateien können auch unabhängig von OpenRAVE, z. B. in Movelt! [108], eingesetzt werden [107].

Das plattform- und sprachenübergreifende Software-Projekt **Player/Stage/ Gazebo** begann an der University of Southern California im Jahr 1999 und registrierte 2005 mehr als 200 Nutzer auf seiner Mailing-Liste [109] [110]. Es besteht aus Player, einem Interface zur Roboter- und Gerätesteuerung, dem 2D-Simulator Stage und dem 3D-Simulator Gazebo [111]. Nach einer Umstrukturierung können sowohl die ursprüngliche TCP/IP (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol)-Variante als auch andere Transportprotokolle zur Kommunikation zwischen Player-Servern und -Clients verwendet werden [110]. Neben Treibern für mobile Roboter und Sensoren existieren Implementierungen gebräuchlicher Robotik-Algorithmen beispielsweise aus dem Bereich der Bahnplanung [112]. Der Source-Code von Player ist unter der GPL und bis auf die Player-Treiber-Bibliothek auch unter der LGPL veröffentlicht [113].

YARP (Yet Another Robot Platform) ist ein seit Anfang der 2000er Jahre bestehendes, plattformunabhängiges Software-Framework mit Fokus auf humanoide Robotik, das u. a. von Forschern des Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) weiterentwickelt und für die Roboterplattform iCub im Rahmen des RobotCub-Projekts eingesetzt wird [114] [115]. Es bietet als Middleware eine Peer-to-Peer-Kommunikation einzelner Programmmodule unter Nutzung verschiedener Protokolle in Form eines Observer-Design-Musters an [115]. Hierbei können Daten zwischen einzelnen Kommunikationseinheiten, sogenannten YARP-Ports, über ihren eindeutigen, beim YARP-Namensserver registrierten Namen prozess- und rechnerübergreifend ausgetauscht werden [115]. Plugins ermöglichen zudem die Kommunikation mit Namensservern anderer Middlewares [114]. Dies stellt eine Möglichkeit dar, um beispielsweise Daten zwischen YARP und ROS auszutauschen [114]. Des Weiteren sind Bibliotheken verfügbar, die Interfaces für Gerätetreiber realisieren [115]. YARP und ist unter der LGPL bzw. spezielle, optionale Bibliotheken unter der GPL veröffentlicht [116].

URBI (Universal Robotic Body Interface) ist eine ursprünglich am Cognitive Robotics Lab der französischen Universität ENSTA (École Nationale Supérieure de Techniques Avancées) entwickelte Robotik-Softwareplattform der französischen Firma Gostai, die seit 2012 zu Aldebaran Robotics gehört [117] [118]. Sie dient zur Ansteuerung und als Interface von Robotern und basiert auf einer verteilten, Komponenten basierten Client-Server-Architektur sowie der Skriptsprache UrbiScript zur Realisierung paralleler und ereignisgesteuerter Anwendungen [117]. Eine ROS-Unterstützung wird durch die Integration von ROS-Knoten ermöglicht [119]. Neben einer kommerziellen Variante ist URBI unter einer Open Source-Lizenz verfügbar [119].

MOOS (Mission Oriented Operating Suite) ist ein plattformübergreifendes Software-Framework für autonome Unterwasser- und Landroboter, das 2001 am Department of Ocean Engineering des MIT (Massachusetts Institute of Technology) entstand und mittlerweile von der Mobile Robotics Group (MRG) der University of Oxford gepflegt wird [120] [121] [122]. Die Kommunikationsarchitektur der MOOS-Middleware ist als Netzwerk basierte Sterntopologie mit einem zentralen Server realisiert. MOOS verfügt zudem über Werkzeuge und Bibliotheken beispielsweise zur Navigation oder Sensor- und Fahrzeugsteuerung [120].

Die C++-Bibliothek **Robotics Library (RL)** der TU München bietet Funktionalitäten im Bereich der Roboterkinematik, Bahnplanung oder Bewegungssteuerung. Sie ist unter der BSD-Lizenz frei verfügbar und wurde nach Auskunft der Autoren bereits in mehreren Forschungsprojekten eingesetzt. [123] [124]

Neben den dargestellten Software-Frameworks existiert eine Reihe weiterer Open Source-Lösungen zur Realisierung von Robotikanwendungen mit unterschiedlichem Funktionsumfang, der von der Bereitstellung einer Kommunikationsinfrastruktur über implementierte Gerätetreiber bis hin zu Algorithmen-Sammlungen reicht.

2.3.2 Bibliotheken zur Bahnplanung

Das bereits erwähnte ROS-Paket **MoveIt!** enthält eine Vielzahl nützlicher Komponenten zur Realisierung roboterbasierter Handhabungsaufgaben. Hierzu zählen Schnittstellen zu den unabhängigen, im Folgenden dargestellten Bahnplanungsbibliotheken OMPL (Open Motion Planning Library) und SBPL (Search-Based Planning Library). Als weitere Alternative steht CHOMP (Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning) [125] [126] zur Verfügung, der als eigenständiger Planer mittels Optimierung durch Gradientenabstieg möglichst glatte und von Hindernissen weit entfernte Bahnen berechnen sowie durch stichprobenbasierte Verfahren generierte Pfade glätten kann. Nach geeigneten Anpassungsmaßnahmen ist auch der Einsatz des auf Optimierungsverfahren basierenden und für den Movelt!-Vorgänger bereitgestellten Bahnplaners STOMP (Stochastic Trajectory Optimization for Motion Planning) [127] denkbar. Zur Umgebungswahrnehmung und -repräsentation in Form einer Oktree basierten, dreidimensionalen Belegungskarte wird in Movelt! auf unterschiedliche 3D-Sensoren und die eigenständige Octomap-Bibliothek [128] zurückgegriffen. Die im weiteren Verlauf erläuterte Flexible Collision Library (FCL) kann direkt auf Hindernisdaten der Octomap zugreifen und dient als Standard-Kollisionsbibliothek. [129] [130] Der Source-Code von Movelt! ist unter der BSD-Lizenz veröffentlicht [131].

Die OMPL (Open Motion Planning Library) ist eine Open Source-Bibliothek der amerikanischen Rice University, die gegenwärtig über mehr als 30 stichprobenbasierte Bahnplanungsalgorithmen verfügt [132]. Hierzu zählen die in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Verfahren PRM, RRT, EST und SBL einschließlich darauf basierender Abwandlungen [132]. In der unter der BSD-Lizenz veröffentlichten OMPL sind bekannte Konzepte zur Realisierung stichprobenbasierter Bahnplaner, wie die Definition roboterspezifischer Konfigurationsräume oder die Generierung von Stichproben, in Form abstrakter C++-Klassen implementiert. Konkrete Robotermodelle, Umgebungsdarstellungen oder Kollisionsprüfungen sind auf Grund dieses generischen Ansatzes nicht enthalten und sollen dem Anwender maximale Freiheit ermöglichen. Durch das verfügbare ROS-Interface können jedoch alle benötigten Funktionalitäten beispielsweise über Movelt! bereitgestellt werden. Neue Bahnplanungsansätze können auf Basis der vorhandenen Komponenten umgesetzt und mittels eines Benchmarking-Tools mit bekannten Verfahren verglichen werden. [133]

Die Search-Based Planning Library (SBPL) ist eine an der Carnegie Mellon University (CMU) und der University of Pennsylvania entwickelte, unter der BSD-Lizenz veröffentlichte Bahnplanungsbibliothek auf Basis heuristischer Graphsuchverfahren [134]. Grundlegende Idee aller zur Verfügung gestellter Planer ist die Überführung eines Teils des Roboterkonfigurationsraums auf eine Graphendarstellung. Hierbei werden durch Diskretisierung des Planungsraums eine definierte Anzahl an Roboterzuständen sowie grundlegende, realisierbare Bewegungsprimitive als Übergänge zwischen diesen definiert. Anschließend kann der so erstellte Graph mit verschiedenen, allgemeingültigen Suchverfahren und einer auf den konkreten Fall angepassten Bewertungsfunktion nach einem gültigen, möglichst optimalen Weg durchsucht werden. Die SBPL bietet Implementierungen für mehrere Planungsprobleme wie der Suche im dreidimensionalen Konfigurationsraum für mobile Roboter mit kartesischer Position und Orientierung in der Ebene oder auch für mehrdimensionale Roboterarme an. Letztere wird in [135] und [136] vorgestellt und an einem siebenachsigen, seriellen Roboter getestet. Das Verfahren basiert auf statischen Bewegungsprimitiven mit unterschiedlichen

Dimensionen zur Veränderung aller oder nur einer Teilmenge der Gelenkwinkel und der Online-Generierung neuer Bewegungselemente in der Nähe der Zielposition. Die zur Graphensuche mittels des ARA*-Algorithmus (Anytime Repairing A*) eingesetzte heuristische Bewertungsfunktion (siehe hierzu auch Kapitel 5.1.3) dient zur Bevorzugung kurzer, kollisionsfreier Wege des Endeffektors. [135] [136]

Weitere zur Realisierung von Bahnplanungsaufgaben entstandene, aber nach [132] aktuell nicht mehr gepflegte Open Source-Lösungen sind die **Motion Strategy Library (MSL)** [137] der University of Illinois, das **Motion Planning Kit (MPK)** [138] der Stanford University, die OOPSMP (Object-Oriented Programming System for Motion Planning) [139] der Rice University und die Visualisierungs- und Testumgebung **VIZMO++** [140] der Texas A&M University.

2.3.3 Bibliotheken zur Kollisionsprüfung

Kollisionsprüfungen werden in Bahnplanungsverfahren, vor allem in stichprobenbasierten Ansätzen bei der Generierung der einzelnen Konfigurationen und deren Verbindungen zu gültigen Pfaden, sehr häufig durchgeführt. Aus diesem Grund spielen effiziente Implementierungen für dreidimensionale, nicht deformierbare Kollisionsobjekte eine wichtige Rolle. Um Wege mit großem Abstand zu Hindernissen zu generieren oder distanzbasierte Reaktionsstrategien von Robotern in MRK-Systemen zu realisieren, werden zusätzlich Abstandsalgorithmen benötigt. Für diese Szenarien geeignete, häufig verwendete und leistungsfähige Open Source-Bibliotheken zur Kollisions- und Abstandsprüfung werden im Folgenden vorgestellt. Eine Einteilung kann dahingehend erfolgen, ob sie als Verfahren der sogenannten Broad-Phase mittels eines schnellen Vorabtests Überschneidungen gegebenenfalls ausschließen oder in einem aufwändigeren Test in der sogenannten Narrow-Phase detaillierte Entfernungsinformationen ermitteln [141].

SOLID (Software Library for Interference Detection) ist eine unter der LGPL veröffentlichte Kollisionsbibliothek der Technischen Universität Eindhoven für konvexe dreidimensionale Objekte, die sowohl durch konvexe Polytope als auch einfache geometrische Primitive, wie Quader oder Kugeln, repräsentiert sein können [142]. Die Kollisionsprüfungen basieren auf Hüll-körperhierarchien (Bounding Volume Hierarchies, BVHs) von an Achsen ausgerichteten Quadern, sogenannten Axis-Aligned Bounding Boxes (AABBs). Ergeben sich Kollisionen bei den die zu testenden Objektpaare umschließenden minimalen Hüllkörpern, werden die eigentlichen Objektgeometrien zur Überschneidungs- oder Abstandsberechnung herangezogen. Hierbei wird auf eine verbesserte Variante des Gilbert-Johnson-Keerthi (GJK)-Algorithmus [143] [144] [145] zurückgegriffen. [146] [147]

Von der University of North Carolina at Chapel Hill (UNC) wurden mehrere, frei verfügbare Kollisionsbibliotheken, darunter I-COLLIDE (Interactive and exact Collision Detection), entwickelt. I-COLLIDE realisiert Kollisionsund Abstandsberechnungen für konvexe Polyeder mittels des auf Voronoi-Regionen basierenden Lin-Canny-Closest-Features-Algorithmus. Vorab werden in einem eindimensionalen Sweep-and-Prune-Verfahren die durch AABBs approximierten Objektpaare auf die einzelnen Achsrichtungen projiziert und bei Nicht-Überlappung von der weiteren Berechnung ausgeschlossen. [148] [149] Eine Weiterentwicklung stellt die Bibliothek SWIFT (Speedy Walking via Improved Feature Testing) dar, die den Funktionsumfang von I-COLLIDE enthält, jedoch schneller und robuster ist [150]. Hierbei wird ein verbesserter Lin-Canny-Algorithmus auf Basis konvexer Hüll-Hierarchien unterschiedlicher Detaillierungsgrade eingesetzt [151]. Die Bibliothek SWIFT++ (Speedy Walking via Improved Feature Testing for nonconvex objects) greift wiederum auf SWIFT zurück, akzeptiert aber zusätzlich nicht konvexe Objekte, die zunächst in konvexe Elemente zerlegt und deren konvexe Hüllen hierarchisch als BVH gruppiert werden [150] [152].

RAPID (Robust and Accurate Polygon Interference Detection) ist eine weitere Kollisionsbibliothek der UNC. Sie liefert Überschneidungsinformationen für generelle Polygonmodelle, d. h. auch für unstrukturierte Polygonmengen, und basiert auf Bäumen aus orientierten Hüllquadern, sogenannten Oriented-Bounding Boxes (OBBs), welche vorab für ein Kollisionspaar berechnet werden. Die OBBs der beiden Hüllkörperhierarchien werden in allen Stufen mittels des Separating-Axis-Tests (SAT) auf Überschneidung geprüft. [153] Dessen Funktionsweise wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit im Rahmen der eingesetzten Kollisionsprüfungen (siehe Kapitel 5.1.2) erläutert. Ein Software-Paket, das I-COLLIDE und RAPID kombiniert, ist V-COLLIDE (Accelerated Collision Detection for VRML). Zur Ermittlung potentieller Kollisionsobjekte wird im ersten Schritt das AABB-Sweep-and-Prune-Verfahren von I-COLLIDE und anschließend die exakte Überschneidungsbestimmung von RAPID eingesetzt. In Erweiterung zu RAPID können nicht nur zwei, sondern eine Vielzahl möglicher Kollisionsobjekte betrachtet werden. Weder V-COLLIDE noch RAPID ermöglichen, anders als beispielsweise I-COLLIDE, die Ermittlung von minimalen Objektabständen. [154] Diese Option sowie eine approximative Distanzabschätzung stellt jedoch die Bibliothek PQP (Proximity Query Package) zur Verfügung. Hierbei wird auf BVHs mit sogenannten Sphere-swept Rectangles (SSRs) bzw. Rectangle Swept Spheres (RSSs), d. h. Hüllkörper, die durch Bewegung einer Kugel entlang eines beliebig orientierten Rechtecks entstehen, zurückgegriffen. [155]

Die bereits erwähnte Flexible Collision Library (FCL) ist eine unter der BSD-Lizenz veröffentlichte, eigenständige Bibliothek, die unter anderem zur

Mehrköperkollisions- und Abstandsberechnung für eine Reihe von Objektmodellen eingesetzt werden kann. Durch ein vorhandenes ROS-Interface ist sie auch direkt zusammen mit MoveIt! und der OMPL verwendbar. Die FCL besitzt einen erweiterbaren Aufbau, um neue Algorithmen und Datenmodelle integrieren zu können. Neben Dreiecksnetzen und einfachen geometrischen Körpern, wie Kugeln oder Zylindern, wird die Erstellung unterschiedlicher Hüllkörpertypen und -hierarchien unterstützt. Des Weiteren können auch probabilistische Kollisionstests mit verrauschten Punktewolken, wie sie beispielsweise 3D-Kameras bereitstellen, durchgeführt werden. Die Kollisionsund Abstandstests sind hinsichtlich ihrer Laufzeit mit anderen aktuellen Standard-Algorithmen vergleichbar. [156]

In der Bibliothek V-Clip (Voronoi-clip) des Mitsubishi Electric Research Laboratory (MERL) ist ein gleichnamiger Algorithmus zur Berechnung des Abstands konvexer Polyeder enthalten. Er stellt eine Verbesserung des Lin-Canny-Algorithmus zur Ermittlung nächster Merkmale (engl. "Features") eines Objektpaars, d. h. von Eckpunkten, Kanten oder Flächen, hinsichtlich Robustheit und im Überschneidungsfall dar. [157] V-Clip realisiert jedoch nur den eigentlichen Kollisions- und Abstandstest zwischen zwei Objekten und bietet anders als beispielsweise V-COLLIDE oder I-COLLIDE nicht die Möglichkeit einer vorgeschalteten Hierarchiebildung [158].

Neben speziellen Bibliotheken zur Kollisionsprüfung existieren auch frei verwendbare Physik-Engines, welche neben weiteren Funktionalitäten Implementierungen zur Kollisionserkennung beinhalten. Ein Beispiel stellt die fortwährend weiterentwickelte und unter der ZLib-Lizenz veröffentlichte Bibliothek **Bullet Physics** dar, die u. a. zur Entwicklung von Computerspielen und in Filmen eingesetzt wird [159] [160]. Im Rahmen der Überschneidungsund Abstandsbestimmung werden einfache geometrische Objektprimitive, konvexe Polyeder auf Basis einer eigenen Implementierung des GJK-Algorithmus sowie Dreiecksnetze unterstützt [160]. Zur Kollisionserkennung in der Broad-Phase sind Hüllkörperhierarchien und ein dreidimensionales Sweep-and-Prune-Verfahren auf Basis von AABBs verfügbar [160]. Um Funktionalitäten der Bullet-Bibliothek unter ROS zu nutzen, existiert ein Paket zur Konvertierung der entsprechenden Datentypen [161].

2.3.4 Bibliotheken zur Bildverarbeitung

OpenCV (Open Source Computer Vision) ist eine 1999 ursprünglich von Intel unter der BSD-Lizenz veröffentlichte, stetig weiterentwickelte und mittlerweile eine der am meisten genutzten Open Source-Bibliotheken zur digitalen Bildverarbeitung. Sie ist plattformübergreifend, bietet Schnittstellen für mehrere Programmiersprachen und verfügt über eine umfangreiche Algorithmensammlung, beispielsweise zur Filterung von Bildern, zum Maschinellen Lernen oder Stereosehen. [162] [163] [164] Wie bereits erwähnt, kann OpenCV über eine Schnittstelle zusammen mit ROS verwendet werden und ist bereits Teil dessen Standardinstallation.

Die ebenfalls unter der BSD-Lizenz stehende und unter ROS nutzbare **Point Cloud Library (PCL)** wurde speziell für die Verarbeitung von 3D-Punktewolken entwickelt. Die modular aufgebaute Bibliothek kann auf einer Vielzahl von Betriebssystemen eingesetzt werden und enthält u. a. Algorithmen zur Filterung, Segmentierung oder Oberflächenrekonstruktion. [165]

2.4 Aktuelle Entwicklungen und am Markt verfügbare Systeme im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation

Im folgenden Kapitel werden zunächst am Markt verfügbare Mensch-Roboter-Kooperationssysteme vorgestellt, die in der Industrie und Forschung bereits einsetzbar sind. Anschließend wird zur Abgrenzung dieser Arbeit sowie zum Aufzeigen zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten auf aktuelle, für diesen Kontext relevante Ansätze aus der Forschung eingegangen.

2.4.1 Industriell und zu Forschungszwecken einsetzbare MRK-fähige Industrierobotersysteme

Wie in Kapitel 2.1.1 dargestellt, müssen kollaborative Robotersysteme die Sicherheitsanforderungen der DIN EN ISO 10218-1 erfüllen und mindestens einer der vier dort genannten Betriebsarten - dem sicherheitsbewerteten überwachten Halt, der Handführung, der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung oder der Leistungs- und Kraftbegrenzung - entsprechen. Gemäß dieser Einordnung werden aktuell verfügbare MRK-Systeme nachfolgend kategorisiert. Wie angesprochen, müssen, soweit aus einer Risikobewertung keine anderen Vorgaben resultieren, alle Sicherheitsfunktionen einschließlich der eingesetzten Robotersteuerungen eine Leistungsfähigkeit von einem Performance Level (PL) d der Kategorie 3 oder einem Sicherheits-Integritätslevel (SIL) 2 aufweisen. Demnach darf der Ausfall einer einzelnen Komponente nicht zu einem Ausfall des gesamten Systems führen, was u. a. durch eine zweikanalige Ausführung und Auswertung erreicht werden kann. Beispielsweise bietet der Hersteller SCHUNK in sicherer Technik ausgeführte Standardgreifer [166]. Die sicherheitsbezogenen Funktionen von Robotersteuerungen können sich auf einen sicher überwachten Halt, eine sicher überwachte Geschwindigkeit, Position, Kraft oder definierte Arbeitsräume beziehen und werden von den großen Industrieroboterherstellern unter unterschiedlichen Bezeichnungen und meist als optionale Zusatzpakete angeboten. Beispiele hierfür sind der "SafetyController" von Reis Robotics [167], "Safe Operation" der "Safe Robot Technology" von Kuka [168], "Dual Check Safety (DCS)" von Fanuc [169] oder "SafeMove" von ABB [170].

Bei der Kollaborationsart des **sicherheitsbewerteten überwachten Halts** erfolgt eine autonome Reduktion der Robotergeschwindigkeit bis zum Stopp der Kategorie 2 nach dem Betreten sowie ein anschließender Wiederanlauf nach dem Verlassen eines definierten Kollaborationsraums. Zur Anwesenheitsdetektion von Personen werden unterschiedliche Sensoren als Bestandteil nichttrennender Schutzeinrichtungen, mit einer Leistungsfähigkeit von ebenfalls mindestens einem PL d der Kategorie 3 oder einem SIL 2, eingesetzt. Gebräuchliche Beispiele sind Trittmatten als druckempfindliche Schutzeinrichtungen oder Lichtvorhänge und -gitter als berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS). Diese Form der Kollaboration stellt den geringsten Interaktionsgrad zwischen Mensch und Roboter dar, erlaubt jedoch den Verzicht traditioneller, trennender Schutzeinrichtungen. Ein Einsatzbeispiel ist die Materialzuführung.

Eine weitere spezielle Form der Kollaborationsart ist die Handführung. Hierbei wird der Roboter bei einer reduzierten und sicher überwachten Geschwindigkeit mittels eines Eingabegeräts, wie einem Kraft-Momenten-Sensor oder einem Joystick, in der Nähe des Endeffektors bewegt. Dient die Handführung zur Programmerstellung, dem sogenannten Teachen, wird dies auch als Programmierung durch Vormachen (engl. "Programming by Demonstration", PbD) bezeichnet [171]. Ein beispielhaftes, am Markt verfügbares Eingabegerät ist die 6D-Maus von Reis Robotics, die vom Standard-Programmierhandgerät abgenommen und per Magnet an den Flansch oder das Werkzeug des Roboters angebracht werden kann [172]. Benutzereingaben wie Ziehen oder Drücken werden in direkte Bewegungsvorgaben des Roboters umgesetzt [172]. Über das "Safe Guiding"-Technologiepaket der MRK-Systeme GmbH wird das Handführen von Kuka-Robotern, die mit der "Safe Operation"-Sicherheitsoption ausgestattet sind, ermöglicht [173]. Hierbei kann der Roboter zum Teachen oder zur Telemanipulation mittels Joystick oder Kraft-Momenten-Sensor innerhalb festgelegter Bahnen oder frei im Raum bewegt werden [173]. Anwendungsszenarien stellen u. a. die Handhabung von sperrigen Bauteilen bei komplexen Einfädelprozessen in der Automobilmontage dar [174]. Neben mit Handführeinrichtungen ausgestatteten Standardindustrierobotern sind auch speziell entwickelte Kobots dieser Kollaborationsart zuzuordnen, die ebenfalls eine Bewegungsvorgabe vom Menschen kraftverstärkt und innerhalb virtueller Begrenzungen ausführen können [12]. Ein beispielhafter Einsatz ist die assistierte Demontage von Türen nach dem Lackiervorgang zum Einbau des Führerraums in die Fahrzeugkarosserie [12].

Bei der **Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung** wird im Gegensatz zum sicherheitsbewerteten überwachten Halt der Roboter beim Auslösen eines Sensorsignals durch eine Person nicht sofort gestoppt. Vielmehr wird eine detektierte Person kontinuierlich registriert und erst ab Unterschreitung eines gewissen Abstands zum Roboter dessen Geschwindigkeit reduziert. Dies ermöglicht das zeitgleiche Arbeiten von Mensch und Maschine im selben Raum, führt jedoch zu höheren Anforderungen an die eingesetzte Sensorik, Auswertung und intelligente Steuerung des Roboters. Die hierfür verwendeten Sensorsysteme müssen in der Lage sein, eine Person durchgängig sicher erkennen zu können, was bei vielen Sensorprinzipien, wie Ultraschall basierten oder kapazitiven Verfahren, bedingt durch ihre begrenzten Auflösungs- und damit verbundenen Interpretationsmöglichkeiten allein schwer realisierbar ist. Auf Grund dessen existieren für diese Kategorie bislang kaum verfügbare Systeme am Markt. Eine Ausnahme stellt das SafetyEYE von Pilz dar, das in sicherer Technik mit einem PL d und SIL 2 das Eindringen von Objekten in definierbare Warn- und Schutzräume mittels eines Stereokamerasystems überwacht [175]. Bei Verletzung eines weiter entfernten Warnraums wird ein optisches und/ oder akustisches Signal, im Fall eines sogenannten Schutzraums in der Nähe eines Roboters ein Halt ausgelöst [175]. Voraussetzungen für den Betrieb sind eine ausreichende Beleuchtungssituation und fest zu installierende Referenzmarken, über die eine unzureichende Helligkeit oder eine Veränderung der Pose der aus drei Einzelkameras bestehenden Sensoreinheit detektiert werden können [175]. Bis zu einer Anbringungshöhe des Kamerasystems von 4 m kann eine Armauflösung, d. h. die Erkennung eines Objekts mit einem Durchmesser ab 40 mm, bzw. von 7,5 m eine Körperauflösung, die einem Durchmesser ab 200 mm entspricht, erreicht werden [175]. Wird ein Objekt entsprechender Mindestgröße in den Warn- und Schutzräumen registriert, wird vom Betreten durch eine Person ausgegangen. Eine eindeutige Unterscheidung zwischen Menschen und anderen Objekten ist nicht möglich. Die Kollaborationsart der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung ermöglicht einen höheren Grad an Interaktionsmöglichkeiten als beim überwachten Stopp, auch wenn ein direkter Kontakt mit dem Roboter nur bei dessen Stillstand zulässig ist. Im Gegensatz zur durch den Bediener gesteuerten Bewegung mittels Handführung kann der Roboter völlig autonom definierte Programme ausführen. Werden im Automatikbetrieb hohe Traglasten benötigt oder stellen Werkzeug und/ oder Werkstück eine unzulässige Gefährdung dar, ist auf diese Betriebsart zur Realisierung von MRK-Systemen zurückzugreifen.

Die meisten zu beobachtenden Produktentwicklungen der letzten Jahre im Bereich kollaborativer Robotersysteme sind der **Leistungs- und Kraftbegrenzung** zuzuordnen. Bild 10 gibt einen Überblick über ausgewählte, wichtige Industrieroboter dieser Kategorie geordnet nach ihrer Markteinführung. Die Sicherheit der Systeme wird durch eine inhärent sichere Konstruktion und/ oder steuerungstechnische Maßnahmen erreicht. Allein bei dieser Betriebsart ist der direkte Kontakt zwischen einem Werker und einem sich bewegenden Roboter im Automatikmodus zulässig. Unbeabsichtigte



2 Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich assistierender und kooperierender Industrierobotersysteme

Bild 10: Auswahl industrieller Robotersysteme der Kollaborationsart Leistungs- und Kraftbegrenzung, zeitlich angeordnet nach ihrer Markteinführung; Bildquellen mit freundlicher Genehmigung von Hansruedi Früh¹, der Universal Robots GmbH², der pi4_robotics GmbH³, der TETRA GmbH⁴, der Rethink Robotics, Inc.⁵, der ABB Automation GmbH⁶, der KUKA AG⁷, der F&P Robotics AG⁸, der FANUC Deutschland GmbH⁹, der YASKAWA Europe GmbH¹⁰ und der FRANKA EMIKA GmbH¹¹

Kollisionen werden toleriert, da nur eine sehr geringfüge Beeinflussung des Menschen zu erwarten ist. Die Roboter verfahren zur Reduktion der kinetischen Energie meist mit einer reduzierten Geschwindigkeit und weisen eine angepasste Form mit abgerundeten Konturen und Polsterungen auf, um Quetsch- und Klemmstellen zu vermeiden und das Verletzungspotential bei einer unbeabsichtigten Berührung zu senken. Kollisionen werden überwiegend beim Auftreten auf Basis propriozeptiver (interner, d. h. "zur Messung der inneren Zustandsgrößen" [7] dienender) Sensoren, wie Momentensensoren in den Achsen, und/ oder vorab durch exterozeptive (externe, d. h. "zur Messung der Zustandsgrößen der Umgebung" [7] eingesetzte) Sensoren erkannt, um die Roboterbewegung aktiv zu stoppen. Einige der Roboter sind auf Grund ihrer Leichtbauweise, begrenzten Antriebsleistung und der damit verbundenen niedrigen Traglast inhärent sicher. Sie eignen sich beispielsweise für die Kleinteilehandhabung und -montage. Hierzu können der Neuronics Katana 450 und der bionisch inspirierte BioRob von Bionic Robotics gezählt werden. Der BioRob ist zudem passiv nachgiebig, da die Antriebe über elastische Seilzüge mit den Gelenken verbunden sind [176]. Mit einer Traglast von 500 g stellt der seit 2015 erhältliche und auf dem Konzeptroboter FRIDA (Friendly Robot for Industrial Dual Arm Assembly) basierende

ABB YuMi (You and Me) bzw. IRB 14000 [177] ebenfalls ein geringes Gefährdungspotential dar. Zu den leistungs- und kraftbegrenzten Robotern auf Grund steuerungstechnischer Maßnahmen können die Roboterserien UR3, UR5 und UR10 des dänischen Herstellers Universal Robots, die KUKA LBR (Leichtbauroboter) iiwa (intelligent industrial work assistant) 7 und 14 [178] sowie die Roboter Baxter und Sawyer des US-amerikanischen Unternehmens Rethink Robotics gezählt werden. Letztere verfügen über zusätzlich passive Nachgiebigkeit durch sogenannte Series Elastic Actuators (SEA), bei welchen die steifen Antriebs- und Abtriebselemente über Federn miteinander verbunden sind [179]. Weitere Beispiele der steuerungsbedingten Leistungs- und Kraftbegrenzung sind die grünen MRK-Roboter CR-4iA, CR-7iA bzw. 7iA/L und CR-35iA von FANUC, welche auf Standardrobotern aufbauen [180], sowie die Roboter P-Rob von F&P Robotics [181] [182], der Panda von Franka Emika [183] und der HC10 (Human Collaborative) von Yaskawa Motoman [184]. Roboter, die mittels kapazitiver Nahfeldsensoren im Voraus eine drohende Kollision erkennen und abbremsen bzw. anhalten können, sind der KR 5 SI der MRK-Systeme GmbH [185] sowie der Bosch APAS (Automatischer Produktionsassistent) assistant [186]. Zur weiteren Risikominderung wird beim Funktionspaket "SafeInteraction" des KR 5 SI, welcher auf dem Standard-KUKA-Roboter KR 5 ARC HW basiert, taktile Sensorik eingesetzt [185].

Neben dem reduzierten Gefährdungspotential zeichnen sich viele dieser leistungs- und kraftbegrenzten Roboter durch weitere Eigenschaften aus. Beispielsweise bieten der ABB YuMi oder die Roboter von Rethink Robotics bereits spezielle Greifer, integrierte Kamerasensorik zur Bauteilerkennung oder vereinfachte Programmierkonzepte [187]. Unterschiede gibt es u. a. bei der Reichweite, Traglast, Arm- und Achsanzahl, Geschwindigkeit sowie vor allem auch bei der Wiederholgenauigkeit und dem Kaufpreis. Die KUKA LBR iiwa-Roboter heben sich neben der Möglichkeit zur Gravitationskompensation durch programmierbare Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften ab, die komplexe Montagevorgänge ohne zusätzliche Sensorik oder Fügehilfen ermöglichen [188]. Ähnliche sensitive Fähigkeiten bei einem vergleichsweise sehr niedrigen Kaufpreis soll der Roboter Panda von Franka Emika aufweisen [189] [183]. Bestimmte Robotersysteme sind für spezielle Anwendungsfälle bzw. hinsichtlich ihres internen Sicherheitssystems von einer offiziellen Prüfstelle zertifiziert, beispielsweise der Bosch APAS, der BioRob, der KR 5 SI der MRK-Systeme GmbH und der auf einer mobilen Plattform installierte LBR iiwa als KUKA flexFELLOW durch die DGUV [190] [191].

2.4.2 Aktuelle Forschungsansätze MRK-fähiger Industrieroboter

Das Themenfeld der Mensch-Roboter-Kooperation umfasst vielfältige Forschungsbereiche, von der Entwicklung spezieller Sensor- und Antriebskonzepte wie sensitive Häute oder künstliche Muskeln, über die Realisierung intuitiver Mensch-Maschine-Schnittstellen und Bedienansätze bis hin zur Entwicklung von Planungsmethoden zur Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter. Im Folgenden erfolgt deshalb nur eine eingrenzende Betrachtung aktueller Forschungsansätze auf dem Gebiet der MRK-fähigen Industrieroboter anhand beispielhafter Arbeiten aus den für diese Arbeit relevanten Kategorien der Sicherheit und Autonomie (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Auswahl aktueller Forschungsansätze der Mensch-Roboter-Kooperation aus den übergeordneten Bereichen Sicherheit und Autonomie

	MRK-Themenfelder	Ausprägungen	Beispielhafte Forschungsarbeiten	
		Kollisionserkennung und Nachgiebigkeitsregelung steifer Leichtbauroboter	[192] [19] [193] [18]	
	Leistungs- und	Inhärent nachgiebige Roboter durch elastische Elemente und weiche Strukturen	[194] [195] [196] [197] [P1] [198]	
rheit	Kraftbegrenzung	Weiche Greifer	[199] [200] [P2] [201] [202]	
Sicher		Ermittlung biomechanischer Verletzungsgrenzwerte	[203] [204] [205] [206]	
	Geschwindigkeits-	Verwendung stationärer Sensoren	[15] [207] [22] [208] [209] [210] [211] [212] [213] [17] [214]	
	wachung	Verwendung mitgeführter Sensoren	[215] [216] [217]	
Autonomie	Autonome Bewe-	Umgebungsmodellierung und -interpretation	[213] [218] [219] [220] [221] [222] [223] [20]	
	gungsgenerierung	Autonome, kollisionsvermei- dende Bahnplanung	[213] [218] [20] [224] [225] [226]	

Im Bereich der Sicherheit wird hierbei auf die zwei, bezüglich ihres Forschungsbedarfs besonders relevanten Betriebsarten der Industrieroboternorm, die "Leistungs- und Kraftbegrenzung" sowie die "Geschwindigkeitsund Abstandsüberwachung", eingegangen. Hinsichtlich des Autonomieaspektes erfolgt eine Eingrenzung auf die autonome Bewegungsgenerierung von Industrierobotern.

Ein Ansatz zur Realisierung sicherer Robotersysteme zur Leistungs- und Kraftbegrenzung mittels steuerungstechnischer Maßnahmen basiert auf der Kollisionserkennung durch interne oder taktile Sensoren bei Leichtbau-Industrierobotern. Ein bekanntes Beispiel ist der DLR-LBR III, der mittels genauer abtriebsseitiger Drehmomentenmessung an allen Achsen und komplexen Regelungsverfahren eine aktive Nachgiebigkeitsregelung und Kollisionsreaktion [19] [192] ermöglicht und als Kuka LBR iiwa (siehe auch Kapitel 2.4.1) kommerzialisiert wurde [227]. Forschungsarbeiten der Berührungs- und Kollisionserkennung widmen sich taktilen Sensoren auf der Roboteroberfläche [193] oder der Überwachung von Motorströmen [18]. Neben der aktiven Nachgiebigkeitsregelung von steifen Systemen mit limitierten Massen und Geschwindigkeiten und damit tolerierbaren Einwirkungen auf den Menschen im Kollisionsfall werden zunehmend inhärent nachgiebige Roboter erforscht. Zu diesen können Roboter mit künstlichem Muskel-Sehnen-Apparat und elastischen Elementen, wie das DLR-Hand-Arm-System mit variablen Steifigkeitsaktoren [194], gezählt werden. Weitere Forschungsansätze für inhärent nachgiebige Robotersysteme befassen sich mit dem generellen Aufbau aus weichen und festen Strukturen [195] sowie dem Einsatz künstlicher, weicher Muskeln. Diese basieren beispielsweise auf pneumatischen Aktoren [196] [197] oder elektroaktiven Polymeren (EAP), wie di-elektrischen Elastomeraktoren (DEA) [P1] [198]. Daneben werden im Rahmen der sogenannten "Soft Robotics" auch fast vollständig aus weichen Strukturen aufgebaute Robotersysteme erforscht [228]. Vorteile der passiv nachgiebigen Systeme gegenüber aktiv nachgiebig geregelten Robotern sind u. a. ihre Robustheit hinsichtlich kurzzeitig einwirkender, hoher Kräfte sowie die Möglichkeit, die hierbei eingebrachte Energie zwischen zu speichern [227]. Zur Realisierung einer sicheren Gesamtanwendung gerade bei der Nutzung leistungs- und kraftbegrenzter Roboter rückt zudem die Entwicklung weicher Greifer in den Fokus der Forschung, wobei zur Realisierung möglichst autonomer Systeme neben dem Sicherheitsaspekt die Flexibilität eine wichtige Rolle spielt. Aktuelle Beispiele für weiche, flexible und oft bionisch inspirierte Greifer sind der sogenannte Jamming-Gripper [199] [200], der von Empire Robotics als Versaball kommerzialisiert wurde [229], und darauf aufsetzende Weiterentwicklungen [P2], der auf dem Prinzip des Elefantenrüssels basierende Bionic Handling-Assistent [201] und der von der Chamäleonzunge inspirierte FlexShapeGripper [202] des Festo Bionic Learning Networks oder

der ebenfalls einem Elefantenrüssel nachempfundene Brommi-TAK [197] [230]. Auf Grund des zunehmenden Einsatzes leistungs- und kraftbegrenzter Roboter, bei denen Kollisionen mit dem Menschen nicht mehr vollständig auszuschließen sind, werden seit einigen Jahren zulässige **biomechanische Grenzwerte** für den Verletzungsfall ermittelt [203] [204] [205] [206].

Forschungsarbeiten im Bereich der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung von Industrierobotern basieren auf stationären oder durch den Roboter mitgeführten Sensoren und unterscheiden sich u. a. hinsichtlich der Art, des Umfangs und der Verarbeitung der Umgebungsinformationen sowie der abgeleiteten Roboterreaktion. Beispiele für häufig genutzte stationäre Sensoren in der Roboterperipherie sind optische Sensoren, wie Grauwert-, Farb- oder Tiefenkameras. Markerbasierte Ansätze, wie beispielsweise Motion-Capturing-Systeme, werden in diesem Kontext auf Grund des zusätzlichen, vor allem im industriellen Umfeld nicht zu rechtfertigenden Aufwands nicht betrachtet. In [15] werden zur Geschwindigkeitsanpassung eines SCARA-Roboters die Hände und der Kopf eines in der unmittelbaren Umgebung arbeitenden Werkers mittels Farbkameras detektiert. Ein Kollisionsvermeidungssystem, das stationäre, in der Roboterzelle angebrachte Grauwertkameras nutzt, um pixelbasiert durch Hindernisse belegte Umgebungsbereiche zu ermitteln, ist in [207] beschrieben, wobei eine Unterscheidung in verschiedene Objekte nicht erfolgen kann. Auf dem Ansatz von [207] aufbauend, wurden verschiedene Überwachungssysteme [22] unter Nutzung mehrerer stationärer Farb- [208] bzw. Tiefenkameras [209] [210] entwickelt. Durch die Fusionierung von Kamerabildern aus verschiedenen, bekannten Perspektiven und der Berechnung des kürzesten Abstands unbekannter Objekte zur Robotergeometrie wird eine Geschwindigkeits- oder Bahnanpassung ermöglicht [224] [225]. In [211] wird die Kombination aus einer stationären Stereosowie einer Time-of-Flight (ToF)-Kamera als Ausgangsbasis einer Umgebungserfassung von Industrierobotern vorgestellt. Auch der Einsatz mehrerer Kinect-Kameras, wie in [231] oder zur speziellen Anwendung im robotergestützten Operationssaal [212], wurde untersucht. Eine spezielle Erkennung von Personen, aber nicht allgemeinen Objekten auf Basis einer stationären PMD (Photonenmischdetektor)-Kamera sowie angepasster Roboterreaktion stellt [213] vor. [17] beschreibt ein auf Projektionen basierendes System zur Kollisionsvermeidung und Übermittlung von Zusatzinformationen an den Bediener. Die Fusion von optischen mit kapazitiven sowie Ultraschallsensoren zur Abstandsermittlung zwischen Roboter und Personen wird in [214] vorgeschlagen. Im Bereich der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung mittels robotergeführter Sensoren bzw. einer künstlichen Roboterhaut finden sich ebenfalls Forschungsansätze auf Basis unterschiedlicher Sensorprinzipien. Resistive, taktile Berührungssensoren, wie beispielsweise in [232] und [193] beschrieben, eignen sich für diese Kollaborationsart nicht, da zur Signalauslösung bereits ein zu vermeidender Kontakt stattgefunden haben muss. Eine Möglichkeit zur Hindernisdetektion stellen den Roboterarm einhüllende Ultraschallsensoren dar [215]. Eine andere Option ist die Verwendung kapazitiver Näherungs- und Berührungssensoren, wie in [216] vorgeschlagen. Die Nutzung optischer Sensoren zur Anbringung auf dem Roboter und der damit möglichen lokalen Absicherung ist beispielsweise in [217] dargestellt.

Die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung mittels sensorbasierter Anwesenheitsdetektion eines Hindernisses kann durch eine autonome Bahnplanung von Industrierobotern auf Grundlage einer Umgebungsmodellierung und -interpretation ergänzt werden. Forschungsansätze unterscheiden sich hierbei u. a. dahingehend, ob eine Personenerkennung und Klassifikation detektierter Hindernisregionen, eine Prädiktion der Bewegung dynamischer Objekte sowie eine darauf basierende Bewertung und Risikoeinschätzung erfolgen. Aufbauend auf der Arbeit von [213] erfolgt in [218] eine Erweiterung der bestehenden Umgebungswahrnehmung um eine Objektund Handlungserkennung sowie der Risikobeurteilung und Roboterpfadplanung. In [219] wird eine voxelbasierte Objektmodellierung im Roboterarbeitsraum unter der Nutzung mehrerer Kameras sowie zusätzlicher Annahmen über Objekteigenschaften vorgestellt. Eine Abschätzung der Arbeitsraumbelegung und Menschmodellierung bei Verwendung mehrerer Farbund Tiefenkameras beinhaltet [220]. Die Vorhersage der menschlichen Bewegung anhand offline gelernter Trajektorien und aktueller Kameradaten wird in [221] und [222] beschrieben. Zur Poseschätzung und Modellierung von Personen werden in [221] und [223] Partikelfilter sowie Hüllquader bzw. Ellipsoide eingesetzt. Wahrscheinliche Positionen des Menschen im Arbeitsraum werden in [20] mittels Bewegungsmustern durch Hidden-Markov-Modelle ermittelt und dienen als Eingangsgrößen für eine kollisionsvermeidende Bahnplanung. In [226] wird ein Online-Bahnplaner vorgestellt, der die freien Raumbereiche eines auf einer PMD-Kamera basierenden Umgebungsmodells zur Planung gegebenenfalls kollisionsfreier Trajektorien verwendet, wobei keine explizite Modellierung dynamisch detektierter Objekte erfolgt. Neben diesen für den speziellen Kontext der Mensch-Roboter-Kooperation entwickelten Ansätzen wurden allgemeine sowie im Besonderen für vertikale Knickarmroboter geeignete Verfahren zur autonomen Roboterbahnplanung bereits in Kapitel 2.2 dargestellt.

3 Konzeption eines sicheren und flexiblen Roboter-Assistenzsystems in der Fertigung

Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel dargestellten, verfügbaren Systemen zur Mensch-Roboter-Kooperation in der Fertigung werden im Folgenden bestehende Defizite hinsichtlich der Sicherheit und Autonomie identifiziert und notwendige Handlungsbedarfe abgeleitet. Diese resultieren in der anschließenden Konzeption von Lösungsansätzen zentraler Problemfelder für ein sicheres und flexibles Industrieroboter-Assistenzsystem.

3.1 Identifizierung bestehender Defizite hinsichtlich Sicherheit und Autonomie im Bereich der Mensch-Roboter-Kooperation

Der herkömmliche Einsatz von Industrierobotern auf Basis trennender Schutzeinrichtungen verursacht zusätzliche Kosten durch Anlagenperipherie, wie beispielsweise Schutzzäune, sowie einen erhöhten Platzbedarf und verhindert eine direkte Kooperation mit Personen. Zur Realisierung autonomer, kollaborativer Systeme ist ein Wegfall dieser starren Trennung durch den Einsatz sensitiver Schutzeinrichtungen oder inhärent sicherer Roboter erforderlich. Die Analyse am Markt verfügbarer Mensch-Roboter-Kooperationssysteme in Kapitel 2.4.1 zeigt, dass die Kollaborationsarten des sicherheitsbewerteten überwachten Halts und der Handführung den geringsten Interaktionsgrad bzw. eine spezielle Form der Kooperation darstellen und bereits durch erwerbliche Produkte realisiert sind. Auch Industrieroboter mit einer Leistungs- und Kraftbegrenzung sind bereits kommerziell verfügbar, besitzen jedoch auf Grund des erlaubten Kontakts zu Personen und den sich hierdurch ergebenden Möglichkeiten weiterhin eine hohe Bedeutung für die Forschung. Die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung stellt die einzige Möglichkeit dar, Roboter mit einer hohen Traglast und einer damit verbundenen potenziell hohen Gefährdung im Fall einer Kollision in der unmittelbaren Umgebung von Werkern zu betreiben. Zur Reduzierung der im Kontaktfall einwirkenden kinetischen Energie verfügen die meisten leistungs- und kraftbegrenzten Industrieroboter neben den dargestellten Mechanismen zur Kollisions- und Berührungserkennung über eine niedrige bis mittlere Traglast und eine damit verbundene niedrige Masse oder dürfen nur langsam verfahren werden. Ebenso kann die Notwendigkeit des Einsatzes potentiell gefährdender Werkzeuge und Werkstücke, z. B. auf Grund spitzer Kanten, dazu führen, dass ein direkter Kontakt auch bei Verwendung eines grundsätzlich MRK-fähigen Roboters nicht möglich und ein Mindestabstand einzuhalten ist. Demzufolge stellt die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung eine wesentliche Kategorie der Mensch-Roboter-Kooperation dar mit nachfolgend genannten Forschungsbedarfen. Als derzeit einziges sicheres, auf dem Markt verfügbares Sensorsystem zur Personenerkennung dieser Kollaborationsart weist das SafetyEYE von Pilz dennoch Nachteile auf. Es kann nur das Vorhandensein eines Objekts einer bestimmten Mindestgröße detektieren und geht hierbei vom Erkennen eines Menschen aus. Da keine Klassifikation in verschiedene Objekte erfolgt, muss bei Unterschreitung einer Abstandsschranke zum Roboter aus Sicherheitsgründen immer ein Halt ausgelöst werden. Zur Ermöglichung einer angepassten Reaktion ergibt sich die Notwendigkeit, den Arbeitsraum mittels geeigneter Sensorik zu überwachen und zu interpretieren, wofür jedoch keine geeigneten, kommerziellen Systeme zur Verfügung stehen.

Neben der Sicherstellung einer Kollisionsvermeidung mit Personen auf Basis eines bekannten, veränderten Umgebungsmodells fehlt in aktuell verfügbaren Systemen zudem die wünschenswerte Möglichkeit, die geplante Roboterbahn auf Kollisionsfreiheit mit anderen Hindernissen überprüfen und gegebenenfalls autonom anpassen zu können. Da aktuelle Industrieroboter über keine einheitlichen und meist wenig intuitiven Benutzerschnittstellen verfügen, erfordert die Erstellung und Änderung von Programmen einen erheblichen Aufwand und kann nur durch Fachpersonal erfolgen. Dies führt zu hohen laufenden Kosten und kann gerade in kleineren und mittleren Betrieben ein Hemmnis darstellen, auf die Möglichkeiten der Mensch-Roboter-Kooperation zurückzugreifen. Um Roboter auch ohne Experten bei sich veränderten Umgebungsbedingungen und mittels intuitiver Eingabegeräte zur Vorgabe neuer Zielposen programmieren zu können, ist der Einsatz autonomer, kollisionsvermeidender Bahnplanungsverfahren notwendig. Aktuell für mehrachsige Roboter einsetzbare probabilistische Planer (vgl. Kapitel 2.2) sind sehr leistungsfähig, weisen jedoch auch Nachteile auf. Hierzu zählt die Generierung für den Anwender nicht vorhersehbarer und intuitiver sowie hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie kurzen Weglängen oder großen Hindernisabständen, meist nicht optimaler Pfade auf Grund der zufallsbedingten Auswahl von Konfigurationen im *n*-dimensionalen Achsraum. Existierende Bahnplaner für Sechsachsroboter, welche die Zellzerlegung nutzen, finden meist im Konfigurationsraum statt und erfordern eine aufwändige Ermittlung der durch Hindernisse belegten Bereiche.

Der Handlungsbedarf in den genannten Bereichen der Wahrnehmung und autonomen Bewegungsgenerierung spiegelt sich in den in Kapitel 2.4.2 dargestellten Forschungsarbeiten wider und wird auch in der EFFIROB-Studie zur Servicerobotik [9] im Rahmen bestehender Defizite aufgeführt. Lösungsansätze für die dargelegten Bereiche können einen Beitrag dazu leisten, neue
Einsatzgebiete von kollaborativen Robotern im industriellen Umfeld, aber beispielsweise auch zur Fertigungsassistenz in Behindertenwerkstätten, zu ermöglichen. Durch den Einsatz eines MRK basierten Assistenzsystems kann der Mensch von schweren, ergonomisch ungünstigen sowie monotonen Aufgaben entlastet werden, ohne die Nachteile eines herkömmlichen Industrieroboters mit trennenden Schutzeinrichtungen in Kauf nehmen zu müssen, sodass ältere sowie leistungsgeminderte Produktionsmitarbeiter länger bzw. weiterhin ihren Beruf ausüben können.

3.2 Umsetzung zentraler Handlungsbedarfe in einem Industrieroboter basierten Unterstützungssystem

Die in dieser Arbeit entwickelten Lösungsansätze zielen auf die im vorherigen Teilkapitel identifizierten zentralen Handlungsbedarfe zur Realisierung eines sicheren und flexiblen Roboter-Assistenzsystems zur Handhabung, Montage und Bearbeitung in der Nähe des Menschen ab, die durch bisherige Forschungsarbeiten nicht vollständig gelöst sind. Im Einzelnen werden die für die Kollaborationsart Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung besonders relevanten Themenfelder der sensorischen Arbeitsraumüberwachung und Kollisionsvermeidung sowie die autonome Pfadplanung von Industrierobotern adressiert und in einem Demonstrationssystems umgesetzt. Hauptzielsetzungen hierbei sind die Steigerung der Flexibilität sowie die Gewährleistung der Personensicherheit bei Einsatz eines mit einer sicheren Steuerung (siehe Kapitel 2.4.1) ausgestatteten Standard-Industrieroboters, wobei kein sicheres System gemäß des geltenden Regelwerks (wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben), sondern der Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit angestrebt wird. Die erarbeiteten Lösungsansätze werden am Beispiel des in der Industrie häufig eingesetzten vertikalen Sechsachs-Knickarmroboters mit Zentralhand demonstriert. Durch den modularen Aufbau und den generischen Ansatz ist eine grundsätzliche Übertragung einzelner Teilkomponenten auf andere Bereiche sowie unterschiedliche serielle Roboter bei Anpassung einzelner Module möglich. Da bei der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung ein Kontakt während der Roboterbewegung auszuschließen ist, handelt es sich nach dem in der Literatur gebräuchlichen Verständnis um ein System zur Mensch-Roboter-Koexistenz (siehe Kapitel 2.1.1). In Abgrenzung zu anderen Forschungsansätzen wird ein Gesamtkonzept mit Integration aller wesentlichen Teilfunktionen auf Basis eines stationären 3D-Sensors, dessen Erfassungsbereich den Arbeitsraum des eingesetzten Industrieroboters abdeckt, entworfen. Der hierdurch ermöglichte schlanke und stringente Aufbau führt zu einer performanten Datenverarbeitung, was sich u. a. in der Verwendung eines Standard-PCs zeigt und zukünftig denkbare, normenkonforme Implementierungen vereinfacht. Der konzeptionelle Gesamtaufbau mit den wichtigsten Informationsflüssen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Teilkomponenten des Roboter-Assistenzsystems als übergeordnete Instanz zur Bewegungsplanung ist in Bild 11 vereinfacht skizziert.



Bild 11: Konzeptioneller Aufbau des Roboter-Assistenzsystems als übergeordnete Instanz zur Bewegungsplanung

Notwendige Voraussetzung für den kollaborativen Einsatz des inhärent nicht sicheren Industrieroboters ist eine durchgängige, sensorische Arbeitsraumerfassung und -interpretation als sensitive Schutzeinrichtung für Personen und Umgebung sowie zur intelligenten Bewegungsplanung. Auf Basis stationärer 3D-Sensorik und der aktuellen Roboterachswerte werden dynamische Hindernisse in der Umgebung fortlaufend detektiert und in geeigneter Form an die Online-Kollisionsvermeidung und autonome Bahnplanung weitergegeben. Neben bereitgestellten Informationen über bekannte statische Hindernisse dienen die Positionsdaten von dynamischen Hindernissen dem autonomen Bahnplaner als Eingangsdaten, um bei Bedarf eine Neugenerierung des Bewegungspfads durchzuführen. Falls ein zulässiger Weg gefunden wird, werden die nächsten Sollpositionen in geeigneten Zeitabständen an das Robotersystem übermittelt, dessen Steuerung die Funktionalitäten der Feininterpolation und Achsregelung realisiert. Während der Bewegung des Roboters stellt die Kollisionsvermeidung auf Basis des aktuellen Umgebungsmodells die Vermeidung von Zusammenstößen mit dynamischen Hindernisobjekten sicher. Zur Visualisierung und Verifikation während der Laufzeit detektierter und

bekannter, fester Hindernisse sowie kollisionsfreier Bahnen dient die Anbindung an eine kommerzielle Simulationsumgebung.

Um im Rahmen eines Mensch-Roboter-Kooperationssystems eine für den Benutzer leicht verständliche Roboterbewegung vorzugeben, wird zur autonomen, kollisionsfreien Bahnplanung nicht auf ein herkömmliches Verfahren zurückgegriffen, sondern ein neuartiger Ansatz auf Basis der Zellzerlegung des Roboterarbeitsraums realisiert. Ein in [78] beschriebenes Verfahren, welches ebenfalls im Arbeitsraum abläuft, unterscheidet sich vom vorliegenden Ansatz u. a. dadurch, dass zwei zylindrische Zellzerlegungen mit fester Orientierung für die Start- und Zielpose generiert und durch einzelne Zellen zur Umorientierung miteinander verbunden werden. Falls in diesem verbundenen Graphen kein Pfad gefunden wird, wird davon ausgegangen, dass keine Lösung existiert.

Ein Großteil der zu entwickelnden Softwarebestandteile des Assistenzsystems wird aus Gründen der zeiteffizienten Berechnung, Einheitlichkeit und Plattformunabhängigkeit nativ in C++ implementiert und auf den Einsatz vorhandener Bibliotheken verzichtet. Beispielsweise wird so zur Berechnung der Rückwärtstransformation anstelle eines allgemeingültigeren, jedoch langsameren numerischen Verfahrens auf einen an die spezifische Roboterkinematik angepassten, analytischen Löser zurückgegriffen. Zudem können erforderliche, für einige Bibliotheken recht aufwändige Schnittstellenanpassungen entfallen und eigener, im Gegensatz zu ggf. unvollständig dokumentiertem fremden, Quellcode leichter angepasst werden. Einzelne Komponenten können jedoch bei Bedarf durch vorhandene Open Source-Softwarepakete (siehe Kapitel 2.3) ergänzt oder ersetzt werden.

4 3D-Kamera basierte Erfassung und Interpretation des Roboterarbeitsraums

In diesem Kapitel werden die Realisierung der sensorischen Umgebungswahrnehmung und -interpretation sowie deren praktische Evaluierung anhand zweier Testroboter beschrieben. Dabei werden zunächst notwendige Grundlagen, wie die Realisierung der Datenschnittstelle zur Robotersteuerung, die kinematische und geometrische Modellierung des Industrieroboters sowie die Auswahl und Kalibrierung des eingesetzten 3D-Sensors dargelegt. Anschließend werden die Objekterkennung und -verfolgung auf Basis eines aktuellen Roboter- und Hintergrundmodells erläutert.

Das Grundkonzept sowie einzelne Bestandteile der 3D-Kamera basierten Arbeitsraumüberwachung und -interpretation eines seriellen Industrieroboters zur Mensch-Roboter-Kooperation wurden bereits in [P3] [P4] [P5] veröffentlicht. Teilbereiche der Hintergrundmodellierung, Objekterkennung, der Schnittstellenspezifikation sowie Versuchsreihen wurden im Rahmen von [S1] sowie Implementierungen zur Segmentierung des Roboters aus den Kamerabildern und Messaufnahmen zur Kamerakalibrierung in [S2] umgesetzt.

4.1 Notwendige Grundlagen zur Realisierung der Umgebungswahrnehmung und -modellierung

Dieses Teilkapitel stellt die notwendigen Grundlagen der Umgebungserfassung und Objektdetektion des Assistenzsystems dar. Hierbei werden allgemeingültige Prinzipien für den Anwendungsfall der Sechsachs-Knickarmroboter RV30-16 von Reis und TX60L von Stäubli konkretisiert und angepasst.

4.1.1 Kommunikationsschnittstelle zur Robotersteuerung

Aus softwaretechnischer Sicht besitzt das konzipierte Roboter-Assistenzsystem mit seinen verschiedenen Funktionalitäten die Form einer verteilten Architektur, dessen einzelne Subsysteme mit der Robotersteuerung in einem Netzwerk verbunden sind. Derzeit besitzen gängige Industrieroboter keine einheitlich nutzbaren Schnittstellen, um Informationen mit externen Anwendungen teilen und Roboterbefehle von außen vorgeben zu können. Obwohl viele Hersteller beispielsweise eine Ethernet basierte Netzwerkkommunikation unterstützen, variieren der Umfang und die Art des Datenaustausches sowie die notwendige externe und roboterseitige Programmanbindung auf Grund proprietärer Roboterprogrammiersprachen und -steuerungsumfänge. Bei Reis-Robotern können Daten wie Systemvariablen über eine spezielle XML-Kommunikationsschnittstelle vom Web-Server der ROBOTstarV (RSV)-Steuerung abgefragt [233] und Steuerbefehle über den sogenannten externen Verfahrmodus von außen vorgegeben werden [234]. Auch Stäubli-Roboter verfügen über die Möglichkeit, Informationen mit externen Client-Anwendungen im Netzwerk auszutauschen. Zur geeigneten Dateninterpretation ist jeweils ein Roboterprogramm in der gleichnamigen Programmiersprache RSV bei Reis-Robotern bzw. in VAL3 (Victor's Assembly Language) bei Stäubli-Robotern zu erstellen [235] [236].

Die Arbeitsraumüberwachung benötigt die aktuellen Roboterachswerte fortlaufend im Verarbeitungstakt, um das hinterlegte Robotermodell aktualisieren und darauf basierend die Sensordaten interpretieren zu können. Da beide verwendeten Testroboter eine hierfür geeignete Ethernetschnittstelle besitzen, wird diese zur softwaretechnischen Anbindung des Assistenzsystems in Form einer Client-Server-Struktur über Sockets genutzt, wobei das Assistenzsystem den Client und die jeweilige Robotersteuerung den Server repräsentieren. Durch die Verwendung von Sockets ergibt sich der Vorteil der Unabhängigkeit hinsichtlich des eingesetzten Betriebssystems und der gewählten Programmiersprache, da alle gängigen Betriebssysteme eine entsprechende Programmierschnittstelle (engl. "Application Programming Interface", API) bereitstellen [237]. Als Übertragungsprotokoll findet das dem Internetprotokoll (IP) zur eindeutigen Rechneradressierung mittels IP-Adressen übergeordnete, verbindungsorientierte TCP (Transmission Control Protocol) Verwendung. Dieses bietet gegenüber dem verbindungslosen UDP (User Datagram Protocol) eine zuverlässigere, wenn auch langsamere Datenübertragung [237]. Neben der IP-Adresse des Zielrechners wird bei der Definition eines Sockets eine Portnummer zur Identifizierung der Zielanwendung bzw. des zu nutzenden Services angegeben [237] [238].

Eine beispielhafte Abfrage der aktuellen Positionswerte durch die Arbeitsraumüberwachung über die XML-Kommunikationsschnittstelle bei Reis-Robotern zeigt Bild 12.

```
<RSVCMD>
<clientStamp>user</clientStamp>
<symbolApi>
<readSymbolValue>
</readSymbolValue>
</readSymbolValue>
</readSymbolValue>
</RSVCMD>
```

Bild 12: Beispielhafte Abfrage der aktuellen Positionswerte über die XML-Kommunikationsschnittstelle von Reis-Robotern Der dargestellte XML-Code wird als String über eine bestehende TCP-Socketverbindung an die Robotersteuerung gesendet. Durch den XML-Tag *<readSymbolValue>* werden die in der Systemvariablen *_PACTISTPOS* gespeicherten, aktuellen Istwerte angefordert. Ein Antwortstring der Reis-Robotersteuerung auf die Positionsabfrage enthält u. a. die aktuellen Achswerte, die kartesischen Positionswerte des Tools bzw. Werkzeugs sowie die Transformation zwischen Flansch- und Toolkoordinatensystem des Roboters.

4.1.2 Kinematische und geometrische Modellierung der eingesetzten Industrieroboter

Um bei der Interpretation des Roboterarbeitsraums diejenigen Pixel, welche zum überwachten Industrieroboter gehören, identifizieren zu können, wird neben den aktuellen Positionswerten ein geeignetes Modell des Roboters benötigt. Zum Verständnis wird zunächst die kinematische Beschreibung anhand bekannter Verfahren erläutert und darauf aufbauend eine geometrische Modellierung durch Hüllkörper erarbeitet. Die in diesem Teilkapitel dargestellten Grundlagen werden im Rahmen der Kollisions- und Abstandsprüfung zur autonomen Bahngenerierung und Kollisionsvermeidung erneut aufgegriffen.

Kinematische Modellierung der Industrieroboter

Zur kinematischen Beschreibung eines seriellen Industrieroboters werden die einzelnen Roboterarmelemente mit fest verankerten, rechtshändigen kartesischen Koordinatensystemen versehen. Ihre Lage und Orientierung im Raum wird durch eine Transformationsbeziehung zum jeweils kinematisch vorgelagerten Koordinatensystem beschrieben, wofür drei Translations- und drei Rotationsangaben benötigt werden. Eine Transformation zwischen einem Koordinatensystems K_i ($i \in \mathbb{N}_0^+$) und dem diesen kinematisch vorgelagerten Koordinatensystem K_{i-1} ergibt sich somit auf der Basis von sechs Werten. Mathematisch lässt sich diese auch durch eine homogene 4 × 4-Matrix, die **Transformationsmatrix** $_{i-1}^{i}T$, beschreiben, um den Vorteil einer einfachen Berechnung aller Gelenkkoordinatensysteme durch Matrixmultiplikation nutzen zu können. Wie Gleichung (4.1) zeigt enthält $_{i-1}^{i}T$ die drei Spaltenvektoren $\vec{x}_i^{(i-1)}$, $\vec{y}_i^{(i-1)}$ und $\vec{z}_i^{(i-1)}$, welche die Basisvektoren des Koordinatensystems K_i zur Definition der Orientierung des Koordinatensystems K_i und somit eine 3 × 3-Rotationsmatrix darstellen, sowie den Spaltenvektor $\vec{t}_{i-1,i}^{(i-1)}$ zur Lagedefinition des Koordinatensystems Ki als Ortsvektor zwischen den Koordinatenursprüngen von K_{i-1} und K_i . Der hochgestellte Index (i - 1) bezeichnet hierbei die Angabe der Vektoren in Koordinaten von K_{i-1} . [235]

Anstatt sechs Transformationsangaben zur Spezifikation des jeweils nachfolgenden Koordinatensystems zu verwenden, erfolgt die kinematische Beschreibung von Industrierobotern oft anhand von lediglich vier Werten, den sogenannten **Denavit-Hartenberg-Parametern (DH-Parametern)**. Durch zusätzliche Randbedingungen wird die Transformation trotz des Wegfalls jeweils einer Positions- und Orientierungsangabe eindeutig. Es gibt verschiedene Ausprägungen der ursprünglichen, in [239] veröffentlichten DH-Notation [240]. Erläuterungen zu gültigen Festlegungen der Koordinatensysteme nach Denavit und Hartenberg finden sich z. B. in [235] [240] [241]. Bild 13 zeigt, wie die vier DH-Parameter θ_i , d_i , a_i und α_i zur Definition eines Koordinatensystems K_i auf Basis von K_{i-1} nach [235] verwendet werden können, wobei d_i und a_i Längen- und θ_i und α_i Winkelangaben darstellen. Hierbei bezeichnen der Winkel θ_i um die Achse z_{i-1} die Drehung, welche die Achse x_i die Drehung der Achse z_{i-1} nach z_i .



Bild 13: DH-Parameter zur Definition des Koordinatensystems K_i auf Basis des kinematisch vorgelagerten Koordinatensystems K_{i-1}

Besitzt ein serieller Roboter lediglich Gelenke mit einem Freiheitsgrad, sind drei der vier DH-Parameter fest. Die veränderliche, generische Gelenkvariable besteht aus einem Rotationswinkel θ_i oder einem Translationsparameter a_i , die einen Winkel- oder Lageoffset zur korrekten Darstellung der Koordinatensysteme in der Nulllage beinhalten kann. Für den Fall des in dieser Arbeit betrachteten Sechsachs-Knickarmroboters mit ausschließlich rotatorischen Gelenken ergibt sich die Transformationsmatrix $_{i-1}^{i}T$ zur Definition der Koordinatensysteme K_i auf Basis der in der kinematischen Kette jeweils vorgelagerten Koordinatensysteme K_{i-1} zu

$$_{i-1}^{i}T = \begin{bmatrix} \vec{x}_{i}^{(i-1)} & \vec{y}_{i}^{(i-1)} & \vec{z}_{i}^{(i-1)} & \vec{t}_{i-1,i}^{(i-1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4.1)

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[235] mit der veränderlichen Gelenkvariable θ_i und den drei festen DH-Parametern d_i , a_i und α_i . Mit Angabe der DH-Parameter aller sechs Rotationsgelenke eines speziellen Roboters kann die **direkte Kinematik** bzw. **Vorwärtskinematik** durch Anwendung der Kettenmultiplikation aller sieben Transformationsmatrizen $_{i-1}^{i}T$ mit i = 1, ..., 7 in Abhängigkeit des Gelenkwinkelvektors $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)^T$ beschrieben werden durch

[235], wobei ${}_{6}^{7}T = {}_{6}^{W}T$ der festen, von θ unabhängigen Transformation zwischen dem Werkzeug- (bzw. Tool-) Koordinatensystem $K_W = K_7$ und dem Flanschkoordinatensystem K_6 entspricht. Durch Abbildung der Achswinkel aus dem Konfigurations- bzw. Gelenkwinkelraum in den kartesischen Raum wird die Pose des Werkzeugkoordinatensystems K_W im festen Roboterbasiskoordinatensystem K_0 dargestellt.

Auf Grund der weiten Verbreitung wird zur kinematischen Beschreibung der eingesetzten Industrieroboter im Folgenden ebenfalls die DH-Notation verwendet. Tabelle 5 listet gültige DH-Parameter des Reis-Roboters RV30-16 und des Stäubli-Roboters TX60L auf.

	Reis RV30-16			Stäubli TX6oL				
	θ_{i}	d _i	a _i	α_i	$\boldsymbol{\theta}_{i}$	d _i	a_i	α_i
Achse 1	$\theta_1 + 0$	0	320	$-\pi/2$	$\theta_1 + \pi$	0	0	π/2
Achse 2	$\theta_2 + 0$	0	800	0	$\theta_2 + \pi/2$	20	400	0
Achse 3	$\theta_3 + \pi/2$	0	0	π/2	$\theta_3 + \pi/2$	0	0	π/2
Achse 4	$\theta_4 - \pi/2$	980	0	π/2	$\theta_4 + \pi$	450	0	π/2
Achse 5	$\theta_5 + \pi$	0	0	π/2	$\theta_5 + \pi$	0	0	π/2
Achse 6	$\theta_6 - \pi/2$	100	0	0	$\theta_6 + 0$	70	0	0

Tabelle 5: DH-Parameter der Roboter Reis RV30-16 und Stäubli TX60L mit Längenangaben in mm und Winkelangaben in rad

Hierbei wird im Fall des RV30-16 auf die vom Hersteller bereitgestellten Werte zurückgegriffen. Da diese beim Stäubli-Roboter nicht zur Verfügung stehen, werden gültige Parameter auf Grundlage der technischen Zeichnung des zugehörigen Datenblatts gemäß der in [235] beschriebenen Konvention abgeleitet. Zu beachten ist hierbei, dass zur Angabe der Achswinkel θ_i in den Transformationsmatrizen $_{i-1}^{i}T(\theta_i)$ für i = 1, ..., 6 der Gleichungen (4.1) und (4.2) zusätzlich die Achsoffsets der DH-Parameter aus Tabelle 5 zu den aktuellen in der Robotersteuerung angegebenen Werten hinzuzuaddieren sind. Aus den DH-Parametern ergeben sich für eine vorgegebene Achswinkelstellung jeweils die Lage und Orientierung aller Gelenkkoordinatensysteme K_i mit i = 1, ..., 6 der beiden Roboter. Bild 14 und Bild 15 zeigen die Gelenkkoordinatensysteme zur besseren Anschaulichkeit nicht für die jeweilige Nullstellung, in der $\theta_i = 0$ für i = 1, ..., 6 gemäß der Robotersteuerung gilt, sondern abweichend für den Reis-Roboter mit $\theta_2 = -\frac{\pi}{2}$ und $\theta_3 = \frac{\pi}{2}$ sowie $\theta_{1,4,5,6} = 0$ und für den Stäubli-Roboter mit $\theta_3 = \frac{\pi}{2}$ und $\theta_{1,2,4,5,6} = 0$.



Bild 14: Aus den DH-Parametern abgeleitete Gelenkkoordinatensysteme des Reis-Roboters RV30-16 mit $\theta_{1,4,5,6} = 0$, $\theta_2 = -\frac{\pi}{2}$ und $\theta_3 = \frac{\pi}{2}$

Zur Angabe der Pose des Werkzeug- oder des Flanschkoordinatensystems $K_W = K_7$ bzw. K_6 in Bezug zum Roboterbasiskoordinatensystem K_0 wird von den großen Industrieroboterherstellern neben kartesischen Positionsangaben auf Grund der höheren Anschaulichkeit meist auf Eulerwinkel zurückge-

griffen. Bei beiden gewählten Robotern erfolgt die Orientierungsdarstellung über Eulerwinkel um mitbewegte Koordinatenachsen, jedoch mittels unterschiedlicher Konventionen. Während bei Reis- sowie Kuka-Robotern die sogenannte zy'x''-Konvention Verwendung findet, gilt bei Stäubli-Robotern der Steuerungsversion CS8 die xy'z''-Konvention. Dies bedeutet im Fall eines Reis-Roboters, dass der erste Eulerwinkel eine Drehung um die z-Achse, der zweite Eulerwinkel eine Drehung um die hierdurch neu entstehende y-Achse und die dritte Winkelangabe eine Rotation um die sich wiederum neuergebende x-Achse des Bezugskoordinatensystems beschreiben.



Bild 15: Aus den DH-Parametern abgeleitete Gelenkkoordinatensysteme des Stäubli-Roboters TX6oL mit $\theta_{1,2,4,5,6} = 0$ und $\theta_3 = \frac{\pi}{2}$

Bei Stäubli-Robotern wird die Rotationsreihenfolge zur Orientierungsfestlegung vertauscht. Hier erfolgt zunächst eine Drehung um die *x*-Achse, anschließend um die mitbewegte und somit neu entstehende *y*-Achse und zuletzt um die zweifach gedrehte *z*-Achse des Bezugskoordinatensystems. Entsprechend ergeben sich die Rotationsmatrizen als linke, obere 3×3 -Matrizen der Transformationsmatrizen ${}_{0}^{6}T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$, welche zur Angabe des Flanschkoordinatensystems in Basiskoordinaten dienen, in Abhängigkeit der drei Elementardrehungen auf Basis der Eulerwinkel α , β , γ für die zy'x"-Konvention mit den Abkürzungen c $\varphi = \cos \varphi$ und s $\varphi = \sin \varphi$ zu [241]

$$R_{zy'x''}(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$
(4.3)

und für die *xy*'*z*"-Konvention zu [241]

$$R_{xy'z''}(\alpha,\beta,\gamma) = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ s\alpha s\beta c\gamma + c\alpha s\gamma & -s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & -s\alpha c\beta \\ -c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma + s\alpha c\gamma & c\alpha c\beta \end{bmatrix}.$$
 (4.4)

Geometrische Modellierung der Industrieroboter

Auf Basis des mittels DH-Parametern definierten kinematischen Robotermodells und den von der Robotersteuerung abfragbaren Achswerten ist die aktuelle Roboterstellung zur Laufzeit der Arbeitsraumüberwachung jederzeit bekannt. Um nun aus den Sensordaten Umgebungsbereiche vom eigentlichen Roboter unterscheiden zu können, ist zudem eine geeignete geometrische Beschreibung notwendig. Grundsätzlich stehen unterschiedliche Verfahren zur Modellierung dreidimensionaler Körper bereit. Eine in der Computergrafik häufig eingesetzte Möglichkeit ist die Modellierung der Oberfläche durch Netze ebener Polygone, z. B. in Form von Dreiecken oder Vierecken [242]. Auch räumlich gekrümmte und durch wenige Parameter beschreibbare Polygone können zur Oberflächenmodellierung verwendet werden [242]. Eine andere Möglichkeit ist die Volumendarstellung beispielsweise durch eine Raumbelegungskarte mittels Voxeln oder Constructive Solid Geometry (CSG, konstruktive Körpergeometrie), bei der dreidimensionale Objekte aus einfachen Körpern zusammengesetzt werden [242].

Da für die beiden Testroboter CAD-Daten bereitstehen, ist es prinzipiell denkbar, diese durch eine geeignete Kinematisierung, d. h. Aufteilung der einzelnen Teilgeometrien auf die einzelnen Gelenkkoordinatensysteme, direkt als Geometriemodelle heranzuziehen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine detaillierte Darstellung immer einen damit verbundenen hohen Speicher- sowie Laufzeitbedarf zur Aktualisierung der bewegten Roboter nach sich zieht. Im Fall der sensorischen Arbeitsraumüberwachung ist zudem die zusätzliche Projektion der Geometriedaten ins Sensorkoordinatensystem sowie bei der autonomen Bahnplanung und Kollisionsvermeidung die in ihrer Komplexität von der gewählten Geometriedarstellung abhängigen Abstandsund Überlappungstests zu berücksichtigen. Auch ist die Verwendung der exakten Geometriedaten alleine in der Praxis meist nicht ausreichend, um im Rahmen der Umgebungserfassung den Roboter von Hindernissen zu unterscheiden. In vielen Anwendungen sind beispielsweise flexible Zuleitungen auf dem eigentlichen Roboterkörper angebracht, die nicht in den CAD-Daten enthalten sind und deren genaue Lage auf Grund ihrer Beweglichkeit nur schwer digital abbildbar ist. In dieser Arbeit wird deshalb zur Robotermodellierung auf einfache geometrische Primitive zurückgegriffen, welche die eigentliche Geometrie komplett umschließen und deren Abmaße in Abhängigkeit des konkreten Anwendungsfalls, z. B. bei der Installation von Medienkanälen auf dem Roboter, zusätzlich angepasst werden können. Durch Verwendung dieser sogenannten **Hüllkörper** (engl. "Bounding Volumes", BVs) können einerseits der Speicherbedarf und die Laufzeit zur Aktualisierung der modellierten Roboterarmteile möglichst gering gehalten sowie andererseits weitere, hiervon beeinflusste Berechnungen vereinfacht und beschleunigt werden. Prinzipiell in Frage kommende, häufig verwendete dreidimensionale Hüllkörper sind in Bild 16 aufgeführt.



Bild 16: Übersicht häufig verwendeter Bounding Volumes (BVs) unter Nutzung von [243]

Einer der meist genutzten und am einfachsten aufgebaute Hüllkörpertyp ist die Hüllkugel bzw. Bounding Sphere, da hierbei nur der Mittelpunkt und der Radius gespeichert werden und zur Aktualisierung lediglich die Position des Mittelpunkts neu zu berechnen ist. Größter Nachteil ist, dass viele Objektgeometrien auf Basis lediglich einer Hüllkugel schlecht umschlossen werden und dadurch beispielsweise bei Kollisionsprüfungen falsche Positivtests resultieren können. Ein weiterer häufig verwendeter Hüllkörper ist die Axis-Aligned Bounding Box (AABB), die einen an den Koordinatenachsen des Bezugssystems ausgerichteten Quader darstellt. Zur Lagebeschreibung im Dreidimensionalen sind im Gegensatz zur Kugel sechs anstatt von vier Werten notwendig, beispielsweise durch Angabe eines Mittelpunkts und von drei Halblängen entlang der drei Achsrichtungen. Die Umhüllung der Objektkontur ist ebenfalls oft nur ungenau realisierbar. Ein großer Vorteil von AABBs liegt in ihren einfachen und dadurch schnellen Kollisionstests. Zudem ist auf Grund der immer parallelen Ausrichtung der Quaderflächen zu den Achsen des Bezugskoordinatensystems, abhängig von der gewählten Repräsentationsform, im besten Fall lediglich der Mittelpunkt neu zu berechnen. Bei den beliebig orientierten Hüllquadern, den Oriented-Bounding Boxes (OBBs), kann eine Objektgeometrie passgenauer umschlossen werden, jedoch steigen der Aufwand zur Speicherung, Aktualisierung und Kollisionsprüfung. Zur Definition von OBBs eignen sich beispielsweise ein Mittelpunkt, drei Einheitsvektoren zur Orientierungsbeschreibung eines lokalen Koordinatensystems sowie drei Halblängen zur Angabe der Ausdehnung. Sphereswept Volumes (SSVs) ergeben sich durch die Bewegung einer Kugel entlang einer anderen einfachen Grundform, sodass auf deren Kollisionsprüfung unter Berücksichtigung der Kugelradien zurückgegriffen werden kann. Beispiele für diese Hüllkörperart sind Sphere-swept Lines (SSLs), auch Kapseln genannt, oder Sphere-swept Rectangles (SSRs), welche durch das Überstreichen eines Liniensegments bzw. eines Rechtecks mit einer Kugel entstehen. Eine weitere Möglichkeit stellen Discrete-orientation Polytopes (k-DOPs) als eine Ausprägung von sogenannten Halfspace Intersection Volumes, bei denen der Raum mittels mehrerer sich schneidender Ebenen begrenzt wird, dar. Ein diskret orientiertes Polytop (k-DOP) besteht aus k festen Achsrichtungen zur Begrenzung der Objektgeometrie. Beispielsweise kann eine AABB auch als ein 6-DOP mit sechs Achsrichtungen, die sich jeweils aus den drei positiven und negativen Raumrichtungen des Bezugssystems ergeben, angesehen werden. Je höher die Anzahl der festen Begrenzungsebenen gewählt wird, desto besser kann ein Körper mittels k-DOPs umschlossen werden. Allerdings steigt auch der Aufwand zur Neuberechnung bei bewegten Objekten. [243] [244]

Auf Grund ihrer schnellen Aktualisierbarkeit und der einfachen Projektion ins Sensorkoordinatensystem wird die Hüllkörpermodellierung im Rahmen der Arbeitsraumüberwachung durch mehrere Bounding Spheres realisiert. Bild 17 zeigt die für die Testroboter Reis RV30-16 und Stäubli TX60L gewählte Umhüllung, wobei ein angeflanschtes Werkzeug sowie mögliche Zusatzinstallationen auf dem Roboter durch vergrößerte Hüllkugeln im Vergleich zu den auf Basis der CAD-Daten notwendigen Abmaßen bereits berücksichtigt werden. Durch weitere Bounding Spheres oder die Anpassung vorhandener Kugeln kann auf eine veränderte Robotergeometrie flexibel reagiert werden, ohne dass nennenswerte Laufzeitunterschiede auftreten.



Bild 17: Hüllkörpermodellierung der Arbeitsraumüberwachung für die Testroboter Reis RV30-16 (links) und Stäubli TX60L (rechts) durch Bounding Spheres

4.1.3 Einsatz der ToF-Kameratechnologie zur Generierung von Tiefeninformationen der Szene

Der Einsatz eines inhärent nicht sicheren Standardindustrieroboters ohne trennende Schutzeinrichtungen in der Nähe des Menschen erfordert eine geeignete sensorische Umgebungserfassung, um Personen sowie andere Objekte sicher detektieren und damit im drohenden Kollisionsfall angepasst reagieren und Hindernisse umfahren zu können. Um den Betrieb möglichst effektiv und ohne zusätzlichen Installationsaufwand zu gestalten, kommen lediglich berührungs- und markerlos arbeitende Sensorverfahren in Betracht. Zur Erstellung eines räumlichen Szenenmodells mit semantischen Inhalten eignen sich vor allem optische Verfahren, die für nahe bis mittlere Entfernungen in ausreichender Auflösung Abstandsinformationen im Roboterarbeitsraum generieren. Prinzipiell ist der Einsatz zusätzlicher Distanzsensoren, beispielsweise auf Basis von Ultraschall- oder Mikrowellen, denkbar. Auf Grund schlechter Winkelauflösung ist eine detaillierte Umgebungsabbildung auf Basis allein nichtoptischer Sensorprinzipien kaum möglich [245]. Flächenkameras, die ein Grauwert- bzw. Farbbild der betrachteten Szene erstellen, eignen sich gut zur Szeneninterpretation für viele Anwendungsfälle. Mangels fehlender Tiefeninformationen ist die Objekterkennung und Segmentierung des Hintergrunds jedoch gerade bei dynamischen Umgebungen und sich verändernden Lichtverhältnissen erschwert und fehlerbehaftet. Speziell zur Personendetektion, jedoch nicht zur Erkennung aller Hindernisse, ist auch der Einsatz von Wärmebildkameras denkbar.

Es existiert eine Reihe optischer Verfahren zur Berechnung punkt-, linienförmiger oder flächiger Entfernungsinformationen für unterschiedliche Distanzbereiche der Umgebung. Zur Generierung flächenhafter Tiefeninformationen für nahe bis mittlere Entfernungen des Zentimeter- bis Meterbereichs, wie sie zur Überwachung und Interpretation des Roboterarbeitsraums benötigt werden, eignen sich vor allem die Triangulation und die Laufzeitmessung (engl. "Time-of-Flight", ToF). Eine Einordnung der wichtigsten Verfahren dieses Anwendungsbereichs zeigt Bild 18. Der Einsatz der Interferometrie, die als eigenständiges Verfahren oder als Unterkategorie der Laufzeitmessung mittels Phasenverschiebung angesehen werden kann, beschränkt sich mit Ausnahme der Mehrwellenlängen-Interferometrie auf Grund der Ausnutzung der Wellenlängen des Lichts auf Distanzen von wenigen Zentimetern [245] [246] [247]. Anwendungsgebiet von Schattierungs- (engl. "Shape from Shading") oder Fokussierungsverfahren (engl. "Shape from Focus"), die als spezielle Ausprägungen der Triangulation zugeordnet werden können [248], ist ebenfalls nur der Nahbereich [246] [249].

Optische Verfahren zur flächigen Entfernungsmessung für nahe bis mittlere Bereiche						
Triangulation					Laufzeitmessung (engl. "Time-of-Flight", ToF) mittels Puls/ Phase	
Aktive Triangulation/ Projektion			Passive	Triangulation	Laserscanning/ LIDAR	PMD- Verfahren
Strukturiertes/ Codiertes Licht	Lichtschnitt- verfahren	Laser- scanning	Stereo- sehen	Monokulares Stereosehen (engl. "Structure from Motion")		

Bild 18: Die wichtigsten optischen Verfahren zur flächigen Generierung von Tiefeninformationen des nahen bis mittleren Entfernungsbereichs (cm bis m) unter Nutzung von [250] [251] [252] [253] [254]

Bei der Triangulation wird zwischen aktiven Ansätzen, bei denen die Szene mit einem bekannten Lichtsignal beleuchtet wird, und passiver Triangulation, bei der das vorhandene Umgebungslicht unter Ausnutzung des stereoskopischen Prinzips durch mindestens zwei unterschiedliche, bekannte Aufnahmepunkte registriert wird, unterschieden. Die häufig eingesetzten Stereokameras eignen sich vor allem für eine genaue Erfassung bekannter Szenen. Schwer zu detektieren sind Objekte mit schwacher Textur, da korrespondierende Bildpunkte aus beiden Aufnahmeperspektiven kaum zuordenbar sind und somit Fehlstellen im Tiefenbild auftreten können. Weitere Nachteile stellen die Verarbeitungszeit sowie die Notwendigkeit geeigneter Beleuchtungsbedingungen dar [245]. Das Prinzip der passiven Triangulation wird ebenfalls beim monokularen Stereosehen (engl. "Structure from Motion") bei Verwendung nur einer, jedoch bewegten Kamera umgesetzt [246]. Beim Lichtschnittverfahren als einem Vertreter der aktiven Triangulation wird sequentiell eine Lichtebene in den zu erfassenden Umgebungsbereich projiziert und die Schnittlinie mit Objektoberflächen abgetastet [246] [250]. Als Weiterentwicklung dieses Verfahrens, welches sich nur zur Entfernungsmessung für einfache geometrische Formen eignet, wird beim Einsatz von strukturiertem bzw. codiertem Licht oder der strukturierten Beleuchtung ein codiertes Strukturmuster verwendet [246] [250] [251]. Ein Beispiel ist die Streifenlichtprojektion unter Nutzung eines zeitlich codierten Gray-Codes [246]. Eine Tiefenkamera, die auf dem strukturierten Lichtansatz basiert, ist die Microsoft Kinect der ersten Generation (Kinect für die Xbox 360) auf Basis eines Chips von Primesense [251]. Hierbei werden anders als bei sequentiell arbeitenden Scanverfahren gleichzeitig Tiefeninformationen für alle Pixel der Kameramatrix mit Videobildraten von 30 Hz generiert. Ein räumlich codiertes Infrarotmuster wird in die Szene projiziert und die zu einem bekannten Referenzmuster auftretenden Unterschiede der Disparität - die zum Tiefenwert eines Objektpunktes invers proportionale Abweichung der horizontalen Pixelkoordinaten - im detektierten Kamerabild hinzugerechnet [251]. Das Korrespondenzproblem, d. h. das Auffinden der korrespondierenden Bildpunkte in projizierter und aufgenommener Pixelmatrix, wird durch das Ermitteln von Kovarianzmaxima gelöst [251].

Mit der Laufzeit- bzw. Flugzeitmessung können flächige Abstandsinformationen auf Basis der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts nach der Reflexion an Umgebungsobjekten durch die direkte Messung der Laufzeit eines emittierten Lichtimpulses oder indirekt über die Phasenverschiebung eines (beispielsweise frequenz- oder amplituden-) modulierten Signals ermittelt werden [255]. Zur Generierung von Abstandsinformation in der Ebene bzw. im Raum eignen sich 2D- bzw. 3D-Laserscanner, welche die Umgebung mittels eines Lasersignals auf Basis der Lichtlaufzeit oder der Triangulation abtasten. LIDAR (Light Detection and Ranging)-Systeme nutzen hierbei das vom RADAR (Radio Detection and Ranging) bekannte Funktionsprinzip der Laufzeitmessung und können hohe Reichweiten abdecken [251] [252] [256]. Es gibt 2D-Laserscanner mit vom Hersteller angegebenem Performance Level, die direkt als sensitive Schutzeinrichtungen in sicherheitsrelevante Anwendungen der Robotik integriert werden können. Hochgenaue 3D-Laserscanner dienen zur Generierung detaillierter Abbilder der Umgebung, arbeiten in der Regel jedoch im Vergleich zu Tiefenkameras oder 2D-Lasersystemen relativ langsam und weisen hohe Anschaffungskosten auf. Letzteres galt im Besonderen für einen neuartigen 3D-Laserscanner der Firma Velodyne, der zur Generierung dichter Punktewolken mit hohen Taktraten für das autonome Fahren entwickelt und 2005 bei der zweiten DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) Grand Challenge eingesetzt wurde [257] [258]. Die Preise für derartige, leistungsfähige und kompakte 3D-LIDAR-Systeme sollen nach [258] zukünftig jedoch weiter stark sinken und können eine interessante Einsatzoption darstellen.

Seit Mitte der 90er Jahre existieren Realisierungen des ToF- oder PMD (Photonenmischdetektor, engl. "Photonic Mixer/ Mixing Device")-Kamera**prinzips** in Form sogenannter Lock-in-Pixel bzw. Photonic Mixing Devices [259], bei denen wie allgemein bei Tiefenkameras ohne sequentielles Abtasten der Umgebung für jedes Bildelement der Sensormatrix ein Entfernungswert mit hohen Wiederholraten berechnet werden kann. Auf Grund der simultanen Beleuchtung der ganzen Szene mit einem Signal findet sich in der Literatur beim Einsatz von Laserlichtquellen auch der Begriff der **Flash LIDAR**-Systeme [253] [254]. Nachteilig ist die im Vergleich zu Laserscannern oder Stereokameras geringere, jedoch für den vorliegenden Einsatzfall ausreichend hohe laterale Auflösung. Auf Basis des ToF-Prinzips wird die Tiefeninformation der Szene über die Laufzeit eines an der Umgebung reflektierten Lichtsignals ermittelt. Eine mögliche Ausprägung stellt die direkte Messung der Pulslaufzeit dar. Die meisten bekannten ToF-Kameras basieren jedoch auf dem in Bild 19 skizzierten Prinzip der indirekten Laufzeitmessung durch Ermittlung der Phasenverschiebung eines intensitätsmodulierten Signals [251].



Bild 19: PMD-Funktionsprinzip der indirekten Laufzeitmessung durch Ermittlung der Phasenverschiebung in Anlehnung an [260] [261]

Hierbei wird ein in der Regel inkohärentes Lichtsignal aus dem Infrarotbereich, dessen Intensität mit der Frequenz f_{mod} (Modulationskreisfrequenz $\omega_{mod} = 2\pi f_{mod}$) moduliert ist, ausgesendet [260] [262]:

$$g(t) = \cos(\omega_{mod}t) \tag{4.5}$$

Ein in Frequenz und Amplitude übereinstimmendes, jedoch mit einer zusätzlichen bekannten Phasenverschiebung $\psi_k = \omega_{mod} \tau_k$ (mit $\psi_k = k \cdot \frac{\pi}{2}$ für k = 0, ..., 3) versehenes, elektrisches Referenzsignal [262]

$$g(t+\tau) = \cos(\omega_{mod}t + \omega_{mod}\tau)$$
(4.6)

wird mit dem an Umgebungsobjekten reflektierten und von jedem Pixel detektierten Signal

$$s(t) = 1 + B\cos(\omega_{mod}t - \varphi)$$
(4.7)

korreliert [247]. Das Signal s(t) weist eine zum ursprünglichen Signal g(t) veränderte Amplitude B und eine laufzeitbedingte, um φ verschobene Phasenlage auf. Die Korrelationsfunktion zwischen reflektiertem optischen Signal und dem elektrischen Referenzsignal ergibt somit [247] [262]:

$$c(\tau) = s \otimes g = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cdot g(t+\tau) dt = \frac{B}{2} \cos(\omega_{mod}\tau + \varphi)$$
(4.8)

Auf Grund der Überlagerung mit dem Hintergrundlicht ist bei den real gemessenen Werten $C(\tau)$ ein zusätzlicher Offsetfaktor *I* zu berücksichtigen [247]:

$$C(\tau) = I + c(\tau) = I + \frac{B}{2}\cos(\omega_{mod}\tau + \varphi)$$
(4.9)

Durch das sogenannte Phasenschiebeverfahren wird mittels vier, um jeweils $\pi/2$ verschobene Phasenpunkte einer Periodendauer $K_k = C(\tau_k)$ mit $\tau_k = k \cdot \frac{\pi}{2}$, k = 0, ..., 3 die Korrelationsfunktion $C(\tau)$ abgetastet, wie Bild 20 zeigt [263] [262].



Bild 20: Abtastung der Korrelationsfunktion $C(\tau)$ durch das Phasenschiebeverfahren beim Photonenmischdetektor in Anlehnung an [263]

Die Darstellung der Korrelationsfunktion $C(\tau) = I + \frac{B}{2}\cos(\omega_{mod}\tau + \varphi)$ durch die komplexe Zahl $C_c(\tau) = I + \frac{B}{2}e^{i(\omega_{mod}\tau + \varphi)}$ im Zeigerdiagramm, wobei $C(\tau)$ dem Realteil von $C_c(\tau)$ entspricht, veranschaulicht den Zusammenhang zwischen den vier abgetasteten Phasenpunkten $K_k = C(\tau_k)$ und dem Phasenwinkel φ (siehe Bild 21 links für den Fall $\varphi = \frac{\pi}{6}$).

Unter der Annahme eines sinusförmigen Modulationssignals ergibt sich daraufhin die zur Entfernung proportionale Phasenverschiebung φ zwischen reflektiertem Signal s(t) und dem ausgesandten Signal g(t) zu [262]

$$\varphi = \arctan\left(\frac{K_3 - K_1}{K_0 - K_2}\right) \tag{4.10}$$

wie in Bild 21 rechts skizziert. Durch Ausnutzung von $\cos(\varphi) = \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)$ kann der Zähler in Gleichung (4.10) $(K_3 - K_1)$ auch anstelle von Kosinusfunktionen der Winkel $\psi_3 + \varphi$ und $\psi_1 + \varphi$ mittels Sinusfunktionen der beiden Winkel $\psi_0 + \varphi$ und $\psi_2 + \varphi$ berechnet werden, die ebenfalls zur Ermittlung des Nenners aus Gleichung (4.10) $(K_0 - K_2)$ dienen.



Bild 21: Veranschaulichung der Ermittlung des Phasenwinkels φ und der Amplitude A = $\frac{B}{2}$ anhand der abgetasteten Korrelationsfunktion C(τ) im Zeigerdiagramm für den Fall $\varphi = \frac{\pi}{6}$; mit den Abkürzungen s() \triangleq sin() und c() \triangleq cos()

Auf Grund der Beschränkung des Wertebereichs der Arkustangensfunktion auf das Intervall] $-\pi/2$; $\pi/2$ [und somit der begrenzten Auswertung des Winkels φ auf den ersten und vierten Quadranten des Zeigerdiagramms ist zur Interpretation der vollen Wellenlänge von o bis 2π beispielsweise die Funktion arctan2, wie in [260] aufgeführt, durch Berücksichtigung der jeweiligen Vorzeichen von Zähler und Nenner anzuwenden.

Die Objektdistanz *D* ergibt sich für jedes Pixel auf Basis der Phasenverschiebung φ , der gewählten Modulationsfrequenz f_{mod} bzw. der Modulationskreisfrequenz ω_{mod} und der Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ [263]:

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{c \cdot \varphi}{2 \cdot \omega_{mod}} = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi \cdot f_{mod}}$$
(4.11)

Der Eindeutigkeitsbereich der Tiefenkamera beträgt auf Grund der doppelten Berücksichtigung des Signalwegs zum Objekt und wieder zurück die halbe Wellenlänge des Modulationssignals [263]:

$$D_{max} = \frac{\lambda_{mod}}{2} \tag{4.12}$$

Im Fall einer gewählten Modulationsfrequenz f_{mod} von 20 MHz ergibt sich eine Modulationswellenlänge λ_{mod} von 15 m ($c = f \cdot \lambda$) und somit ein Eindeutigkeitsbereich von 7,5 m. Da auch alle größeren Objektentfernungen auf diesen Bereich abgebildet werden, ist dies in entsprechenden Einsatzszenarien zu berücksichtigen. Der Offset bzw. die Intensität *I* ermittelt sich für jedes Pixel aus der Mittelung der vier abgetasteten Werte K_0 bis K_3 und repräsentiert das komplette, aufgenommene Licht und somit den bei herkömmlichen Flächenkameras bekannten Grauwert [263]:

$$I = \frac{K_0 + K_1 + K_2 + K_3}{4} \tag{4.13}$$

Zusätzlich lässt sich für alle Pixel auf Basis der Amplitude *A* des Korrelationssignals die Amplitude *B* des empfangenen Signals *s*(*t*) berechnen, welche die Intensität des ausgesandten und zurückreflektierten Lichts repräsentiert und somit zur Qualitätseinschätzung des Distanzbilds herangezogen werden kann [264]. Mit $A = \frac{B}{2}$ nach Gleichung (4.8) ergibt sich die Amplitude *B* des empfangenen Signals *s*(*t*) zu (siehe auch Bild 21 rechts) [262]:

$$B = 2 \cdot A = 2 \frac{\sqrt{(K_3 - K_1)^2 + (K_0 - K_2)^2}}{2} = \sqrt{(K_3 - K_1)^2 + (K_0 - K_2)^2} \quad (4.14)$$

Als Photonenmischdetektor (PMD) wird ein Halbleiterbauelement bezeichnet, das gleichzeitig die Strahlungsdetektion als auch die zur Korrelation notwendige Signalmischung durchführen kann. Das Mischen erfolgt während der Ladungsträgergeneration, indem die auf Basis des einfallenden Lichts generierten Ladungsträger durch eine zusätzlich angelegte Gegentakt-Modulationsspannung auf jeweils zwei verschiedene Auslesedioden und Integrationskapazitäten verteilt werden. Diese Verteilung der Ladungsträger stellt die Korrelation zwischen dem empfangenen Lichtsignal und dem Referenzsignal dar. Die Gegentakt-Modulationsspannung basiert auf der bekannten Phasenverschiebung des Referenzsignals und wird zur bereits angelegten Vorspannung addiert bzw. subtrahiert und führt damit für jede Messung zu zwei um π verschobene Spannungssignale und ein sich damit zeitlich änderndes Potentialgefälle (bekannte Phasenverschiebung $\psi_k = \omega_{mod} \tau_k$ mit $\psi_k = k \cdot \frac{\pi}{2}$ für k = 0, ..., 3, wobei $\psi_0 = 0$ und $\psi_2 = \pi$ bei der ersten Messung bzw. $\psi_1 = \frac{\pi}{2}$ und $\psi_3 = \frac{3}{2}\pi$ bei der zweiten Messung resultieren). So können durch lediglich zwei sequentielle Kameraaufnahmen, bei denen die Modulationsspannung jeweils eine um $\frac{\pi}{2}$ versetzte Phasenlage aufweist, vier Abtastwerte bzw. zwei Differenzwerte $K_0 - K_2$ sowie $K_3 - K_1$ gemäß Gleichung (4.10) durch einen Vergleich der separierten Ladungsmengen ermittelt werden. [248]

Auf Grund der Fähigkeit von 3D-Kameras, in ausreichender lateraler und Tiefenauflösung und bei hoher Wiederholfrequenz Tiefenbilder der Umgebung bis zu einigen Metern zu generieren, eignen sie sich sehr gut zur Interpretation des Roboterumfelds und werden deshalb für die Umgebungserfassung des Assistenzsystems ausgewählt. Am Markt gibt es eine Reihe von ToF-Kameras, die sich u. a. hinsichtlich der Pixelauflösung, der Reichweite, des Anschaffungspreises und der eingesetzten Beleuchtungsquelle unterscheiden. Eine vergleichende Übersicht verfügbarer 3D-Kameras unterschiedlicher Funktionsprinzipien aus dem Jahr 2014 findet sich in [P6]. Für die vorliegende Arbeitsraumüberwachung wird mit dem CamCube 3.0 von PMD Technologies ein zum Zeitpunkt der Auswahl im Jahr 2010 sehr leistungsfähiges System mit einer vergleichsweise hohen lateralen Auflösung von 200 × 200 Pixeln eingesetzt. Als Beleuchtungseinheit dient ein LED-Array, das Licht im nahen Infrarotbereich mit einer Wellenlänge von 870 nm aussendet [265]. Bild 22 zeigt die vom CamCube 3.0 erstellte Tiefen-, Intensitäts- sowie Amplitudenbilder für eine beispielhafte Szene. In Tabelle 6 sind die wichtigsten Kameraeigenschaften des CamCube 3.0 sowie wesentliche Vor- und Nachteile im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen zusammengefasst. Zwischenzeitlich sind weitere, hinsichtlich der Auflösung teilweise verbesserte, aber deutlich kostengünstigere und kompaktere Systeme erschienen, wie die Kinect-Kamera der zweiten Generation (Kinect für die Xbox One) oder die Intel RealSense-Kamera.

4.1 Notwendige Grundlagen zur Realisierung der Umgebungswahrnehmung und -modellierung



Bild 22: Vom CamCube 3.0 berechnete Tiefen-, Intensitäts- und Amplitudenbilder einer beispielhaften Szene (von links nach rechts) [P4]

Die auf dem ausgewählten Sensor basierenden Entwicklungen können auf vergleichbare Tiefenkameras, die eine Punktewolke der Szene in ähnlicher räumlicher Auflösung und mit genügend hohen Bildraten generieren, grundsätzlich übertragen werden.

Tabelle 6: Spezifikation [265] sowie Vor- und Nachteile der eingesetzten ToF-Kamera "PMD [vision] CamCube 3.0" von PMD Technologies

Spezifikation des "PMD [vision] CamCube 3.0" nach Herstellerangaben					
Standardentfernungsbereich [m]	0,3 - 7	Wiederholgenauigkeit [± mm]	3 (bei 75% Reflektivität)		
Laterale Auflösung (V × H)	200 × 200	Eindeutigkeitsbereich [m]	7,5		
Wiederholungsrate [fps]	bis 40	Modulationsfrequenzen [MHz]	18/19/20/21		
Öffnungswinkel (H/V) [°]	40/40	Aktive Beleuchtung [nm]	870		
Vorteile		Nachteile			
 Tiefen- und Intensitätswert für 4 Videoframerate auf Grund des V wändiger Berechnungen ggü. St Größere Unabhängigkeit von Ut lichtschwankungen durch aktive tung Oualität der Messung für iedes 	alle Pixel Wegfalls auf- ereokameras mgebungs- e Beleuch-	 Springende Pixel, Bewegungsa systematische Messfehler Niedrige Auflösung im Verglet Standard-2D-Kameras Hoher Preis und Prototypenst der Kamera 	irtefakte und ich zu atus		

4.1.4 Kamerakalibrierung

Im Folgenden werden die durchgeführten Kalibrierungsschritte der eingesetzten ToF-Kamera CamCube 3.0 auf Basis der theoretischen Grundlagen dargelegt. Ziel einer Kalibrierung herkömmlicher Flächenkameras, die ein Grauwert- bzw. Farbbild der Umgebung ermitteln, ist es die äußeren (bzw. externen oder extrinsischen) Kameraparameter sowie die internen (bzw. inneren oder intrinsischen) Kameraparameter zu ermitteln. Da Tiefenkameras zusätzlich ein Entfernungsbild berechnen, kann neben einer lateralen eine zusätzliche Kalibrierung der Tiefenwerte vorgenommen werden. Die externen Kameraparameter definieren die Kamerapose im Weltkoordinatensystem und ermöglichen damit die Überführung der Kamerakoordinaten in andere Koordinatensysteme, wie in diesem Fall dem der Roboterbasis.

Kameramodell und laterale Kalibrierung

Die **internen Kameraparameter** dienen zur Abbildung zwischen Kameraund Bild- bzw. Sensorkoordinaten. Ausgangsbasis der Kalibrierung ist das **Lochkameramodell** das mittels einer Zentralprojektion beschrieben werden kann (siehe Bild 23). Unter gewissen Vereinfachungen trifft dies auch auf das Modell der dünnen Linse zu [266]. Hierbei verlaufen alle Strahlen (bzw. beim Modell der dünnen Linse die Zentralstrahlen) durch das Projektionszentrum *O*.



Bild 23: Das auf der Zentralprojektion basierende Modell der Lochkamera in Anlehnung an [267]

Beim Lochkameramodell befindet sich die Bildebene im Abstand der Kamerabrennweite f (bzw. der Kamerakonstante c) vom Projektionszentrum, mit dem das Kamerakoordinatensystem fest verbunden ist. Dessen x- und y-Achsen definieren die optische Hauptebene, die z-Achse bildet die optische Achse. Der Schnittpunkt der optischen Achse mit der Bildebene ergibt den Bildhauptpunkt H, der nicht notwendigerweise mit der Bildmitte übereinstimmen muss. [266] [267] Zu beachten ist, dass wie bei der eingesetztenTiefenkamera, auch linkshändige, kartesische Kamerakoordinatensysteme definiert werden. In diesem Fall würde die *y*-Achse des Kamerakoordinatensystems (y_{Kamera}) in Bild 23 nach unten zeigen. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems kann somit ebenfalls von der skizzierten Darstellung der unteren linken Ecke der Sensormatrix abweichen. Durch die perspektivische Projektion eines Objektpunkts Q(x, y, z) auf den Bildpunkt q(x', y') (in Kamerakoordinaten) werden dessen Koordinaten mit $\frac{f}{z}$ skaliert [267] [268]:

$$x' = -\frac{f}{z}x, \quad y' = -\frac{f}{z}y$$
 (4.15)

Unter der Verwendung homogener Koordinaten q_h und Q_h , die im Vergleich zu q und Q eine zusätzliche Dimension aufweisen, kann die **perspektivische Projektion** auch als Matrixmultiplikation mit einer 3×4 -Projektionsmatrix P geschrieben werden [268]:

$$q_{h} = P Q_{h} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -\frac{z}{f} \end{bmatrix}, \quad \text{mit} \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \text{ und } Q_{h} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$
(4.16)

Die Umrechnung eines Punktes von homogenen Koordinaten in kartesische Koordinaten erfolgt durch Division aller Komponenten durch die letzte Komponente. Um somit aus den homogenen Bildkoordinaten q_h die kartesischen Koordinaten des Bildpunkts q zu erhalten, werden die ersten beiden Komponenten durch die dritte Komponente dividiert [267]:

$$q_h = \begin{bmatrix} x \\ y \\ -\frac{z}{f} \end{bmatrix} \Rightarrow q = \begin{bmatrix} x/\left(-\frac{z}{f}\right) \\ y/\left(-\frac{z}{f}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{z}x \\ -\frac{f}{z}y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$
(4.17)

Zur Vermeidung des negativen Vorzeichens wird häufig die Bildebene im Abstand f vor statt hinter der optischen Hauptebene platziert. Die Matrix Pzur Darstellung der perspektivischen Projektion kann auf Grund der Verwendung homogener Koordinaten ohne Auswirkung auf die sich ergebenden kartesischen Bildkoordinaten leicht modifiziert werden. Somit kann die perspektivische Projektion des Objektpunktes Q auf den Bildpunkt q alternativ zu Gleichung (4.16) auch formuliert werden als [268]:

$$q_h = P Q_h = \begin{bmatrix} fx\\ fy\\ z \end{bmatrix}$$
 und $q = \begin{bmatrix} \frac{f}{z}x\\ \frac{f}{z}y\\ \frac{f}{z}y \end{bmatrix}$, mit $P = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0\\ 0 & f & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ und (4.18)

$$Q_h = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Erfolgt die Angabe der Bildkoordinaten in Pixeln, findet zusätzlich die Pixelgröße, im Fall einer nichtquadratischen Form als Skalierungsfaktor mit unterschiedlichen Ausdehnungen m_x in x- Richtung bzw. m_y in y-Richtung, Verwendung, sodass die Kamerabrennweite f in x- bzw. y-Richtung angegeben werden kann als $\alpha_x = f \cdot m_x$ und $\alpha_y = f \cdot m_y$. Liegt der Ursprung des Bildkoordinatensystems nicht im Bildhauptpunkt H, wie in Bild 23 dargestellt, ist diese Verschiebung in Form der (Pixel-)Koordinaten des Bildhauptpunkts $H(x_0, y_0)$ im Kameramodell zu berücksichtigen [268]. Im seltenen Fall nicht senkrecht zueinander stehender Basisvektoren der Bildebene tritt eine zusätzliche Scherung s zwischen der x- und y-Achse des Bildkoordinatensystems K_{Bild} auf, sodass sich die Abbildung eines Objektpunktes Q auf den Bildpunkt q ergibt zu [268]:

$$q_{h} = \tilde{K} Q_{h}, \text{ mit } \tilde{K} = \begin{bmatrix} \alpha_{x} & s & x_{0} & 0\\ 0 & \alpha_{y} & y_{0} & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} \alpha_{x} & s & x_{0}\\ 0 & \alpha_{y} & y_{0}\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ und } (4.19)$$
$$Q_{h} = \begin{bmatrix} x\\ y\\ z\\ 1 \end{bmatrix}$$

Die linke 3×3 -Teilmatrix von \tilde{K} , K, wird hierbei als Kalibriermatrix [268] oder interne Projektionsmatrix [266] bezeichnet, da sie alle inneren Kameraparameter zur Abbildung von Kamera- auf Bildkoordinaten beinhaltet. Zur Transformation zwischen Welt- und Kamerakoordinaten sind zudem eine Translation, die sich durch einen 3×1 -Richtungsvektor \vec{t} , und eine Rotation, die sich durch eine 3×3 -Rotationsmatrix R beschreiben lassen, notwendig. Diese externen Kameraparameter ergeben eine starre Transformation in Form einer 4×4 -Matrix T. Alle genannten Transformationen der Translation, Rotation, perspektivischen Projektion, Skalierung, Bildverschiebung und Scherung lassen sich in einer 3×4 -Kameramatrix P zusammenfassen, mit der sich die Abbildung eines Objektpunktes Q auf den Bildpunkt q schreiben lässt als [268]:

$$q_h = P Q_h, \text{ mit } P = \widetilde{K} T, \ \widetilde{K} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & x_0 & 0\\ 0 & \alpha_y & y_0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$
 (4.20)

 $-\gamma_{-}$

$$T = \begin{bmatrix} R & \vec{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ und } Q_h = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Da das Modell der Zentralprojektion keine Abbildungsfehler realer optischer Systeme beinhaltet, sind diese im zu verwendenden Kameramodell zusätzlich zu berücksichtigen. Ein wichtiger Abbildungsfehler ist die durch die Linsenform bedingte radiale Verzeichnung, welche in Abhängigkeit des radialen Abstands vom Verzeichniszentrum beschrieben werden kann [269]. Weniger bedeutend ist die tangentiale Verzeichnung, welche aus einer nicht parallel zur Bildebene ausgerichteten Linse auf Grund von Fertigungsfehlern resultiert [162] [269]. Die Bestimmung der Korrekturkoeffizienten der radialen Verzeichnung wird als Teil der inneren Kamerakalibrierung angesehen [268].

Es existieren verschiedene Verfahren zur Ermittlung der Kameramatrix P auf Basis korrespondierender Objekt- und aufgenommener Bildpunkte, wie beispielsweise die direkte lineare Transformation (DLT) ohne Berücksichtigung der radialen Verzeichnung [268], der den Gold-Standard darstellende Algorithmus nach [268] oder die Methode nach [270]. Zur lateralen Kalibrierung der ToF-Kamera wird ein Open Source-Paket für Matlab [271] getestet, welches neben den Parametern der Kalibriermatrix auf Basis eines an [272] angelehnten Verfahrens auch radiale und tangentiale Verzeichnungskoeffizienten anhand eines auf [273] zurückgehenden Modells mittels eines Schachbrettmusters bestimmt [274]. Die grundsätzliche Eignung herkömmlicher Verfahren zur lateralen Kalibrierung von PMD-Kameras wird beispielsweise in [275] gezeigt. Auf Grund der im Vergleich zu Standardflächenkameras relativ niedrigen lateralen Auflösung und des kleinen Sichtfelds ergeben sich jedoch Abhängigkeiten zwischen den zu schätzenden Parametern [276]. So können auch Werte, die niedrige Standardabweichungen aufweisen, inkorrekt sein [276]. Da bei der durchgeführten lateralen Kalibrierung des CamCube 3.0 zudem relativ hohe Messunsicherheiten der geschätzten internen Parameter auftreten, wird auf deren Integration in das Kameramodell zur Korrektur der aufgenommenen Bilddaten verzichtet. Stattdessen wird auf die vom Kamerahersteller als Software-Plugin-Funktion bereitgestellte Kalibrierung der Standardlinse zurückgegriffen sowie zusätzlich die Koordinaten des Bildhauptpunkts anhand der Visualisierungssoftware manuell bestimmt.

Bekannte Messfehler und Kalibrierung der Tiefenwerte

Die Entfernungsmessung von PMD-Kameras wird durch verschiedene Messfehler beeinflusst. Hierzu zählt das Demodulationsverfahren, das von einem ideal sinusförmigen Referenz- und damit Korrelationssignal, welches sich mit dem Phasen-Shift-Algorithmus auf Basis von vier Abtastpunkten ermitteln lässt, ausgeht. Bei realen ToF-Kameras wird jedoch kein ideales Sinussignal ausgesendet, sodass ein systematischer, entfernungsabhängiger Fehler, der als "wiggling error" bezeichnet wird, entsteht. [276] [277] Zur Korrektur werden unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen, wie die Modellierung über B-Splines in [275] oder Lookup-Tabellen (LUT), welche aufwändige Referenzmessungen erfordern, oder die im Vergleich hierzu schlechtere Korrekturwerte ergebende Demodulation auf Basis einer linearen Kombination aus einem sinusund dreiecksförmigen Korrelationssignal [276] [277].

Eine weitere Fehlerquelle stellt die IR-Reflektivität und die Ausrichtung von Objekten dar, welche die von PMD-Kameras aufgenommene Lichtintensität beeinflussen [262]. Generell führt eine niedrigere Reflektivität, beispielsweise auf Grund dunklerer Oberflächen, zu kürzeren Entfernungswerten [262]. Da der intensitätsbasierte Fehler jedoch zusätzlich mit der Entfernung korreliert, werden als Korrekturmodelle mehrdimensionale Lookup-Tabellen oder zweidimensionale B-Splines auf Basis einer sehr hohen Anzahl an Referenzmessungen vorgeschlagen [276]. Zur Abschätzung der vorhandenen Objektreflektivität kann das Amplituden- bzw. Intensitätsbild herangezogen werden [276]. In [276] wird durch Kombination mit einer zusätzlichen, hochauflösenden 2D-Kamera eine Kalibrierung zur Korrektur der intensitäts- und demodulationsbedingten Fehler sowie zur Ermittlung der internen und externen Kameraparameter vorgestellt.

In [278] wird gezeigt, dass auch die Temperatur die gemessenen Entfernungswerte von ToF-Kameras beeinflussen kann. Eine einfache Möglichkeit zur Kompensation des hierbei durch die Kamera selbst induzierten Fehlers stellt die Berücksichtigung einer geeigneten Aufwärmphase vor dem eigentlichen Einsatz dar. Des Weiteren können Entfernungsfehler durch bewegte Objekte und sogenannte springende Pixel an Objektkanten entstehen, indem mehrere Distanzwerte auf einem Pixel abgebildet werden.

Neben den dargestellten Messfehlern tritt bei PMD-Kameras zusätzlich Rauschen auf, das über eine zeitliche Mittelung sowie eine laterale Glättung der Werte reduziert werden kann [276]. Auf Grund des hohen Aufwands zur Ermittlung geeigneter Referenzwerte, dem notwendigen Zugriff auf Kamerarohdaten oder dem Einsatz zusätzlicher 2D-Kameras zur Kalibrierung der Tiefenwerte, wird in dieser Arbeit auf eine direkte Korrektur der demodulationsund intensitätsbedingten Messfehler verzichtet. Die Fehler der Entfernungswerte werden stattdessen im Rahmen der Objekterkennung berücksichtigt.

Ein weiterer wichtiger, jedoch durch die Kameraeinstellungen direkt beeinflussbarer Parameter auf die Genauigkeit der Distanzwerte ist die Integrations- bzw. Belichtungszeit. Allgemeine Ansätze zur Korrektur des hierdurch entstehenden Fehlers basieren auf erweiterten Referenzmessungen, beispielsweise durch die Aufnahme zweidimensionaler B-Splines für einzelne Belichtungszeiten und der linearen Interpolation deren Stützpunkte oder durch die Verwendung dreidimensionaler Lookup-Tabellen [262]. Um Bewegungsartefakte in dynamischen Szenen durch die Aufnahme verschiedener Distanzen möglichst zu vermeiden, ist eine kurze Integrationszeit vorteilhaft. Wird jedoch zu kurz belichtet, treten Rauscheffekte in den Vordergrund. Auch bei zu langen Integrationszeiten können auf Grund der Sensorsättigung fehlerhafte Werte entstehen.

Zur Bestimmung der für den Anwendungsfall geeigneten Integrationszeit wird eine Versuchsreihe mit steigenden Abständen von 1,5 m bis 5 m zu einem flächigen Objekt mittlerer Reflektivität und unter einheitlichen Beleuchtungsbedingungen durchgeführt. Für alle Distanzen erfolgt die Aufnahme der Entfernungswerte für das Kamerapixel an zentraler Position, wo auf Grund der Anordnung der aktiven Beleuchtung der maximale Amplitudenwert zu erwarten ist, während die Integrationszeit von 0,1 ms bis 30 ms in 0,1 ms-Schritten erhöht wird. Auf Grund der beschriebenen Messfehler ergeben sich bei den ermittelten im Vergleich zu den realen Tiefenwerten unterschiedliche Abweichungen in Abhängigkeit der Entfernung und der Belichtungszeit. Die Integrationszeiten, bei denen kein weiterer Anstieg der Intensitätswerte für die einzelnen Distanzen zu verzeichnen ist, werden als jeweilige optimale Integrationszeiten angesehen und sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Entfernung in m	Integrationszeit in ms	Entfernung in m	Integrationszeit in ms
1,5	0,6	3,5	2,8
2	1	4	3,5
2,5	1,7	4,5	4,4
3	2,3	5	5,1

Tabelle 7: Ermittlung optimaler Integrationszeiten für einzelne Entfernungen [S2]

Für den vorliegenden Einsatz der PMD-Kamera ist eine ideale Anpassung der Integrationszeit auf einen festen Entfernungswert nicht möglich, da Distanzbereiche von mehreren Metern abgedeckt werden müssen. Die Aufnahme sequentieller Entfernungsbilder derselben Szene mit angepassten Belichtungszeiten für verschiedene Objektdistanzen stellt auf Grund nicht statischer Bedingungen sowie der zeitlichen Anforderung keine sinnvolle Alternative dar. Somit wird auf Basis der durchgeführten Messungen ein für den aufzunehmenden Entfernungsbereich mittlerer Standardwert der Integrationszeit von 2 ms eingesetzt, der auf Basis der jeweiligen Anbringungshöhe der Kamera angepasst werden kann. Im Versuch werden für diese Belichtungszeit in Abhängigkeit der verschiedenen Entfernungen Abweichungen zwischen realen und von der Kamera ausgegebenen Werten bis maximal 25 cm verzeichnet.

Roboter-Kamera-Kalibrierung

Um die mittels der ToF-Kamera aufzunehmenden Objekte mit dem Roboter in Bezug setzen sowie dessen Geometrie in den Kamerabildern extrahieren zu können, ist eine Ermittlung der externen Kameraparameter zur Definition der Kamerapose im Weltkoordinatensystem notwendig. Da weitere gegebenenfalls zu berücksichtigende externe Geräte sich auf das Roboterbasiskoordinatensystem K_0 beziehen, wird dieses als gemeinsames Bezugs- und somit Weltkoordinatensystem $K_{Welt}(=K_W)$ gewählt. Die aus einer Translation $\vec{t}_{K,W}$ und einer Rotation ${}_{K}^{W}R$ bestehende feste Transformationsbeziehung ${}_{K}^{W}T$ (vgl. Gleichung (4.20) und Teilkapitel 4.1.2) zwischen dem Roboterbasiskoordinatensystem $K_0 = K_{Welt}$ und dem linkshändigen Kamerakoordinatensystem K_{Kamera} (= K_K) ist im Rahmen einer Roboter-Kamera-Kalibrierung zu bestimmen:

$${}^{W}_{K}T = \begin{bmatrix} {}^{W}_{K}R & \vec{t}_{K,W} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(K)}_{W_{X}} & y^{(K)}_{W_{X}} & z^{(K)}_{W_{X}} & t^{(K)}_{K,W_{X}} \\ x^{(K)}_{W_{Y}} & y^{(K)}_{W_{Y}} & z^{(K)}_{W_{Y}} & t^{(K)}_{K,W_{Y}} \\ x^{(K)}_{W_{Z}} & y^{(K)}_{W_{Z}} & z^{(K)}_{W_{Z}} & t^{(K)}_{K,W_{Z}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4.21)

Mittels der Transformationsmatrix ${}_{K}^{W}T$ können daraufhin Welt- in Kamerakoordinaten zur Ermittlung der Roboterpixel im Kamerabild bzw. mit Hilfe der inversen Matrix ${}_{K}^{W}T^{-1} = {}_{W}^{K}T$ Kamera- in Weltkoordinaten transformiert werden:

$$\begin{bmatrix} x_{K} \\ y_{K} \\ z_{K} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{W}_{K}T \cdot \begin{bmatrix} x_{W} \\ y_{W} \\ z_{W} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{bmatrix} x_{W} \\ y_{W} \\ z_{W} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{K}_{W}T \cdot \begin{bmatrix} x_{K} \\ y_{K} \\ z_{K} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(4.22)

Da die für herkömmliche Flächenkameras entwickelten Kalibrierverfahren oben genannte Probleme aufweisen und keine weitere Hardware in Form einer hochauflösenden 2D-Kamera eingesetzt werden soll, wird ein speziell für ToF-Kameras geeigneter Ansatz von [226] aufgegriffen und erweitert. Als Kalibrierobjekt dienen retroreflektierende Marker, deren Positionen im Kamerabild bei kurzer Belichtung durch sehr hohe Intensitätswerte leicht ermittelbar sind. Anders als in [226] werden die einzelnen Marker nicht fest mit der Roboterbasis verbunden, sondern über eine Kalibrierplatte am Roboterflansch angebracht. Hierdurch kann unter Ausnutzung der Freiheitsgrade des Roboters eine für die jeweilige Kameraanbringung geeignete Kalibrierpose angefahren und somit möglicherweise entstehende Verdeckungen vermieden werden. Eingesetzt werden drei für Motion-Capturing-Systeme hergestellte Kugelmarker des Herstellers Advanced Realtime Tracking (ART) mit einem Durchmesser von 14 mm. Bild 24 skizziert die im Rahmen der Roboter-Kamera-Kalibrierung notwendigen Transformationen zwischen Kamera-, Marker- und Roboterbasiskoordinatensystem.



Bild 24: Ermittlung der notwendigen Transformationsbeziehungen im Rahmen der Roboter-Kamera-Kalibrierung

Über die realisierte Kommunikationsschnittstelle mit der Robotersteuerung (siehe Kapitel 4.1.1) können die aktuellen Achswerte $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)^T$ ausgelesen und damit anhand der Vorwärtskinematik nach Gleichungen (4.1) und (4.2) die Transformation ${}_W^6T(\vec{\theta})$ zwischen dem Flansch- K_6 und dem als Weltkoordinatensystem definierten Roboterbasiskoordinatensystem $K_0 = K_W$ bestimmt werden. Mit der bekannten festen Transformation ${}_6^6T$ zwischen dem Markerkoordinatensystem K_{Marker} (= K_M bzw. Toolkoordinatensystem $K_T = K_7 = K_M$) und dem Roboterflanschkoordinatensystem K_6 ergibt sich die Gesamttransformation ${}_W^M T$ zwischen Marker- und Weltkoordinatensystem zu:

Die Detektion der drei retroreflektierenden Marker der Kalibrierplatte im Intensitätsbild und die Ermittlung ihrer kartesischen Positionen P_1 , P_2 und P_3 in Kamerakoordinaten führt zur Transformationsmatrix ${}_{K}^{M}T$ zwischen Marker- und Kamerakoordinatensystem für die gewählte Kalibrierpose:

$${}_{K}^{M}T = \begin{bmatrix} {}_{K}^{M}R & \vec{t}_{K,M} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{x}_{M}^{(K)} & \vec{y}_{M}^{(K)} & \vec{z}_{M}^{(K)} & \vec{t}_{K,M} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4.24)

Für die in Bild 24 dargestellte Anordnung der Kalibriermarker und Festlegung des Markerkoordinatensystems K_M können die einzelnen Spalten der Transformationsmatrix ${}_{K}^{M}T$ in Gleichung (4.24) auf Basis der ermittelten Ortsvektoren der Marker $\vec{p}_1 = (x_1, y_1, z_1)^T$, $\vec{p}_2 = (x_2, y_2, z_2)^T$ und $\vec{p}_3 = (x_3, y_3, z_3)^T$ beispielsweise nach [279] über einfache Vektorsubtraktion und Normierung sowie mittels des Kreuzprodukts von Vektoren berechnet werden:

$$\vec{x}_{M}^{(K)} = \frac{\vec{p}_{3} - \vec{p}_{1}}{|\vec{p}_{3} - \vec{p}_{1}|}, \quad \vec{y}_{M}^{(K)} = \frac{\vec{p}_{2} - \vec{p}_{1}}{|\vec{p}_{2} - \vec{p}_{1}|}, \quad \vec{z}_{M}^{(K)} = \vec{x}_{M}^{(K)} \times \vec{y}_{M}^{(K)} \quad \text{und}$$
(4.25)
$$\vec{t}_{K,M}^{(K)} = \vec{p}_{1}$$

Die ersten drei Spalten der Transformationsmatrix ${}_{K}^{M}T$ aus Gleichung (4.24) definieren die *x*-, *y*- und *z*-Achsen und die vierte Spalte die Position des Ursprungs des Markerkoordinatensystems in Kamerakoordinaten (vgl. Kapitel 4.1.2). Der Vektor $\vec{z}_{M}^{(K)}$ wird über ein Kreuzprodukt gebildet, welches ein rechtshändiges Koordinatensystem definiert. Da das Kamerakoordinatensystem ein Linkssystem darstellt, sind $\vec{x}_{M}^{(K)}$ und $\vec{y}_{M}^{(K)}$ mit im Vergleich zu $\vec{x}_{M}^{(K)}$ und $\vec{y}_{M}^{(K)}$ negativierten *z*-Koordinaten zu verwenden. Anschließend ist die *z*-Koordinate von $\vec{z}_{M}^{(K)}$ zu negativieren, um $\vec{z}_{M}^{(K)}$ zu erhalten, was jeweils mittels Multiplikation der Matrix *S* erreicht werden kann:

$$\vec{x'}_{M}^{(K)} = S \cdot \vec{x}_{M}^{(K)}, \quad \vec{y'}_{M}^{(K)} = S \cdot \vec{y}_{M}^{(K)} \quad \text{und} \quad \vec{z}_{M}^{(K)} = S \cdot \vec{z'}_{M}^{(K)}, \quad (4.26)$$

mit $S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$

Die gesuchten Transformationen ${}^{W}_{K}T$ und ${}^{K}_{W}T$ ergeben sich folglich als Matrixmultiplikation unter Verwendung der Gleichungen (4.23) und (4.24) zu:

$${}^{W}_{K}T = {}^{M}_{K}T \cdot {}^{W}_{M}T = {}^{M}_{K}T \cdot {}^{M}_{W}T^{-1}$$

$$(4.27)$$

Zur Ermittlung der Spaltenvektoren von Gleichung (4.24) anhand der in (4.25)dargestellten Berechnungen wird zunächst ein Intensitätsbild der Szene benötigt, in der die drei Marker auf Grund ihrer sehr hohen Werte leicht detektiert werden können. Hierfür werden für die gewählte Kalibrierpose bei mehreren sehr kurzen Integrationszeiten zwischen 0,030 ms und 0,080 ms jeweils drei Intensitätsbilder aufgenommen und gemittelt. Anschließend werden in diesem gemittelten Bild die Pixel mit den höchsten Intensitätswerten gesucht und als Markerpixel eingestuft. Mittels einer optischen Ausgabe der gefundenen Positionen kann die richtige Detektion zusätzlich manuell überprüft werden. Falls außer den Markern weitere sehr stark reflektierende Objektoberflächen im Sichtfeld der Kamera vorhanden sind, können fehlerhafte Positionen resultieren. Diese sind jedoch leicht über die Ausgabe des Intensitätsbilds sowie der Markerpositionen zu erkennen und durch eine Abdeckung problematischer Bereiche während des Kalibriervorgangs korrigierbar. Bild 25 zeigt die für den Reis-Roboter RV30-16 eingesetzte Kalibrierplatte mit den drei Kugelmarkern (links) sowie die während des Kalibriervorgangs für den Stäubli-Roboter TX6oL generierten Intensitätsbilder zur Detektion der Marker aus unterschiedlichen Entfernungen (Mitte und rechts). Der hierbei zu sehende vierte Marker wird nicht zur Kalibrierung genutzt.



Bild 25: Für den Reis-Roboter RV30-16 eingesetzte Kalibrierplatte (links) sowie während der Roboter-Kamera-Kalibrierung des Stäubli-Roboters TX60L generierte Intensitätsbilder (Mitte und rechts [S2])

Anschließend wird die Integrationszeit entsprechend der geschätzten Entfernung zwischen Kamera und Kalibrierplatte auf Basis der im Versuch ermittelten optimalen Einstellungen für unterschiedliche Distanzen angepasst, um möglichst gute Entfernungswerte zu erhalten. Zur Ermittlung der kartesischen Positionen P_1 , P_2 und P_3 der drei Kugelmarker werden 100 Kameraaufnahmen generiert und die jeweils zehn größten Ausreißer der Tiefenwerte auf beiden Seiten des Wertebereichs entfernt. Zusätzlich werden die Daten, welche durch die Kamera als fehlerhaft eingestuft werden, von der weiteren Berechnung ausgeschlossen. Die für die Transformationsmatrix zu verwendenden kartesischen Positionen der drei Kalibriermarker werden aus einer Mittelung der restlichen Datengrundlage gebildet. Würden alle als gültig eingestuften Messwerten in die Mittelwertbildung eingehen, könnte dies auf Grund des möglichen Auftretens hoher Abweichungen zu starken Verzerrungen führen.

4.2 Umgebungserfassung und Objektdetektion während des Robotereinsatzes

Auf Basis der in den vorherigen Teilkapiteln dargestellten Vorarbeiten erfolgt die Arbeitsraumüberwachung sowie Objekterkennung und -verfolgung während des Robotereinsatzes. Einen Überblick des Gesamtablaufs zeigt Bild 26, dessen einzelne Schritte im Folgenden detailliert werden.



Berechnung von Hüllkörpern je Kollisionsobjekt (Oriented-Bounding Boxes, Bounding Cylinders, Sphere-swept Lines)

Bild 26: Ablauf der realisierten Arbeitsraumüberwachung zur Objekterkennung und -verfolgung (in Anlehnung an [P3]) Zunächst wird die Hintergrundmodellierung mittels Referenzbildgenerierung beschrieben, welche vor der eigentlichen Umgebungserfassung stattfindet. Anschließend wird auf die Segmentierung der Roboterpixel in den aktuellen Kamerabildern sowie die Detektion dynamischer sowie neu hinzugekommener statischer Objekte in der Roboterumgebung und deren Beschreibung anhand von einfachen Hüllkörperformen eingegangen. Abschließend erfolgt die Schnittstellenbeschreibung zu anderen Programmodulen des Roboter-Assistenzsystems.

Um sich dem Roboter nähernde Objekte, insbesondere Personen, anhand der Arbeitsraumüberwachung detektieren und im drohenden Kollisionsfall das Verhalten des Roboters rechtzeitig anpassen zu können, ist die Erfassung eines möglichst großen Bereichs um den Roboter notwendig. Der maximale Abstand des 3D-Sensors wird durch eine hinreichende laterale Auflösung zur Erkennung auch kleinerer Gegenstände limitiert. Zur Realisierung eines zeiteffizienten und kostengünstigen Systems wird nur eine stationäre PMD-Kamera eingesetzt, weshalb sich eine zentrale Positionierung mit möglichst geringen Abschattungen in alle Raumrichtungen anbietet. Da sowohl beim Testaufbau mit einem Stäubli-Roboter als auch bei der Integration in ein Montagesystem mit einem Reis-Roboter diese jeweils rückseitig durch eine feste Betonwand abgesichert werden, wird die Tiefenkamera über dem vorderen Arbeitsbereich angebracht. Die z-Achse des Kamerakoordinatensystems zeigt hierbei senkrecht zum Boden (vgl. Bild 24). Auf Grund des Kamerasichtfelds wird eine Positionierung mit einem Abstand von mindestens vier Metern zur Robotergrundfläche gewählt, der einer Mindestabdeckung von 2,91 × 2,91 m entspricht. In Abhängigkeit der vorhandenen Gegebenheiten und Einschränkungen wird bei einzelnen Testszenarien der Abstand auf bis zu 4,6 m erhöht.

4.2.1 Hintergrundmodellierung des Roboterarbeitsraums

Ziel der Arbeitsraumüberwachung des Roboters ist die Detektion dynamischer oder neu hinzugekommener statischer Kollisionsobjekte. Die Objekterkennung und -klassifikation in Grauwert- oder Farbbildern kann beispielsweise anhand geeigneter Deskriptoren und Methoden des maschinellen Lernens erfolgen. Bei Bildfolgen basiert die Bewegungsdetektion auch häufig auf dem optischen Fluss. In dieser Arbeit wird eine Kombination aus einem pixel- und regionenbasierten Verfahren eingesetzt, um möglichst effizient Objekte unterschiedlichster Form und Größe erfassen zu können. Ein weiterer alternativer Ansatz wäre, die von der PMD-Kamera generierte Punktewolke direkt oder beispielsweise in Form einer Voxelmodellierung zur Umgebungsrepräsentation heranzuziehen. Nachteilig erweist sich jedoch die dadurch nicht mögliche Interpretation und angepasste Reaktion des Roboters auf unterschiedliche Arten von Objekten. Zudem kann ein, eine Vielzahl von Volumenelementen ersetzender, einfacher Hüllkörper den Zeitaufwand von Kollisions- und Abstandsprüfungen und den notwendigen Speicherbedarf reduzieren.

Zur Trennung zwischen aus statischen Objekten bestehendem Hintergrund und dem eigentlichen Vordergrund dient zunächst ein pixelbasierter Ansatz auf Basis eines zur Beginn der Umgebungserfassung generierten Referenzbildes. Vergleichende Übersichten zu häufig eingesetzten Verfahren dieser Art finden sich beispielsweise in [280] und [281]. Meist erfolgt die Hintergrundmodellierung mittels wahrscheinlichkeitsbasierter Verfahren wie Gaußscher Mischverteilungen oder Kerndichteschätzern, um den Einfluss von Bildstörungen zu reduzieren [282]. Durch Kombination mit einem nachfolgenden Regionenwachstum, das die benachbarten Umgebungen einzelner Pixel berücksichtigt, kann dieses Problem jedoch ohne den Einsatz aufwändiger Modellierungsverfahren umgangen werden. Zur Eliminierung des Roboters aus dem Hintergrundbild wird in [283] ein Medianfilter eingesetzt, um diesen nach kontinuierlichem Verfahren an unterschiedliche Posen als Störungen in einzelnen Pixeln zu entfernen.

Für eine vollständige Repräsentation des Hintergrunds ohne die beweglichen Geometrieelemente des Roboters zur Umgebungserfassung des Assistenzsystems wird ein vereinfachter Ansatz verwendet, bei dem der Roboter an lediglich zwei voneinander entfernte Posen verfahren wird, an denen sich die beweglichen Elemente nicht überdecken. Auf Grund der dargestellten Fehlereinflüsse der ToF-Kamera werden die beiden Teilreferenzbilder aus mehreren Aufnahmen an diesen Posen gemittelt und enthalten neben den Distanzen zusätzlich die Intensitätswerte aller Pixel. Hierbei werden von der Kamera als fehlerhaft markierte Bildpunkte von der Berechnung ausgeschlossen, um eine Verfälschung der Werte zu vermeiden. Das den Hintergrund repräsentierende Referenzbild wird anschließend pixelweise aus diesen gemittelten Werten auf Basis der größeren radialen Entfernungswerte fusioniert und stellt nur die statischen Elemente des Roboters wie beispielsweise den Robotersockel dar. Bild 27 zeigt beispielhaft die Fusionierung zweier Tiefenbilder in Grauwertdarstellung zur Hintergrundmodellierung für den Testroboter Stäubli TX6oL, welche an bezüglich der ersten Achse veränderten Roboterposen aufgenommen wurden.

Ein alternativer Ansatz zur Vermeidung von beweglichen Robotersegmenten im Hintergrundbild stellt die Verwendung der im fortlaufenden Betrieb eingesetzten Projektion des Roboters ins Kamerabild (siehe 4.2.2) während der Referenzbildgenerierung dar. Auf Grund der in Abhängigkeit der Gegebenheiten teilweise groß zu dimensionierenden Hüllkugeln kann jedoch eine


Bild 27: Fusionierung (rechts) der als Grauwerte dargestellten Tiefenbilder von zwei unterschiedlichen Roboterposen des Stäubli TX6oL (links und Mitte) zur Referenzbildgenerierung [S2]

vollständige Abbildung des Hintergrunds durch Anfahren geeigneter Posen erschwert werden.

Um einen gleichbleibenden, statischen Hintergrund zu Beginn eines jeden Zyklus der Arbeitsraumüberwachung nicht neu aufnehmen zu müssen, wird das erstellte Referenzbild gespeichert und kann wiederverwendet oder bei Bedarf aktualisiert und überschrieben werden. Während des Betriebs des Assistenzsystems werden durchgängig aktuelle Kamerabilder der Szene aufgenommen und die Differenzen zum Referenzbild ermittelt. Um den Einfluss sich ändernder Beleuchtungsbedingungen zu berücksichtigen, werden die Grauwerte des Referenzbildes I_{Ref_n} aller n = 40.000 Pixel bei länger bestehenden Veränderungen leicht angepasst:

$$I_{Ref_n} = 0.93 \cdot I_{Ref_alt_n} + 0.07 \cdot I_{akt_n}$$
(4.28)

Aus Sicherheitsgründen wird auf eine Aktualisierung der Tiefenwerte, auf welchen die Objekterkennung primär basiert, verzichtet, damit vorhandene, jedoch längere Zeit unbewegliche Objekte nicht fälschlicherweise dem Hintergrund zugerechnet werden.

4.2.2 Segmentierung des Roboters aus den Kamerabildern

Vor der eigentlichen Objekterkennung werden zu Beginn jedes Zyklus der Umgebungserfassung alle den Roboter abbildende Pixel in den aktuellen Kamerabildern ermittelt, um sie von der weiteren Berechnung auszuschließen. Hierfür wird das Modell der Zentralprojektion von Gleichung (4.20) eingesetzt, um Objektpunkte in Weltkoordinaten auf Bildpunkte in Kamerakoordinaten umzurechnen. Im vorliegenden Fall enthält die Kalibriermatrix *K* keinen Scherungsanteil *s* und die Pixelausdehnung ist auf Grund quadratischer Form in beide Richtungen identisch. Die Hüllkörpermodellierung der Robotergeometrien mittels Bounding Spheres (siehe Kapitel 4.1.2) erlaubt eine schnelle Aktualisierung unter der vereinfachenden Annahme, dass dreidimensionale Kugeln auf Kreise abgebildet werden und somit lediglich alle Kugelmittelpunkte ins Kamerakoordinatensystem projiziert werden. Bild 28 zeigt die Projektion der Hüllkugeln der Testroboter RV30-16 und TX60L ins Kamerabild für jeweils eine beispielhafte Szene als weiße Bildpunkte. Auf Grund der umfangreichen Anbauten sind für die dargestellte Testanwendung des Reis-Roboters in Bild 28 (links) die eingesetzten Hüllkugeln vor allem für das erste Armelement sowie das Werkzeug im Vergleich zur ursprünglichen Modellierung stark vergrößert.



Bild 28: Ins zweidimensionale Kamerabild projizierte Hüllkugeln (weiße Bildpunkte) zur Filterung der Robotersegmente für zwei beispielhafte Szenen der Testroboter RV30-16 (links) und TX60L (rechts)

4.2.3 Objekterkennung und -tracking im Roboterumfeld

Die Erkennung von dynamischen sowie im Vergleich zum modellierten Hintergrund neu erscheinenden statischen Objekten im Kamerabild erfolgt zunächst anhand einer pixelbasierten Differenzbildgenerierung nach Ausschluss der den Roboter repräsentierenden Bildpunkte und einer anschließenden Zusammenfassung von mit hoher Wahrscheinlichkeit Objekte repräsentierenden Pixeln zu zusammenhängenden Bereichen.

Einteilung von Pixeln in Wahrscheinlichkeitskategorien

Wie dargestellt, enthält das Referenzbild gemittelte Tiefen- und Intensitätswerte des vollständigen statischen Hintergrunds. Da sich Objekte vor allem bezüglich ihrer geometrischen Ausdehnung von ihrer Umgebung abgrenzen lassen, die Entfernungswerte der PMD-Kamera jedoch mit Fehlern behaftet sind, basiert ihre Erkennung nur zum Teil auf der Veränderung des Entfernungswertes zwischen aktuellem und Referenzbild. Als weiteres wichtiges

Erkennungsmerkmal wird der Unterschied im Grauwertbild eingesetzt. Zusätzlich wird berücksichtigt, ob das jeweilige Pixel als valide eingestuft wird und ob bei der Referenzbilderstellung ausreichend gültige Aufnahmen zur Generierung eines aussagekräftigen Mittelwertes vorhanden sind. Da sich die auf dem Kamerasensor abgebildeten Objekte in der Regel über einen größeren Bereich als lediglich einen Bildpunkt erstrecken, werden die unmittelbar benachbarten Pixel ebenfalls stark berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeit eines jeden Bildpunktes auf Grund der genannten Kriterien des Differenzbildes ein Objekt darzustellen wird mittels der Zuordnung in eine von fünf diskreten Kategorien mit ansteigender Wahrscheinlichkeit vorgenommen. Während die Kategorie eins impliziert, dass sich an dieser Stelle mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit kein Objekt befindet, ergibt die Kategorie fünf die Annahme eines Objektes mit hoher Wahrscheinlichkeit. Der Klassifizierungsprozess aller Pixel auf Basis der Unterschiede zwischen aktuellem und Referenzbild erfolgt anhand eines Entscheidungsbaumes, der in Bild 29 skizziert ist.

Die im Klassifizierungsprozess angewandten Schwellwerte der Höhendifferenz H_1 , H_2 , H_3 und H_4 sowie der Intensitätsdifferenz I_1 und I_2 können an den jeweiligen Anwendungsfall und die maximal auftretenden Intensitätswerte angepasst werden, wobei gilt $H_1 < H_2 < H_3 < H_4$ und $I_1 \ll I_2$. Für die durchgeführten Testszenarien werden mit den Werten $H_1 = 5$ cm, $H_2 = 15$ cm, $H_3 = 30$ cm und $H_4 = 40$ cm sowie $I_1 = 500$ und $I_2 = 5000$ sehr gute Ergebnisse erzielt. Die Unterscheidung in vier verschiedene Höhenschwellwerte ergibt sich aus Praxistests hinsichtlich der Schwankung der Tiefenwerte und dem tatsächlichen Vorhandensein von Objekten. Die beiden sich stark unterscheidenden Intensitätsschwellwerte I1 und I2 werden jeweils für die Fälle herangezogen, dass das gemittelte Referenzbild als gültig oder auf Grund wahrscheinlich falscher Pixelwerte als ungültig angesehen wird. Entsprechend wird bereits bei niedrigen oder nur bei höheren Intensitätsunterschieden die Möglichkeit eines Objektes in Betracht gezogen. Bei als ungültig eingestuften Bildpunkten basiert die Klassifizierung auf Grund nicht verlässlicher Entfernungswerte lediglich auf Basis der Intensitätsunterschiede. Anderenfalls werden durch die starke Einbeziehung der Höhendifferenz der jeweiligen Pixel sowie ihrer benachbarten Bildpunkte Bereiche im Inneren von Objekten sicher als solche erkannt, d. h. in höhere Kategorien eingestuft. Randpixel von Objekten besitzen ebenfalls weiter im Inneren liegende Nachbarn mit mindestens gleichen Differenzwerten, sodass diese ebenfalls mit höheren Wahrscheinlichkeitswerten versehen werden. Fehlerhafte, verrauschte Bildpunkte dagegen treten meist vereinzelt auf und lassen sich auf Grund ihrer lokalen Nachbarschaft von tatsächlichen Objektpunkten unterscheiden.

4 3D-Kamera basierte Erfassung und Interpretation des Roboterarbeitsraums



Bild 29: Pixelklassifizierung zur Repräsentation einer Objektwahrscheinlichkeit mittels Entscheidungsbaum: steigende Werte zwischen den Kategorien eins (kein Objekt) bis fünf (hohe Objektwahrscheinlichkeit)

Die kombinierte Berücksichtigung von Tiefen- und Intensitätswerten eines jeden Pixels und dessen lokaler Nachbarschaft ermöglicht, Bereiche als Objektbestandteile zu identifizieren, die sonst nur schwer zuordenbar wären. Beispiele hierfür sind mit nur geringen Entfernungsdifferenzen, mit falschen Distanzen auf Grund von Messfehlern oder durch Schattenwurf beeinflusste Bildpunkte. Das Ergebnis des Klassifizierungsprozesses für einen beispielhaften Bildausschnitt der laufenden Arbeitsraumüberwachung, in dem sich eine Person mit ausgestreckten Armen dem Reis-Roboter RV30-16 nähert, zeigt Bild 30.



Bild 30: Ausschnitt der 2D-Visualisierung einer beispielhaften Szene aus der Vogelperspektive zur Einteilung aller Pixel des Differenzbildes in Wahrscheinlichkeitskategorien

Gut erkennbar weisen in der dargestellten Momentaufnahme fast alle inneren Objektpixel auf Grund ihrer eigenen sowie der Höhendifferenz der lokalen Nachbarschaft eine hohe Objektwahrscheinlichkeit (blaue Bildpunkte der Kategorie fünf) auf. Die Objektkontur begrenzende Bildpunkte werden dagegen in niedrigere Kategorien eingestuft (Kategorien zwei bis vier), da nur wenige benachbarte Pixel mit entsprechenden Höhenunterschieden, jedoch meist eine Veränderung der Intensitätswerte zu verzeichnen ist. Wie ebenfalls erkennbar ist, werden auch Bereiche, in denen sich keine Objekte befinden, fälschlicherweise mit einer gewissen Objektwahrscheinlichkeit belegt. Ursachen hierfür sind neben den Messfehlern der Kamera ungünstige Umgebungsbedingungen mit störendem Fremdlicht sowie reflektierende Gegenstände des statischen Hintergrunds.

Zusammenfassung von Pixeln zu Objekten mittels Region-Growing

Die eigentliche Objekterkennung, d. h. die Entscheidung, ob einzelne Bildpunkte als Objektbestandteile angesehen und welchem Objekt sie zugeordnet werden, erfolgt nach der Pixelklassifizierung in Wahrscheinlichkeitskategorien durch Anwendung eines **Regionenwachstumsverfahrens** (engl. "region growing"). Hierbei wird sichergestellt, dass fälschlicherweise mit höheren Werten versehene Bereiche, wie im Beispiel von Bild 30 dargestellt, nicht zur Erstellung von Objekten führen. Allgemein dient ein Regionen- bzw. Bereichswachstumsverfahren zur Segmentierung zusammenhängender Bildregionen bezüglich eines Merkmals [284]. Ausgehend von einem zu wählenden, als Saatpunkt (engl. "seed point") bezeichneten Startpunkt werden benachbarte Pixel auf Homogenität mittels Intervallen oder Abstandsmaßen untersucht und in Abhängigkeit hiervon zur homogenen Region hinzugezählt oder verworfen [284]. Anschließend wiederholt sich der Prozess auf die wiederum benachbarten Bildpunkte, bis keine weiteren Pixel das definierte Kriterium erfüllen [284]. Zur Objekterkennung in der Arbeitsraumüberwachung dienen als Saatpunkte des Region-Growing-Algorithmus alle Pixel, bei denen von mindestens einer niedrigen Objektwahrscheinlichkeit auszugehen ist, was einer Einordnung in die Kategorie drei oder höher entspricht. Zur eindeutigen Unterscheidung von Vorder- und Hintergrund werden im Folgenden in Abhängigkeit der zugewiesenen Wahrscheinlichkeitskategorien unterschiedlich große lokale Nachbarschaften analysiert. Bei Saatpixeln der Kategorie drei erfolgt eine Suche nach weiteren Objektpixeln in der zugehörigen 8er-Nachbarschaft, entsprechend eines zentral angeordneten 3 × 3-Filterkerns, bei Saatpixeln der Kategorie vier in der 24er-Nachbarschaft und bei der Kategorie fünf in der 48er-Nachbarschaft wie Bild 31 illustriert.



Bild 31: Größe der lokalen Nachbarschaftssuche in Abhängigkeit der zugeordneten Wahrscheinlichkeitskategorie des zentralen Saatpixels im Rahmen des Region-Growings

Aus den jeweiligen Nachbarschaften eines Saatpixels werden alle Bildpunkte der Wahrscheinlichkeitskategorien drei oder höher einer Objektregion hinzugefügt. Diese führen zudem zu einem weiteren Durchlauf des Region-Growings. Zusätzlich werden Pixel der lokalen Nachbarschaft mit einer sehr niedrigen Objektwahrscheinlichkeit, repräsentiert durch Einstufung in die Kategorie zwei, dem jeweiligen Objektbereich hinzugezählt, falls ihre Abstände 20 cm zum Saatpixel nicht überschreiten. Praxistests ergeben, dass hierdurch relevante Bildpunkte des Randbereichs, die jedoch nur geringe Differenzwerte im Vergleich zum Referenzbild besitzen, gerade bei der Erstellung von Objekten geringerer Ausdehnung erfolgreich berücksichtigt werden können. Nach Durchführung des Region-Growings werden aus allen zusammenhängenden Bereichen Objekte gebildet, falls sie aus mindestens vier Pixeln der Kategorie zwei bestehen. Anderenfalls werden sie verworfen, damit lediglich mit Messfehlern behaftete, kleinere Bildbereiche nicht fälschlicherweise zur Objekterstellung führen.

Repräsentation erkannter Objekte durch vereinfachte Hüllkörper

Für im Kamerabild detektierte Objekte werden im nächsten Schritt einfache Hüllkörper berechnet, welche alle Objektpunkte umschließen und zur effizienten Speicherung sowie Kollisions- und Abstandsprüfung in der Kollisionsvermeidung und Bahnplanung des Assistenzsystems dienen. Auf eine mögliche, genauere Repräsentation von als Personen zuordenbaren Objekten mittels detaillierten Kinematikmodellen wird verzichtet, da eine sehr feine Aufgliederung die Abstands- und Kollisionstests verlangsamen würde. Zur besseren Anpassung an die jeweilige Objektgeometrie werden verschiedene Arten von Bounding Volumes verwendet, die Bild 32 skizziert.



Bild 32: Eingesetzte Hüllkörpertypen zur vereinfachten Repräsentation detektierter Objekte in Anlehnung an [P4] und [S1]

Diese sind, neben an der z-Achse des Kamerakoordinatensystems K_K ausgerichteten, in x- und y-Richtung beliebig orientierten Hüllquadern (bzw. Oriented-Bounding Boxes, OBBs), ebenfalls an der z-Achse ausgerichtete Hüllzylinder (bzw. Bounding Cylinder) sowie daraus erstellte Kapseln (bzw. Sphere-swept Lines, SSLs). Durch die Beschränkung auf Hüllkörper, welche an der zur Bodenfläche senkrechten *z*-Achse ausgerichtet sind, wird deren Erstellungsprozess auf ein Problem im Zweidimensionalen erheblich vereinfacht und beschleunigt ohne auf eine gute Annäherung an die Objektkontur verzichten zu müssen. In der *xy*-Ebene werden sowohl umhüllende Kreise als auch Rechtecke für alle Objekte generiert und abhängig vom jeweils höheren Füllgrad, dem Verhältnis der tatsächlichen Objektoberfläche zur umhüllenden Fläche, ausgewählt. Durch die Ausrichtung an der *z*-Achse ergibt sich anschließend durch Ausdehnung entlang dieser Richtung die Höhe der Hüllkörper, bis alle Objektpunkte umschlossen sind. Beispielsweise können Personen mit anliegenden Armen durch Hüllzylinder oder Kapseln sehr gut dargestellt werden, während sich Hüllquader ebenfalls gut zur Repräsentation von Menschen mit seitlich ausgestreckten Armen oder kompakten Objekten eignen.

Zur Erstellung der **umhüllenden Kreise** aller zu einem Objekt gehörenden Pixel in der Ebene wird der Algorithmus von Welzl [285] eingesetzt, der für eine gegebene Punktmenge den kleinsten Umkreis in linearer Zeit berechnet. Die an der *z*-Achse ausgerichteten Sphere-swept Lines ergeben sich, in dem an den Endflächen der durch einfache Ausdehnung in *z*-Richtung gebildeten Bounding Cylinders zusätzlich Halbkugeln hinzugefügt werden. Die vereinfachte SSL-Berechnung führt zu einer schlechteren Anpassung an die Punktewolke der detektierten Objekte, rechtfertigt sich jedoch durch einen deutlichen Zeitgewinn. Hintergrund für den Einsatz von Sphere-swept Lines sind die im Vergleich zu Zylindern stark vereinfachten und damit kürzeren Kollisions- und Abstandstest.

Die Hüllrechtecke in der xy-Ebene ergeben sich aus der Definition der ersten und dritten Hauptachse der Oriented-Bounding Boxes. Die zweite Hauptachse wird jeweils in Richtung der z-Achse des Kamerakoordinatensystems festgelegt. Eine Möglichkeit zur Erstellung der Objektkontur gut angepasster Hüllquader auf Basis einer gegebenen Punktemenge stellt in vielen Fällen die Hauptkomponentenanalyse (engl. "Principal Component Analysis", PCA), ein Verfahren der multivariaten Statistik, durch Berechnung der Hauptachsen dar [244]. Bei Betrachtung lediglich der Entfernungswerte repräsentiert hierbei die durch die PMD-Kamera generierte Punktewolke eine Menge n = 40.000 (entsprechend der lateralen Auflösung von 200 × 200 Pixeln) dreidimensionaler Zufallsvariablen $\vec{x} = (x_x, x_y, x_z)^T$ mit der zugehörigen Kovarianzmatrix $\Sigma = Cov(\vec{x})$. Die Eigenvektoren $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ dieser Kovarianzmatrix bilden die gesuchten Hauptkomponenten bzw. Hauptachsen. Die erste Hauptkomponente definiert die Achsrichtung mit der größten Varianz der Zufallsvariablen und ergibt sich aus dem Eigenvektor mit dem größten Eigenwert. Als zweite Hauptkomponente wird der hierzu senkrechte Eigenvektor mit dem zweitgrößten Eigenwert bezeichnet. [243] [286] Zur beschleu-

nigten Berechnung der ersten Hauptachse der erkannten Objekte wird auf die in [287] vorgestellte iterative Methode zurückgegriffen, bei der mittels eines Expectation-Maximization (EM)-Algorithmus die wichtigsten Eigenvektoren und Eigenwerte ohne eine direkte Berechnung der Kovarianzmatrix Σ zeiteffizient ermittelt werden können. Es zeigt sich durch mehrere Tests, dass bereits eine fünfmalige Iteration sehr gute Ergebnisse zur Schätzung der ersten Hauptachse liefert. Die dritte Hauptachse zur Generierung des Hüllquaders lässt sich aus den ersten beiden Hauptachsen, zu denen sie jeweils senkrecht angeordnet ist (vgl. Bild 32), ableiten. Die Hüllrechtecke lassen sich somit auf Basis der ersten und dritten Hauptachse sowie den entlang dieser Ausdehnungsrichtungen maximal entfernten Objektpunkten beschreiben wie Bild 32 für einen beispielhaft detektierten Gegenstand auf der Bodenfläche veranschaulicht. Bei der Bildung der Hüllkörper wird zusätzlich die Ausdehnung der Pixel im jeweiligen Kameraabstand in Anlehnung an Gleichung (4.15) berücksichtigt, da sich die Angabe der Bildpunkte auf deren Mittelpunkte bezieht. Vor der Weitergabe an andere Programmmodule erfolgt zudem eine Vergrößerung um Sicherheitsfaktoren in der Breite und Höhe zur Berücksichtigung von Messfehlern der ToF-Kamera.

Wiedererkennung und Verfolgung von Objekten

Zusätzlich zur eigentlichen Lokalisierung von Objekten im Kamerabild wird ein einfaches Trackingverfahren realisiert, das es erlaubt bereits detektierte Objekte wiederzuerkennen und somit ihre Bewegungstrajektorien zu verfolgen. Hierdurch können statische von dynamischen Objekten unterschieden sowie die Geschwindigkeit von Personen ermittelt und zur Risikoeinschätzung im Rahmen der Kollisionsvermeidung eingesetzt werden.

Zur Erkennung von Objekten existieren bekannte Deskriptoren für den zweidimensionalen Fall herkömmlicher Farb- und Grauwertbilder sowie auch seit wenigen Jahren entfernungsbasierte Merkmale für RGB-D (red, green, blue, depth)-Daten [288]. Auf Grund der senkrecht zum Boden gewählten Ausrichtung der ToF-Kamera werden Szenenbilder der Arbeitsraumüberwachung jedoch nur aus der Vogelperspektive generiert, was den sinnvollen Einsatz dieser Deskriptoren stark eingeschränkt. Neben neuen statischen Objekten sollen vor allem Personen, die sich durch ihre Bewegung in jedem Kamerabild stark unterscheiden können, sicher detektiert werden, um Kollisionen mit dem Roboter auszuschließen. Aus diesen Gründen werden eigene Objektmerkmale definiert, welche eine zeiteffiziente Wiedererkennung sowie eine konservative Klassifikation von Objekten als Menschen ermöglichen. Ermittelt werden die Position, die Pixelanzahl, die durchschnittlichen Intensitätsund Höhenwerte sowie die mittlere und aktuelle Geschwindigkeit in der Bodenebene wiedererkannter Objekte. Als mittlere Geschwindigkeit \bar{v} wird hierbei der Wert bezeichnet, der sich aus gewichteten Anteilen des Wertes des letzten Durchgangs \bar{v}_{alt} sowie der aktuellen Geschwindigkeit v ergibt:

$$\bar{v} = 0.9 \cdot \bar{v}_{alt} + 0.1 \cdot v$$
 (4.29)

Durch die langsame Anpassung der mittleren Geschwindigkeit wird eine zu starke Beeinflussung und damit mögliche Verfälschung durch die Auswertung des letzten Kamerabilds vermieden. Auf Basis dieser gespeicherten Merkmale wird im aktuellen Bild nach bekannten Objekten an den gemäß ihrer mittleren Geschwindigkeiten geschätzten Positionen gesucht. Die ermittelten Merkmale dienen zur Generierung eines Übereinstimmungswertes S mit aktuell detektierten Objekten. Wird der Schwellwert S_2 überschritten, gilt ein Objekt als wiedererkannt. Anderenfalls wird im weiteren Kamerabild gesucht und bei Objekten mit dem größten Übereinstimmungswert S_{max} beim Überschreiten des Schwellwerts S_1 von einer Übereinstimmung ausgegangen, wobei $S_1 < S_2$ gilt. Tabelle 8 zeigt die Bildung des Übereinstimmungswertes S auf Basis der verwendeten Merkmale zweier Objekte des aktuellen und letzten Durchgangs. Die aufgelisteten, den Übereinstimmungswert positiv bzw. negativ beeinflussenden Differenzgrenzwerte gelten für die eingesetzten Schwellwerte $S_1 = 1$ und $S_2 = 3$.

Objektmerkmale	Positive/ negative Differenzgrenzwerte	Auswirkung auf den Übereinstimmungswert S
Positionsdifferenz bei statischen Objekten	<10 cm/ > 60 cm	+2/ -2
Positionsdifferenz entsprechend der letzten aktuellen Geschwindigkeit <i>v</i> bei dynamischen Objekten	<10 cm/ > 60 cm	+1/ -1
Positionsdifferenz entsprechend der letzten mittleren Geschwindigkeit \bar{v} bei dynamischen Objekten	<10 cm/ > 60 cm	+1/ -1
Abweichung der durchschnittlichen Intensitätswerte	<5 %/ > 30 %	+2/-2
Abweichung der durchschnittlichen Höhenwerte	<5 %/ > 30 %	+2/-2
Abweichung der Pixelanzahl	<10 %, <5 %/ > 30 %	+1, +2/ -2
Lage beider Objekte jeweils am bzw. nicht am Bildrand	zutreffend	+1
Vorhandensein im letzten Bild	nicht zutreffend	-2

Tabelle 8: Bildung des Übereinstimmungswertes S zwischen bekannten und neu detektierten Objekten auf Basis ermittelter Merkmale in Anlehnung an [S1] Durch die beschriebene Vorgehensweise werden statische Objekte mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wiedererkannt. Dies gilt ebenso für dynamische Objekte, die sich hinsichtlich ihrer Gestalt wenig verändern und gleichförmig bewegen. Bei Personen hingegen, die beispielsweise durch das Ausstrecken ihrer Arme die Pixelausdehnung in der *xy*-Ebene des Kamerakoordinatensystems stark verändern, kann die richtige Zuordnung unterbrochen werden. Die grundsätzliche Detektion und Lokalisierung dieser Objekte bleibt hiervon jedoch unberührt. Beim gewählten Trackingansatz wird aus Effizienzgründen eine einfache Schätzung der Objektpositionen auf Basis der mittleren Geschwindigkeit vorgenommen. Der Einsatz eines komplexeren, Bayes-Filter basierten Verfahrens, wie beispielsweise des für Lokalisierungsaufgaben häufig verwendeten Kalman-Filters, ist jedoch prinzipiell möglich.

Bild 33 zeigt die generierten Hüllkörper und Identifikationsnummern (IDs) wiedererkannter Personen im Rahmen der Objekterkennung und -verfolgung. Die linke Darstellung bezieht sich hierbei auf den in Bild 30 aufgeführten Szenenausschnitt.



Bild 33: Ausschnitte der 2D-Visualisierung der Objekterkennung zweier beispielhafter Sze-nen mit Darstellung der generierten Hüllkörper sowie der Objekt-IDs

Die Klassifikation von detektierten Objekten als Menschen erfolgt auf Basis der Ausdehnung in der -Ebene und des Volumens der Hüllkörper, wobei von einer konservativen Raumbelegung ausgegangen wird, um aus Sicherheitsgründen alle Menschen als solche einzuordnen. Es werden die Annahmen getroffen, dass sich lediglich erwachsene Personen in der Nähe des zu überwachenden Roboters aufhalten, deren Hüllkörper im stehenden Zustand mindestens einen Radius von 200 mm und eine Höhe von 1.500 mm sowie in der Hocke einen Radius von mindestens 300 mm sowie eine Höhe von 600 mm aufweisen. Zusätzlich wird eine obere Volumengrenze definiert, sodass größere Objekte nicht fälschlicherweise als Menschen kategorisiert werden.

4.2.4 Bereitstellung von Objektdaten an nachgelagerte Programmodule

Die Weitergabe der detektierten Objektdaten an weitere Module des Assistenzsystems sowie externe Programme erfolgt in Abhängigkeit der vorhandenen Schnittstellen auf Basis von XML-Formaten. Die interne Datenübergabe an die weiteren Subsysteme, die Kollisionsvermeidung und die Bahnplanung, sowie an die Robotersteuerung wird hierbei mittels Netzwerk-Sockets realisiert (vgl. Kapitel 4.1.1). Zusätzlich werden die Umgebungsdaten der Arbeitsraumerfassung in Form eines durch Menschen lesbaren Formats als Textdokument zur späteren Weiterverwendung abgespeichert. Die XML-Struktur der Objektdaten basiert auf einer bereits vorhandenen Kommunikationsschnittstelle der Robotersteuerung RSV [289] und wird für den vorliegenden Anwendungsfall erweitert. Bild 34 zeigt die angepasste Schnittstellenbeschreibung zur Übergabe der Umgebungsdaten an die RSV, welche roboterseitig auf Basis von [290] durch Reis Robotics umgesetzt wird, am Beispiel einer Szene mit zwei detektierten Objekten.

```
<scene numberOfObjects="2" error="false" timestamp="20130523T093338.894Z">
      <br/>bvh_object name="Objekt1" type="static" objectNumber="1" frame="39" numberOfElements="1">
                <bvh_element type="box" elementNumber="1" elementClass="1">
                                  <point1>2170.33 1604.53 -1101.92/point1>
                                   <point2>1574.55 1532.47 -1086.66</point2>
                                  <point3>1635.99 1025.44 -1082.12/point3>
                                   <point4>2113.96 1576.82 -3433.83</point4>
                 </bvh_element>
      </bvh object>
      <br/>solution="Objekt2" type="static" objectNumber="2" frame="38" numberOfElements="1">
                 <bvh_element type="box" elementNumber="1" elementClass="1">
                                  <point1>2296.43 -338.267 258.886/point1>
                                   <point2>2699.26 496.523 239.227</point2>
                                  <point3>1948.37 859.19 253.069</point3>
                                  <point4>2255.56 -358.356 -1431.49/point4>
                 </bvh_element>
      </bvh_object>
</scene>
```

Bild 34: XML-basierte Beschreibung des ermittelten Umgebungsmodells zur Weitergabe an die RSV am Beispiel einer Szene mit zwei detektierten Objekten

Die Beschreibung des Umgebungsmodells der Arbeitsraumerfassung enthält im Vergleich zu [289] die zusätzlichen XML-Attribute error, timestamp sowie elementClass, welche das Vorhandensein eines Fehlers und die Systemzeit während der Bildaufnahme sowie die Kategorisierung von Objekten als Personen (*elementClass="1*") angeben. Die bereits vorhandenen Elemente *scene*, bvh_object und bvh_element können zur hierarchischen Strukturierung detektierter Objekte in Form von Hüllkörperhierarchien (engl. "Bounding Volume Hierarchies", BVHs) eingesetzt werden. Auf Grund des gewählten Ansatzes der Arbeitsraumüberwachung, bei der die Kamera die Umgebung senkrecht von oben erfasst, wird jedoch auf eine Detaillierung einzelner Objekte verzichtet. Jedes Element des Typs bvh_object enthält somit lediglich ein Element des Typs bvh element, das in Abhängigkeit des ermittelten höheren Füllgrads eine Oriented-Bounding Box (*type="box"*) oder einen Bounding Cylinder (*type="cylinder"*) und eine damit implizit beinhaltende Sphere-swept Line darstellt. Innerhalb der einzelnen Elemente bvh_element erfolgt die Beschreibung der die Objekte umhüllenden Bounding Volumes anhand ihrer Größen- und Positionsangabe in Weltkoordinaten. Zur internen Verwendung innerhalb des Assistenzsystems wird zudem eine erweiterte XML-Beschreibung des Umgebungsmodells erstellt, welches Bild 35 für das in Bild 34 aufgeführte Beispiel zeigt. Hierfür werden die Objektdaten um weitere ermittelte Attribute, wie die aktuelle und mittlere Geschwindigkeit sowie die Pixelanzahl, ergänzt. Zusätzlich werden jeweils beide generierten Hüllkörpertypen angegeben, sodass die prinzipielle Möglichkeit besteht, auf beide Objektrepräsentationen zurückzugreifen.

```
<scene numberOfObjects="2" error="false" timestamp="20130523T093338.894Z">
                   <br/>

                   speedYwise="0.154263" averageSpeedXwise="-0.0120241" averageSpeedYwise="0.00930277"
                      imageBorder="1" numberOfPixels="542" numberOfRedundantElements="2">
                                                     <bvh_element type="cylinder" elementNumber="1" elementClass="1">
                                                                                                             <startPoint>1917.06 1364.57 -1092.95</startPoint>
                                                                                                            <endPoint>1860.69 1336.85 -3424.86</endPoint>
                                                                                                            <radius>320.718</radius>
                                                                                                             <fillingDegree>0.387059</fillingDegree>
                                                     </bvh element>
                                                     <bvh element type="box" elementNumber="2" elementClass="1">
                                                                                                            <point1>2170.33 1604.53 -1101.92/point1>
                                                                                                            <point2>1574.55 1532.47 -1086.66/point2>
                                                                                                            <point3>1635.99 1025.44 -1082.12/point3>
                                                                                                             <point4>2113.96 1576.82 -3433.83/point4>
                                                                                                            <fillingDegree>0.417581</fillingDegree>
                                                                                                             <principalAxisXwise>-0.120111</principalAxisXwise>
                                                                                                             <principalAxisYwise>0.99276</principalAxisYwise>
                                                     </bvh_element>
                   </bvh object>
                   <br/>

                      speedYwise="-0.00283432" averageSpeedXwise="-0.00179099" averageSpeedYwise="-0.0558202"
                   imageBorder="0" numberOfPixels="2112" numberOfRedundantElements="2">
                                                     <bvh_element type="cylinder" elementNumber="1" elementClass="1">
                                                                                                             <startPoint>2153.6 242.123 255.441</startPoint>
                                                                                                            <endPoint>2112.74 222.033 -1434.93</endPoint>
                                                                                                            <radius>509.274</radius>
                                                                                                             <fillingDegree>0.257083</fillingDegree>
                                                     </bvh element>
                                                     <bvh_element type="box" elementNumber="2" elementClass="1">
                                                                                                             <point1>2296.43 -338.267 258.886</point1>
                                                                                                            <point2>2699.26 496.523 239.227/point2>
                                                                                                            <point3>1948.37 859.19 253.069/point3>
                                                                                                             <point4>2255.56 -358.356 -1431.49/point4>
                                                                                                            <fillingDegree>0.273503</fillingDegree>
                                                                                                            <principalAxisXwise>0.900513</principalAxisXwise>
                                                                                                             <principalAxisYwise>-0.434828</principalAxisYwise>
                                                     </bvh_element>
                   </bvh_object>
```

</scene>

Bild 35: Angepasste Beschreibung des Umgebungsmodells zur internen Verwendung innerhalb des Assistenzsystems am Beispiel der Szene aus Bild 34

4.3 Evaluierung der entwickelten Umgebungserfassung und Möglichkeiten zur weiteren Optimierung

Im Folgenden wird die realisierte Umgebungserfassung des Roboterarbeitsraums zur Detektion von Personen und anderen Hindernissen anhand von Praxistests und geeigneten Visualisierungen evaluiert und diskutiert.

4.3.1 Entwicklung eines Famos-Interface-Plugins zur 3D-Visualisierung

Zu Visualisierungs- und Entwicklungszwecken dient neben einer pixelbasierten 2D- eine umfassendere, jedoch langsamere 3D-Darstellung der aktuellen Szene. Die 2D-Visualisierung wird als Teil einer graphischen Benutzeroberfläche der Arbeitsraumüberwachung zur fortwährenden Veranschaulichung aus der Kameraperspektive umgesetzt. Hierdurch ergibt sich eine direkte Darstellung der Klassifikation einzelner Kamerapixel in unterschiedliche Wahrscheinlichkeitskategorien und Roboterelemente, der berechneten Hüllkörper sowie der Wiedererkennung detektierter Objekte. Beispiele aktueller Szenenausschnitte finden sich in Bild 28, Bild 30 und Bild 33.

Zur umfassenden Veranschaulichung der überwachten Szene dient zusätzlich eine 3D-Visualisierung, wofür grundsätzlich verschiedene Alternativen zur Verfügung stehen. Beispielsweise existieren Open Source-Szenengraphsysteme wie OpenSG oder OpenSceneGraph zur Erstellung eigener, hierarchisch aufgebauter 3D-Szenen. Um jedoch auf die Vorteile einer professionellen Software sowie im Speziellen einer Robotersimulationsumgebung zurückgreifen zu können, wird eine Anbindung an eine kommerzielle 3D-Kinematiksimulations- und Offline-Programmierumgebung umgesetzt. Diese bieten im Gegensatz zu proprietären Lösungen wie ProVis von Reis Robotics oder der 3D-Umgebung der Stäubli Robotics Suite umfassende Bibliotheken zur schnellen Anpassung an Robotertypen verschiedener Hersteller. Leistungsfähige Graphik-Engines ermöglichen gängige, komfortable Bedienmöglichkeiten wie Drehen, Verschieben oder Zoomen und Werkzeuge sowie Peripheriekomponenten können als vorhandene CAD-Objekte relativ einfach eingebunden werden. Neben der reinen Darstellung detektierter Hindernisobjekte können mittels eines 3D-Kinematiksimulators die kollisionsfreien, autonom berechneten Roboterbahnen zusätzlich simuliert werden, was die Integration der einzelnen Teilmodule des Roboter-Assistenzsystems in eine Softwarelösung ermöglicht. Auf Grund der im Vergleich zu anderen 3D-Kinematiksimulationsumgebungen wie beispielsweise DELMIA V5 offenen Programmierschnittstelle sowie der einfachen Bedienbarkeit wird die Softwarelösung Famos robotic V8 ausgewählt, welche die Programmierung benutzerspezifischer Plugins zur Anbindung eigener Anwendungen mittels des Famos-SDK erlaubt. Das realisierte Interface-Plugin wird beim Start der Simulationssoftware geladen und stellt einen zusätzlichen Karteireiter mit einer Reihe von Schaltflächen für verschiedene Funktionen bereit. Unter anderem können auf Basis der Datenschnittstelle der Umgebungserfassung die zuletzt generierten Hüllkörperdaten abgefragt und in Famos dargestellt werden. Die Visualisierung der Bounding Volumes im Szenenmodell erfolgt hierbei unter Nutzung der vom Famos-SDK bereitgestellten Zeichenfunktionen für Quader und Kugeln. Die Geometrie übermittelter Sphere-swept Lines wird auf Grund der fehlenden direkten Unterstützung durch mehrere Kugeln approximiert. Des Weiteren können die Daten der Kamerakalibrierung zur Darstellung der Transformationsbeziehung zwischen Kamera- und Weltkoordinatensystem von der Umgebungserfassung abgerufen werden, um die entsprechenden Koordinatensysteme in Famos automatisch zu erstellen. Da der eingesetzte Reis-Roboter RV30-16 in der Roboterbibliothek von Famos nicht enthalten ist, wird dieser mittels der Robotersimulationssoftware EASY-ROB auf Basis des Datenblatts sowie vom Hersteller Reis Robotics bereitgestellter CAD-Dateien modelliert und anschließend in diese integriert. Die aktuelle Konfiguration des Simulationsmodells wird auf Basis der von der Robotersteuerung abgefragten realen Achswerte bestimmt. Bild 36 zeigt einen Screenshot der Software Famos robotic mit dem zusätzlichen Karteireiter "Szene Objekterkennung". Hierbei sind auf der linken Seite eine beispielhafte Szene einschließlich des gemäß der aktuellen Stellung ausgerichteten Roboters und des Kamerakoordinatensystems sowie auf der rechten Seite der überlagerte Ausschnitt einer Szene mit einem in hellblau dargestellten, durch die Umgebungserfassung detektierten Objekthüllquader zu sehen.

4.3 Evaluierung der entwickelten Umgebungserfassung und Möglichkeiten zur weiteren Optimierung



Bild 36: Für die Robotersimulationssoftware Famos realisiertes Interface-Plugin zur Darstellung der aktuellen Szene sowie Ausschnitt der Visualisierung des Hüllquaders eines detektierten Objekts (rechts im Vordergrund)

4.3.2 Praxistests und Diskussion der Ergebnisse

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Umgebungserfassung werden verschiedene Versuche durchgeführt. Zum einen werden die Grenzen der sicheren Objektdetektion auf Grund der Messfehler des Sensorsystems ermittelt. Es zeigt sich, dass direkt auf dem Boden befindliche Objekte mit einer Höhe von weniger als 10 cm auf Grund des auftretenden Rauschens generell schwer erkennbar sind. Hierbei können auf Grund der Berücksichtigung von Regionen anstelle lediglich einzelner Pixelwerte flächige Gegenstände sicherer detektiert werden, wohingegen dies bei sehr kleinen und niedrigen Objekten teilweise nicht der Fall ist. Ab einer Bodenentfernung von 10 cm werden ein 2 cm breites, längliches Testobjekt, ab 50 cm ein 3 mm breites, längliches Testobjekt und ab 1 m ein Faden mit einem Durchmesser von 1,5 mm dauerhaft und sicher erkannt. Vor allem die aus Sicherheitsgründen wichtige Erkennung von Personen erfolgt auf Grund ihrer Ausdehnung in der *xy*-Ebene des Kamerakoordinatensystems zuverlässig.

Die Bestimmung der Objektpositionen ist abhängig von der Güte der aktuellen Messwerte und der durchgeführten Kamerakalibrierung. Der Einfluss auftretenden Rauschens wird durch die Einbeziehung einer Vielzahl von Pixel, durch die in der Regel Objekte dargestellt werden, reduziert. Die zur sicheren Vermeidung von Kollisionen mit dem Roboter dienenden Hüllkörper werden zur Berücksichtigung aller Messfehler auf Basis der größten auftretenden Entfernungswerte aller zu betrachtenden Pixel sowie zusätzlicher Sicherheitsaufschläge erstellt. Hierbei ist die laterale Genauigkeit höher und durch die Kameraauflösung begrenzt, wohingegen die absoluten Höhenwerte auf Grund der beschriebenen Messfehler von den tatsächlichen Entfernungen um einige Zentimeter abweichen können, was sich in unterschiedlichen Sicherheitsausdehnungen für die *z*- bzw. *x*- und *y*-Richtungen niederschlägt. Eine Reduktion systematischer Messfehler und damit einhergehender enger angepasster Hüllkörper kann durch den wie in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Einsatz von Korrekturverfahren auf Basis aufwendiger Referenzmessungen erfolgen. Da in dieser Arbeit auf die zusätzliche Anwendung eines genaueren Messsystems verzichtet wird, sind die tatsächlichen Abweichungen der Tiefenwerte nicht exakt bekannt. Bis auf eine Anpassung der Sicherheitszuschläge ergäbe sich durch eine mögliche Integration jedoch kein weiterer Änderungsbedarf an der realisierten Umgebungserfassung.

Neben der sicheren Erkennung vorhandener Objekte sollen ebenso Falschdetektionen vermieden werden, um sinnvolle Roboterbewegungen zu ermöglichen. Durch die Berücksichtigung der Differenzwerte von Regionen wird dies erfolgreich für einzelne, fehlerhafte Pixel sowie auf Grund von Schattenwurf hinsichtlich ihres Intensitätswerts veränderte Bildpunkte erreicht. Stark veränderte Umgebungsbedingungen können es jedoch erforderlich machen, die zur Pixelklassifizierung angewandten Schwellwerte sowie die Anzahl der einzubeziehenden Nachbarpixel des Entscheidungsbaums anzupassen. Dies wird bedingt durch die das optische System negativ beeinflussenden und zu fehlerhaften Messwerten führenden Faktoren wie stark reflektierende Oberflächen oder Fremdlicht im Infrarotbereich. Beim eingesetzten 3D-Kamerasystem CamCube 3.0 wird zudem beobachtet, dass gelegentlich ein sich verstärkendes Rauschen eintritt, welches einen Systemneustart bedingt.

Zur Realisierung eines sicheren Systems ist eine hohe Framerate der Objektdetektion notwendig. In der umgesetzten Umgebungserfassung ist diese abhängig von der Anzahl und der Größe detektierter und somit zu verarbeitender Objekte sowie der zu berücksichtigenden Roboterhüllkörper auf Grund dadurch bedingter Iterationen und Rekursionen. Die gemessene Framerate reicht beim eingesetzten System - Fujitsu CELSIUS W480 mit Intel Core i5-660 (3,33 GHz, Dual Core, 4 Threads), 4 GB RAM, Windows 7 - von über 10 Hz bei einem leeren Arbeitsraum und wenig vorhandenen, kleinflächigen Roboterhüllkörpern bis zu lediglich 3 Hz bei mehreren großen Objekten und einer Vielzahl von Roboterpixeln. Zur Sicherstellung einer Roboterreaktion in angemessener Zeit ist auf Grund der möglichen niedrigen Verarbeitungsrate der Arbeitsraumüberwachung die Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters entsprechend zu reduzieren. Alternativ bestehen verschiedene Ansätze zur Erhöhung der Framerate, die im nächsten Teilkapitel dargestellt werden.

4.3.3 Weitere Optimierungsmöglichkeiten

Die bestehende Softwareimplementierung basiert auf dem Einsatz eines Standard-PCs und nutzt einzelne Parallelisierungsmöglichkeiten des C++-Codes mittels der Programmierschnittstelle OpenMP (Open Multi-Processing). Beispielsweise wird die Klassifizierung der Pixel in Wahrscheinlichkeitskategorien in parallelen Threads realisiert. Es existieren jedoch weitere Optimierungsmöglichkeiten durch Parallelisierung nicht voneinander abhängiger Berechnungsschritte bis hin zur Nutzung des Graphikprozessors (engl. "Graphics Processing Unit", GPU). Neben dem generellen Einsatz leistungsfähigerer Prozessoren mit einer großen Anzahl an Rechenkernen ist zudem der Einsatz programmierbarer Hardware wie beispielsweise eines FPGAs (Field Programmable Gate Array) mit konfigurierbaren digitalen Schaltungen denkbar. Diese im Vergleich zu fest verdrahteten, anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen (engl. "Application Specific Integrated Circuit", ASICs) bei geringer Stückzahl deutlich kostengünstigeren und flexibleren Systeme [291] eignen sich beispielsweise zur Differenzbildgenerierung. Auf Grund der relativ aufwändigen Programmerstellung mittels einer Hardwarebeschreibungssprache bietet sich der Einsatz eines FPGAs zur Umsetzung erfolgreich getesteter Algorithmen nach deren Entwicklungsphase an. Entsprechend ist die Übertragung einzelner Verarbeitungsschritte zur deutlichen Beschleunigung der entwickelten Umgebungserfassung im Vergleich zur Ausführung auf einem Universalprozessor denkbar.

Auf Grund des zur Arbeitsraumüberwachung eingesetzten, prototypischen, jedoch zum Zeitpunkt der Auswahl sehr leistungsfähigen und damit hochpreisigen 3D-Sensors kann eine Kostenreduktion durch Verwendung einer günstigeren Tiefenkamera erzielt werden. Für einen Praxiseinsatz sind zudem im Vergleich zum die grundsätzliche Machbarkeit darstellenden Entwicklungssystem alle Sicherheitsaspekte zu erfüllen, welche das Vorhandensein sicherheitsbezogener Sensoren und Steuerungen einschließt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass vor allem im Konsumgüterbereich deutliche Entwicklungssprünge von 3D-Kameras zu verzeichnen sind, die jedoch über keine Sicherheitsfunktionen oder diesbezügliche Angaben, wie Ausfallwahrscheinlichkeiten, verfügen. Des Weiteren muss auch die einzusetzende Software allen Anforderungen bezüglich der Sicherheit (z. B. nach DIN EN 61508-3, DIN EN ISO 13849-1) entsprechen. Zur Ergänzung der bereitgestellten Umgebungsdaten um abgeschattete Bereiche ist zudem die Integration zusätzlicher Sensoren wie Trittmatten denkbar. Der allgemeingültige Ansatz ist auch für die Verwendung anderer Knickarmroboter gültig, wobei neben der Kommunikationsschnittstelle die kinematische und geometrische Modellierung anzupassen sind.

5 Autonome Bahngenerierung für serielle Industrieroboter auf Basis der Zellzerlegung

Die autonome Bewegungsplanung von Industrierobotern dient zur Vermeidung der aufwändigen, kollisionsfreien Programmerstellung bei sich ändernden Umgebungen zur Ermöglichung eines schnelleren und flexibleren Einsatzes. Im Rahmen des Roboter-Assistenzsystems wird ein Verfahren entwickelt, welches auf Basis der bekannten statischen Hindernisse des Arbeitsraums einen Bewegungspfad berechnet, anhand durch die Umgebungserfassung detektierter Objekte dessen Kollisionsfreiheit überprüft und gegebenenfalls eine Neugenerierung der Bahn durchführt. Hierbei wird ein neuartiger Ansatz unter Nutzung der Zellzerlegung des Roboterarbeitsraums am Beispiel des in der Industrie häufig eingesetzten vertikalen Sechsachs-Knickarmroboters mit Zentralhand realisiert. Auszüge sind in [P4] [P5] und [P7] veröffentlicht. Softwaretechnische Implementierungen der autonomen Bahnplanung wurden teilweise im Rahmen von [S3] sowie von Kollisions- und Abstandstests in [S4] umgesetzt.

Bei der Realisierung des neuartigen Pfadplaners werden verschiedene Zielstellungen verfolgt. Als globales Verfahren und in Abgrenzung zur Generierung einer einfachen Ausweichbewegung im drohenden Kollisionsfall wird vor Beginn der eigentlichen Roboterbewegung auf Basis eines vollständigen Umweltmodells ein kollisionsfreier, realisierbarer und hinsichtlich verschiedener Kriterien möglichst optimaler Weg im Arbeitsraum berechnet. Im Unterschied zu Pfadplanern, welche im Konfigurationsraum ablaufen, kann eine aufwändige Bestimmung von Hindernisbereichen anhand von Kollisionstests aller zu berücksichtigender Konfigurationen vermieden werden. Anders als bei probabilistischen Ansätzen sollen unter der Vermeidung unnötiger Bewegungen gezielt Hindernisse umfahren werden, wobei zunächst der direkte Pfad auf Machbarkeit überprüft wird. Bei der Bahnplanung werden im Rahmen der Kollisionsprüfung durch eine geeignete Hüllkörpermodellierung neben der eigentlichen Robotergeometrie ebenfalls die an dieser angebrachte Peripherie und Werkzeuge bzw. Greifer sowie gegebenenfalls gegriffene Werkstücke berücksichtigt. Durch die Einbeziehung aller Konfigurationen für eine vorgegebene Werkzeugpose am Zielpunkt erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Generierung einer gültigen Lösung. Der globale Ansatz führt zur Vermeidung lokaler Minima, anders als beispielsweise bei einem lokalen Potentialfeldverfahren, bedingt jedoch eine steigende Planungszeit, sodass keine Echtzeitfähigkeit erreicht werden kann. Da beim Einsatz als Teil des Assistenzsystems während der Roboterbewegung zusätzlich eine Online-Kollisionsvermeidung die Sicherheit gewährleistet, ist dies

nicht zwingend erforderlich. Zur Reduktion der Komplexität wird das 6Dzunächst auf ein 3D-Problem verringert, indem die Wegplanung für den Werkzeugarbeitspunkt (engl. "Tool-Center-Point", TCP) erfolgt und anschließend auf den kompletten Roboterarm erweitert wird. Durch eine komplette Neuberechnung bei veränderten Umgebungssituationen ist das Verfahren den Single-Query-Planern zuzuordnen.

5.1 Ein generalisiertes Verfahren zur autonomen Roboterpfadplanung mittels Zellzerlegung des Arbeitsraums

Das autonome Bahnplanungsverfahren ist als genereller Ansatz konzipiert, der nicht nur auf den konkreten Anwendungsfall des vertikalen Sechsachs-Knickarmroboters, sondern auch auf andere Robotertypen angewandt werden kann. Vor der Detaillierung des Planers erfolgt deshalb zunächst die Beschreibung des allgemeingültigen Konzepts.

5.1.1 Die approximative Zellzerlegung als Grundlage des Verfahrens

Zur Generierung eines Pfads im vollständig zur Verfügung stehenden Roboterarbeitsraum ist dieser durch eine geeignete Repräsentationsform abzubilden, welcher eine effiziente Kollisionsprüfung mit Umgebungsobjekten ermöglicht. Bild 37 fasst eine Auswahl der wichtigsten, zur Verfügung stehenden geometrischen Modellierungsansätze zusammen, auf die in dieser Arbeit teilweise bereits eingegangen wurde.



Bild 37: Modellierungsformen zur Repräsentation des dreidimensionalen Raums unter Verwendung von [141] und [243] (k-d = k-dimensional)

Die beiden grundsätzlichen, zur Kollisionsprüfung geeigneten räumlichen Datenstrukturen gliedern sich nach [141] in Verfahren der Raumpartitionierung sowie in Hüllkörperhierarchien, wobei erstere rekursiv den Raum und

letztere das Objekt selbst aufteilen. Werden durch die Umgebungserfassung keine neuen Hindernisse detektiert, sind neben den beweglichen Roboterelementen zum Ausschluss einer Selbstkollision lediglich bekannte statische Objekte wie beispielsweise der Robotersockel zu berücksichtigen. Zur zeiteffizienten Ermittlung freier Bereiche des Arbeitsraums bietet sich deshalb eine hierarchische Partitionierung mittels einer Baumstruktur an, bei der im Vergleich zur Verwendung eines festen Gitters größere Freiräume nicht detaillierter betrachtet werden müssen. Da die Planung des TCP-Pfads im dreidimensionalen Raum erfolgt, wird zu dessen einfacher Modellierung ein 2³-Baum, ein Oktree, unter der Nutzung gleichförmiger kubischer Zellen eingesetzt. Hierdurch wird in den meisten Fällen der vorhandene Roboterarbeitsraum nicht exakt aufgeteilt, sodass die Grundlage des entwickelten Verfahrens die bekannte approximative Zellzerlegung darstellt (vgl. Kapitel 2.2.1). Auf Basis aller bekannten statischen sowie dynamischen Objekte erfolgt eine hierarchische Aufteilung des durch eine geeignete Startzelle abzubildenden Raums bis zu einem vordefinierten Zerlegungsgrad oder dem Erreichen eines vollständig freien bzw. durch Hindernisse belegten Zustands aller Zellen. Der Zerlegungsgrad ist in Abhängigkeit der Größe der Startzelle und dadurch die Ausdehnung der kleinsten Zelle und die minimale Raumauflösung festzulegen. Im Vergleich zur in Kapitel 4 beschriebenen Umgebungserfassung wird zur besseren Veranschaulichung das Weltkoordinatensystem K_{Welt} (= K_W) so definiert, dass sich dessen Ursprung in einer Ecke der Startzelle befindet und dessen positive Achsrichtungen die Kantenrichtungen definieren. Bild 38 zeigt die angewandte hierarchische Oktreezerlegung für eine beispielhafte Umgebungssituation, bei der auf Grund der exakten Positionierung der Hindernisse innerhalb der einzelnen Zellen nach drei Zerlegungsschritten lediglich die Zelle 212 weiter zu zerlegen ist.

Die Startzelle der Zerlegung wird so definiert, dass sie den vollständigen Roboterarbeitsraum und damit alle theoretisch erreichbaren TCP-Posen im Rahmen der Pfadplanung abbildet. Um auf Grund der Geometrie des Roboters nicht erreichbare Regionen der Startzelle von der weiteren Planung auszuschließen, was durch den Einsatz der approximativen Zellzerlegung prinzipiell auftreten könnte, wird für den konkreten Anwendungsfall des Sechsachs-Knickarmroboters dessen Arbeitsraum mittels eines geometrisch einfachen Bounding Volumes approximiert. Schneiden sich die ersten beiden Roboterachsen nicht, wie im Fall des Reis-Roboters RV30-16, werden erreichbare Punkte des Arbeitsraums zunächst ohne Berücksichtigung von Achsbegrenzungen durch einen **Sphere-swept Circle (SSC)** modelliert, dessen Form sich durch die Bewegung einer Kugel über eine Kreisfläche ergibt.



Bild 38: Beispielhafte hierarchische Zellzerlegung mit Zellennummerierung (links), angewandtem Nummerierungsschema (rechts oben) und zugehörigem Oktree (rechts unten) in Anlehnung an [P4]

Das Hüllvolumen des SSCs umfasst einen größeren Bereich als die eigentlich auf Basis der Robotergeometrie realisierbaren Posen hinsichtlich der ersten beiden Achsen, die einem Torus entsprechen würden. Auf Grund der deutlichen Komplexitätsreduzierung der Überlappungstests rechtfertigt sich jedoch der Einsatz eines SSCs. Schneiden sich wie im Fall des TX6oL die ersten beiden Bewegungsachsen, wird als vereinfachte Approximation des Arbeitsraums eine Hüllkugel herangezogen. Bild 39 zeigt die auf Basis des Roboterarbeitsraums modellierte Startzelle eines Reis-Roboters (links), eine einzelne, für die aktuelle Roboterkonfiguration gültige Kugel als Teilmenge des gesamten SSC-Hüllvolumens (Mitte) sowie ein beispielhaftes, mittels einer AABB modelliertes statisches Hindernis (rechts) anhand der Visualisierungssoftware ProVis von Reis Robotics.



Bild 39: Modellierung der Startzelle auf Basis des Roboterarbeitsraums (links), SSC-Kugel des Arbeitsraums für die aktuelle Roboterkonfiguration (Mitte) sowie ein beispielhaftes, mittels AABB approximiertes statisches Hindernis (rechts) [S₃]

5.1.2 Bestimmung kollisionsfreier Zellen im Arbeitsraum des Roboters zur Generierung von TCP-Pfaden

Zur Bestimmung kollisionsfreier Bereiche des Roboterarbeitsraums sind Überschneidungstests zwischen den die einzelnen Oktreezellen darstellenden, kubischen Axis-Aligned Bounding Boxes (AABBs) und den die Hindernisse repräsentierenden Hüllkörpertypen notwendig. Da zur einfachen Modellierung erkannter Objekte durch die Umgebungserfassung OBBs (Oriented-Bounding Boxes) und SSLs (Sphere-swept Lines), zur Angabe statischer Hindernisse AABBs, OBBs und Kugeln sowie zur Approximation des Roboterarbeitsraums Hüllkugeln bzw. SSCs (Sphere-swept Circles) eingesetzt werden, ergeben sich Überlappungstests aus den entsprechenden Kombinationen mit einer AABB, die im Folgenden dargestellt werden.

Überschneidungstest zwischen einer AABB und dem Arbeitsraum-SSC

Zur Überprüfung, ob die einzelnen durch die Oktreezerlegung auf Basis der bekannten Hindernisse entstehenden Zellen innerhalb des Arbeitsraums des Roboters liegen oder gegebenenfalls weiter aufzuteilen sind, wird zunächst ein Überschneidungstest zwischen einem den Arbeitsraum abschätzenden SSC und einer die einzelnen Oktreezellen darstellenden, kubischen Axis-Aligned Bounding Box (AABB) entwickelt. Tabelle 9 listet die verschiedenen zu überprüfenden Überschneidungsfälle auf.

Fälle	Überdeckung SSC/AABB	M _{Circle} -Lage	Lage der Oktreezelle
Fall 1: Vollständige Überdeckung	SSC überdeckt AABB vollständig	Fall 1a: <i>M_{Circle}</i> liegt innerhalb der AABB	Oktreezelle vollständig im Arbeitsraum des Roboters
		Fall ıb: <i>M_{Circle}</i> liegt außerhalb der AABB	
Fall 2: Vollständige Überdeckung	AABB überdeckt SSC vollständig	<i>M_{Circle}</i> liegt innerhalb der AABB	Oktreezelle nicht vollstän- dig innerhalb des Arbeits- raums, weitere Aufteilung
Fall 3: Teilweise Überschneidung	AABB und SSC überschneiden sich teilweise	Fall 3a: <i>M_{Circle}</i> liegt innerhalb der AABB	
		Fall 3b: <i>M_{Circle}</i> liegt außerhalb der AABB	
Fall 4: Berührung	AABB und SSC berühren sich	M _{Circle} liegt außerhalb	Oktreezelle vollständig außerhalb des Arbeits- raums, nicht anfahrbar
Fall 5: Keine Überschneidung	AABB und SSC über- schneiden sich nicht	der AABB	

Tabelle 9: Zu überprüfende Fälle des AABB-SSC-Überschneidungstests

Da der Grundkreis des SSCs parallel zur xy-Ebene des Weltkoordinatensystems liegt und somit beide Hüllkörper an dessen Achsen ausgerichtet sind (siehe Bild 40), handelt es sich eigentlich um einen Spezialfall eines Tests einer kubischen AABB mit einem AASSC (Axis-Aligned Sphere-swept Circle), der jedoch auf einen generellen SSC verallgemeinert werden kann. Bild 40 veranschaulicht die AABB-SSC-Überschneidungsprüfung für den Fall 5, bei dem keine Überlappung auftritt. Für den Einsatz des SSCs als Approximation des Arbeitsraums für die betrachteten Roboterkinematiken wird davon ausgegangen, dass der Radius der SSC-Kugel r_{sphere} größer als der des SSC-Grundkreises r_{circle} ist.



Bild 40: Überschneidungstest zwischen einem Sphere-swept Circle (SSC) und einer Axis-Aligned Bounding Box (AABB) für den Fall 5 ohne Überdeckung

Zunächst werden zur weiteren Berechnung in einem gemeinsamen Bezugssystem die Koordinaten des SSC-Grundkreismittelpunktes M_{Circle} ins lokale Koordinatensystem K_{AABB} , das im Mittelpunkt der AABB liegt, transferiert. Anschließend wird der zu M_{Circle} auf der AABB nächste Punkt A gemäß des in [243] beschriebenen Vorgehens ermittelt. Hierbei werden zum Erhalt des Punktes A die Koordinaten des Punktes M_{Circle} einfach auf die minimalen bzw. maximalen AABB-Koordinaten gesetzt, falls die Koordinaten des Punktes M_{Circle} kleiner bzw. größer als diese sind.

Befindet sich M_{Circle} innerhalb der AABB, entspricht $A = M_{Circle}$. In diesem Fall wird zur Überprüfung einer vollständigen oder teilweisen Überdeckung durch einen der beiden Hüllkörper (Fall 1a, 2 oder 3a) für alle acht AABB-Eckpunkte E_i mit $i = 1 \dots 8$ bestimmt, ob ihr kürzester Abstand zur aus dem

SSC-Grundkreis definierten Ebene größer als der SSC-Kugelradius r_{Sphere} ist. Dieser Abstand ergibt sich direkt aus der Differenz der *z*-Koordinaten von E_i und M_{Circle} , da sowohl die AABB als auch der SSC durch die Orientierung seines Grundkreises an den Koordinatenachsen des Bezugsystems ausgerichtet sind. Ist dies für alle Eckpunkte der Fall, wird zusätzlich überprüft, ob jeweils die absolute Differenz der *x*- und *y*-Koordinaten zwischen M_{Circle} und E_i die Summe aus r_{Circle} und r_{Sphere} übersteigt. Trifft dies für alle E_i ebenfalls zu, umschließt die AABB den SSC vollständig (Fall 2) wie Bild 41 links illustriert, sodass diese nicht vollständig innerhalb des Arbeitsraums liegt und eine weitere Aufteilung der Oktreezelle erfolgt.



Bild 41: Überschneidungstest zwischen einem Sphere-swept Circle (SSC) und einer Axis-Aligned Bounding Box (AABB) für den Fall 2 einer vollständigen Überdeckung des SSC durch die AABB (links) und den Fall 3a einer teilweisen Überschneidung (rechts)

Zur Unterscheidung der Fälle 1a oder 3a wird für alle AABB-Eckpunkte E_i zunächst abgefragt, ob jeweils die absolute Differenz zwischen ihren x- und y-Koordinaten und M_{Circle} den Radius des SSC-Grundkreises r_{Circle} unterschreitet. Ist dies der Fall und ebenfalls ihr kürzester Abstand zur aus dem SSC-Grundkreis definierten Ebene kleiner als der SSC-Kugelradius r_{Sphere} , befindet sich die AABB vollständig innerhalb der SSC (Fall 1a), was durch die Oktree-AABB (2) in Bild 42 links skizziert ist. Trifft die zweite Bedingung nicht zu, handelt es sich um eine teilweise Überschneidung (Fall 3a), die Bild 41 rechts anhand der Oktree-AABB (2) beispielhaft darstellt. Liegt ein Eckpunkt der AABB jedoch bereits außerhalb des durch den SSC-Grundkreis abgedeckten Bereichs, d. h. bei mindestens einem E_i wird bei der absoluten Differenz zwischen dessen x- und y-Koordinate und M_{Circle} der Radius r_{Circle} überschritten (siehe Oktree-AABB (1) in Bild 42 links sowie Oktree-AABB (1) in Bild 41 rechts), ist eine aufwändigere Überprüfung zur Unterscheidung der Fälle 1a oder 3a notwendig.

Durch Setzen ihrer z-Koordinaten auf den Wert von M_{Circle} werden die vier AABB-Eckpunkte E_i , welche die größere Distanz zu M_{Circle} in der xy-Ebene aufweisen, senkrecht in die Ebene des SSC-Grundkreises projiziert, was die Punkte C_i ergibt (siehe Bild 41 rechts und Bild 42 links jeweils für die Oktree-AABB (1)). Anschließend werden die zu den Punkten C_i nächsten Punkte B_i auf dem SSC-Grundkreis, die sich im Schnittpunkt der Strecke $\overline{M_{Circle}C_i}$ und der Kreislinie des SSC-Grundkreises befinden, ermittelt. Diese berechnen sich jeweils aus der Addition eines aus der Richtung des Vektors $\overline{M_{Circle}C_i}$ und dem Betrag r_{Circle} bestehenden Vektors mit dem Ortsvektor von M_{Circle} . Anschließend wird anhand der quadrierten Werte zur Vermeidung einer aufwändigeren Wurzelberechnung überprüft, ob für alle vier betrachteten Eckpunkte $|\overline{B_i E_i}| \leq r_{Sphere}$ gilt und damit eine vollständige Überdeckung der AABB durch die SSC (Fall 1a) vorliegt (siehe Bild 42 links für die Oktree-AABB (1)). Übersteigt hingegen der Betrag einer der Vektoren $\overline{B_i E_i}$ den Radius der SSC-Kugel r_{sphere}, überschneiden sich beide Hüllkörper (Fall 3a) wie Bild 41 rechts für die Oktree-AABB (1) darstellt.



Bild 42: Überschneidungstest zwischen einem Sphere-swept Circle (SSC) und einer Axis-Aligned Bounding Box (AABB) für den Fall 1 einer vollständigen Überdeckung der AABB durch den SSC

Liegt M_{Circle} außerhalb der AABB, sind die Fälle 1b, 3b, 4 und 5 zu unterscheiden. Hierzu wird, ähnlich zu der beschriebenen Vorgehensweise zur Unterscheidung der Fälle 1a und 3a, der zu M_{Circle} auf der AABB nächste Punkt A senkrecht in die Ebene des SSC-Grundkreises projiziert, was den Punkt C ergibt (siehe Bild 40 und Bild 42 rechts). Anschließend wird ebenfalls der zum

Punkt *C* nächste Punkt *B* auf dem SSC-Grundkreis berechnet, indem ein aus der Richtung des Vektors $\overline{M_{Circle}}$ und dem Betrag r_{Circle} bestehender Vektor zum Ortsvektor von M_{Circle} addiert wird. Gilt $|\overrightarrow{BA}| > r_{Sphere}$, liegt die AABB-Zelle vollständig außerhalb des Roboterarbeitsraums (Fall 5) wie Bild 40 zeigt und kann nicht zur weiteren Pfadplanung herangezogen werden. Entspricht die Länge des Vektors \overrightarrow{BA} genau dem Radius r_{Sphere} , berühren sich beide Hüllkörper (Fall 4). Eine Unterscheidung einer teilweisen (Fall 3b) und vollständigen Überdeckung (Fall 1b) erfolgt im Fall von $|\overrightarrow{BA}| < r_{Sphere}$ entsprechend der Vorgehensweise zur Unterscheidung der Fälle 1a und 3a durch Ermittlung der vier Punkte B_i und eine zusätzliche Abfrage zwischen dem Betrag der jeweiligen Vektoren $\overrightarrow{B_iE_i}$ und r_{Sphere} . Gilt für alle vier betrachteten Eckpunkte $|\overrightarrow{B_iE_i}| \leq r_{Sphere}$, liegt eine vollständige Überdeckung der AABB durch den SSC vor (Fall 1b, siehe Bild 42 rechts), ansonsten Fall 3b einer teilweisen Überlappung. In allen genannten Fällen der Überschneidung ist eine weitere Zerlegung der AABB-Zelle durchzuführen.

Überschneidungstest zwischen einer AABB und einer (Arbeitsraum-) Kugel

Wird der Roboterarbeitsraum anstelle eines SSCs durch eine Kugel approximiert, vereinfacht sich die Überschneidungsberechnung mit einer AABB. Analog zum Vorgehen des AABB-SSC-Tests werden die Koordinaten des Kugelmittelpunktes M_{Sphere} ins lokale Koordinatensystem der AABB K_{AABB} transferiert und der zum Kugelmittelpunkt nächste Punkt A auf der AABB gemäß der in [243] beschriebenen Vorgehensweise berechnet.

Befindet sich der Kugelmittelpunkt M_{Sphere} außerhalb der AABB und gilt somit $A \neq M_{Sphere}$, kann auf Basis des quadrierten Kugelradius r_{Sphere} im Vergleich zur quadrierten Entfernung zwischen den Punkten M_{Sphere} und Aeine Kollision zwischen der AABB und der Kugel überprüft werden (Fall 1b, 3b, 4 bzw. 5 nach Tabelle 9, wobei die Arbeitsraumkugel dem SSC und der Kugelmittelpunkt M_{Sphere} dem Mittelpunkt des SSC-Grundkreises M_{Circle} entsprechen). Im Fall von $|\overline{M_{Sphere}A}| < r_{Sphere}$ erfolgt eine Unterscheidung der Fälle 1b und 3b durch eine zusätzliche Abfrage zwischen dem Betrag der Vektoren $\overline{M_{Sphere}E_i}$ und r_{Sphere} . Trifft $|\overline{M_{Sphere}E_i}| < r_{Sphere}$ für alle E_i zu, liegt Fall 1b einer vollständigen, ansonsten Fall 3b einer teilweisen Verdeckung vor. Analog zum AABB-SSC-Test berühren sich beide Hüllkörper (Fall 4), falls die Länge des Vektors $\overline{M_{Sphere}A}$ genau dem Radius r_{Sphere} entspricht. Gilt $|\overline{M_{Sphere}A}| > r_{Sphere}$, liegt die AABB-Zelle vollständig außerhalb der Arbeitsraumkugel (Fall 5).

Falls sich der Kugelmittelpunkt M_{Sphere} innerhalb der AABB befindet und somit $A = M_{Sphere}$ gilt, wird überprüft, ob eine teilweise (entsprechend Fall

3a) oder vollständige Überdeckung (Fall 1a oder 2) durch einen der beiden Hüllkörper vorliegt. Hierzu werden die Abstände aller acht AABB-Eckpunkte E_i mit $i = 1 \dots 8$ zu M_{Sphere} in x-, y-, und z-Richtung mit dem Kugelradius r_{Sphere} verglichen. Übersteigen diese für alle E_i in den drei Achsrichtungen jeweils den Kugelradius r_{Sphere} , umschließt die AABB die Kugel vollständig (Fall 2). Trifft dies nur für einige Eckpunkte E_i zu, besteht eine teilweise Verdeckung beider Hüllkörper (Fall 3a). Unterschreiten hingegen die Abstände der acht AABB-Eckpunkte jeweils in allen drei Achsrichtungen den Kugelradius, ist zusätzlich zu überprüfen, ob der Betrag des Abstandsvektors zwischen allen E_i und dem Kugelmittelpunkt kleiner als der Kugelradius, d. h. $|\overline{E_iM_{Sphere}}| < r_{Sphere}$, ist. Sind beide Bedingungen erfüllt, handelt es sich um eine vollständige Überdeckung der AABB durch die Kugel (Fall 1a), anderenfalls um eine teilweise Überschneidung (Fall 3a).

Der für die Zellzerlegung notwendige Überschneidungstest zwischen einer Oktree-AABB und einer Kugel, die ein statisches Hindernis repräsentiert, kann als Teil dieser Prüfung angesehen werden. Hierbei ist lediglich von Interesse, ob die AABB durch die Hindernis-Kugel vollständig oder teilweise belegt oder komplett frei ist. Die Ermittlung einer vollständigen Überdeckung der Kugel durch die AABB ist nicht relevant und der teilweisen Belegung der AABB zuzuordnen.

AABB-AABB-Überschneidungstest

Für den Überschneidungstest zwischen einer Oktree-AABB und einem durch eine AABB dargestellten statischen Hindernis sind ebenfalls die Fälle einer vollständigen, teilweisen sowie keiner Überdeckung zu unterscheiden, wobei nur bei einer teilweisen Überlappung eine weitere Aufteilung der Zelle erfolgt. Die einfache Kollisionsprüfung zwischen zwei AABBs beruht auf dem direkten Vergleich ihrer Koordinatenwerte auf Grund der gleichen Orientierung beider Quader [243]. Bei der verwendeten Repräsentation wird eine AABB durch einen Mittelpunkt M_{AABB} und Halblängen r_{AABB} entlang der drei Raumrichtungen definiert. Zunächst wird getestet, ob eine teilweise Überschneidung der Hüllkörper auftritt. Dies ist nur dann der Fall, wenn beide AABBs in allen drei Achsrichtungen überlappen [243]. Anderenfalls ist mindestens eine sogenannte separierende Achse vorhanden wie die x_{Welt} -Achse in Bild 43 links. Hierbei ist der absolute Abstand der AABB-Mittelpunkte größer als die Summe der Halblängen in der entsprechenden Achsrichtung $|M_{AABB_{2x}} - M_{AABB_{1x}}| > r_{AABB_{2x}} + r_{AABB_{1x}}$.

Bilden weder die x_{Welt} -, die y_{Welt} - noch die z_{Welt} -Achsrichtung eine separierende Achse, besteht eine teilweise Überschneidung oder komplette Überdeckung beider Hüllköper. Eine vollständige Überdeckung der Oktree-AABB durch eine Hindernis-AABB wird anhand ihrer jeweiligen Mittelpunkte und Ausdehnungen überprüft. Eine Überdeckung liegt vor, falls für alle drei positiven Achsrichtungen die Summen aus Mittelpunktkoordinaten M_{AABB} und Halblängen r_{AABB} der Hindernis-AABB die der Oktree-AABB übersteigen (siehe Bild 43 rechts für die *x*- und *z*-Achsen) und für alle drei negativen Achsrichtungen die Summen aus Mittelpunktkoordinaten M_{AABB} und negativen Halblängen r_{AABB} der Hindernis-AABB die der Oktree-AABB und negativen Halblängen r_{AABB} der Hindernis-AABB die der Oktree-AABB unterschreiten.



Bild 43: AABB-AABB-Überschneidungstest ohne Überschneidung (links) und mit vollständiger Überdeckung der Oktree-AABB durch die Hindernis-AABB (rechts)

AABB-OBB-Überschneidungstest

Falls das Hindernis durch eine Oriented-Bounding Box (OBB) dargestellt wird, sind im Rahmen der Zellzerlegung dieselben Fälle wie beim AABB-AABB-Test zu berücksichtigen (Oktree-AABB vollständig/ teilweise belegt oder komplett frei). Bei der verwendeten Repräsentation wird eine OBB durch einen Mittelpunkt M_{OBB} , eine Orientierungsmatrix R_{OBB} sowie die Halblängen r_{OBB} entlang dieser drei Raumrichtungen definiert. Zur Berechnung in einem gemeinsamen Bezugssystem wird die AABB in das Koordinatensystem der OBB K_{OBB} überführt [243]. Hierfür wird die Inverse der OBB-Orientierungsmatrix $[R_{OBB}]^{-1}$ mit dem Translationsvektor zwischen den Mittelpunkten der OBB und der AABB $\vec{t} = M_{AABB} - M_{OBB}$ sowie mit der AABB-Orientierungsmatrix R_{AABB} , die der des Weltkoordinatensystems entspricht, multipliziert:

$$\vec{t}^{(OBB)} = [R_{OBB}]^{-1} \cdot \vec{t}^{(Welt)} = {}^{Welt}_{OBB} R_{OBB} \cdot \vec{t}^{(Welt)}$$
(5.1)

$$R_{AABB}^{(OBB)} = [R_{OBB}]^{-1} \cdot R_{AABB}^{(Welt)} = \underset{OBB}{Welt} R_{OBB} \cdot R_{AABB}^{(Welt)}$$
(5.2)

Zur Überschneidungsprüfung zwischen den beiden Hüllkörpern wird der sogenannte **Separating-Axis-Test (SAT)** in der Darstellung von [243] eingesetzt, der besagt, dass zwei konvexe Objekte (1) und (2) nicht kollidieren,

wenn eine trennende Hyperebene *P* existiert und damit die senkrechten Projektionen beider Körper auf eine zu *P* senkrechte Achse - die trennende oder separierende Achse *L* - sich nicht überlappen [243]. Auf Grund der Symmetrie von OBBs und AABBs ist somit die Summe der Halblängen ihrer Projektionsintervalle r_1 und r_2 kleiner als der auf *L* projizierte Abstand der beiden Mittelpunkte $|\vec{t} \cdot \vec{L}|$ wie in Bild 44 links dargestellt [243]:

$$\left|\vec{t} \cdot \vec{L}\right| > r_1 + r_2 \tag{5.3}$$

Anders als beim AABB-AABB-Test, bei dem nur die drei Achsen des Weltkoordinatensystems als mögliche trennende Achsen in Frage kommen, erhöht sich die Anzahl der maximal zu überprüfenden trennenden Achsen bei zwei OBBs (bzw. im vorliegenden Fall einer OBB und einer AABB als speziellen Form einer OBB) auf 15. Sechs mögliche separierende Achsen ergeben sich aus den jeweiligen drei lokalen Achs- und damit den Normalenrichtungen der Seitenflächen beider OBBs, womit berücksichtigt wird, dass zwei Seitenflächen oder eine Seitenfläche und eine Kante die nächsten Kontaktpaare der Quader darstellen [243]. Die weiteren neun Möglichkeiten resultieren aus allen Kreuzproduktkombinationen der drei lokalen Achsrichtungen beider OBBs, die damit zu diesen jeweils senkrechte Richtungen bilden, wodurch der Fall zweier nächster Kanten einschließlich Ecken abgedeckt wird [243].



Bild 44: AABB-OBB-Überschneidungstest ohne Überschneidung auf Grund einer separierenden Achse L (links) und mit vollständiger Überdeckung der Oktree-AABB durch die Hindernis-OBB (rechts)

Wird eine separierende Achse gefunden, liegt keine Überschneidung zwischen der AABB und der OBB vor und der SAT kann sofort beendet werden. Gibt es jedoch bei der Projektion auf alle in Frage kommenden 15 Achsrichtungen eine Überlappung, kollidieren beide Körper.

Um eine vollständige Überdeckung der AABB durch das OBB-Hindernis zu testen (siehe Bild 44 rechts), werden die Koordinaten aller acht AABB-Eckpunkte E_i im OBB-Koordinatensystem K_{OBB} berechnet ($E_i^{(OBB)}$) und überprüft, ob sie innerhalb der OBB-Ausdehnungen r_{OBB} in allen drei Achsrichtungen liegen. Trifft dies auf alle Eckpunkte der AABB zu, ist die Zelle durch das Hindernis komplett belegt, anderenfalls lediglich zum Teil.

AABB-SSL- bzw. AABB-Zylinder-Überschneidungstest

Zur Überschneidungsprüfung zwischen einer Oktree-AABB und einem an der z-Achse des Weltkoordinatensystems ausgerichteten Sphere-swept Line (SSL)-Hindernis wird die Tatsache genutzt, dass die durch die Umgebungserfassung erstellten SSLs auf den ermittelten Hüllzylindern basieren und die hinzugefügten Halbkugeln keine weiteren Objektbestandteile beinhalten, sodass die Betrachtung auf eine Zylinderform reduziert werden kann. In der Regel sind Kollisionsprüfungen mit Zylindern sehr aufwändig und werden deshalb möglichst gemieden. Auf Grund der Ausrichtung sowohl des Zylinder-Hindernisses als auch der AABB an der z-Achse vereinfacht sich jedoch der durchzuführende Überschneidungstest. Zunächst wird anhand der Ausdehnungen der AABB und des Zylinders überprüft, ob die z-Achse eine separierende Achse ist wie in Bild 45 links dargestellt. Trifft dies nicht zu, erfolgen zum schnellen Kollisionsausschluss eine Approximation des Zylinders durch eine AABB und ein darauf basierender Überlappungstest mit der Oktree-AABB. Hierdurch können die Fälle abgedeckt werden, bei denen die y- oder x-Achse als trennende Achse dienen, wie Bild 45 rechts für die Oktree-AABB (2) zeigt.

Alle weiteren in Bild 45 rechts skizzierten Fälle der Oktree-AABB (3) bis (5) werden anhand der Lage der vier AABB-Eckpunkte E_i mit $i = 1 \dots 4$ geprüft, falls der AABB-AABB-Test zu einer Überschneidung führt. Der Vergleich zwischen dem Abstand der vier Eckpunkte und dem Mittelpunkt des Zylinders $|E_i - M_{Zylinder}|$ mit dem Zylinderradius $r_{Zylinder}$ in der xy-Ebene ergibt, ob eine tatsächliche, teilweise Überschneidung mit dem Zylinder vorliegt (4) oder lediglich mit dessen Approximation (3). Gilt $|E_i - M_{Zylinder}| \le r_{Zylinder}$ für alle vier Eckpunkte E_i in der xy-Ebene und ist zusätzlich der Abstand der beiden Eckpunkte E_i mit i = 1, 5 zum Mittelpunkt des Zylinders in z-Richtung kleiner bzw. gleich der Zylinderausdehnung $r_{Zylinder_z}$, überdeckt das Zylinder-Hindernis die Oktree-AABB vollständig (5).



Bild 45: Überschneidungstest zwischen einer AABB und einem z-Achsen orientierten Zylinder ohne Überschneidung auf Grund der separierenden z-Achse (links) sowie vier weitere, zu überprüfende Fälle (2) bis (5) (rechts) unter Nutzung von [S4]

Falls eine zu große Ungenauigkeit der *z*-Achsen-Ausrichtung zwischen der AABB-Zelle und dem SSL- bzw. Zylinderhindernis auf Grund der Kalibrierung zwischen dem Kamera- und dem Roboterbasiskoordinatensystem besteht, ist der dargestellte Test in dieser Form nicht direkt verwendbar. Die übermittelten Hindernishüllkörper können zur Kompensation erweitert und gemäß der *z*-Achse ausgerichtet oder es kann auf die in Kapitel 5.2.2 beschriebene Kollisionsprüfung zwischen allgemeinen OBBs und SSLs zurückgegriffen werden.

5.1.3 Standardsuchverfahren zur Ermittlung kurzer Bewegungsbahnen

Die Oktreezerlegung der Arbeitsraumzelle auf Basis aller statischen und dynamischen Hindernisse bis zum definierten Zerlegungsgrad ergibt die theoretisch für einen punktförmigen Roboter kollisionsfrei erreichbaren Regionen. Sind bereits die Start- oder Zielzelle, welche die Ausgangs- bzw. Endpose des Roboter-TCPs beinhalten, teilweise oder vollständig belegt, kann kein gültiger Pfad ermittelt werden. Anderenfalls wird ein ungerichteter Zusammenhangs- bzw. Nachbarschaftsgraph mit allen freien Zellen als Knoten erstellt, die bei einer direkten Nachbarschaft über Kanten miteinander verbunden werden. Da von einer gewissen Mindestausdehnung des Werkzeuges ausgegangen wird, werden nur die Zellen als Nachbarn berücksichtigt, bei denen jeweils zwei Seitenflächen aufeinander treffen.

Zum schnellen Auffinden eines möglichst kurzen Weges zwischen dem Startund Zielknoten bieten sich verschiedene informierte Graphsuchverfahren an, welche problemspezifisches Wissen, meist in Form von heuristischen Funktionen, zur Lösung einsetzen [292]. Dadurch kann der Suchaufwand im Gegensatz zu uninformierten Suchverfahren, wie beispielsweise der Tiefen- oder Breitensuche, welche lediglich Nachfolgeknoten expandieren und dahingehend überprüfen, ob sie das Ziel der Suche darstellen, erheblich reduziert werden [292] [293]. Ein bekanntes informiertes, heuristisches Suchverfahren ist der A*-Algorithmus. Er ist vollständig, d. h. er findet immer eine Lösung, falls diese existiert, und optimal, da eine gefundene Lösung die niedrigsten Kosten, z. B. hinsichtlich der kürzesten Weglänge, aufweist [293]. Der A*-Algorithmus nutzt die heuristische Bewertungsfunktion f(s) = g(s) + h(s), wobei die Kostenfunktion g(s) die tatsächlichen Kosten vom Start- bis zum aktuellen Knoten s und die heuristische Kostenschätzfunktion h(s) die geschätzten Kosten vom aktuellen Knoten s zum Zielknoten bezeichnen [293], und kann damit als Erweiterung des ebenfalls optimalen, jedoch gegebenenfalls weniger zeit- und speichereffizienten Dijkstra- um den heuristischen Greedy-Algorithmus aufgefasst werden. Der Dijkstra-Algorithmus wählt den jeweils zum aktuellen Zeitpunkt kostengünstigsten Folgeknoten lediglich auf Basis der bisherigen Pfadkosten g(s) mittels der Bewertungsfunktion f(s) = g(s) aus, wohingegen die Auswahl des **Greedy-Algorithmus**, des "Gierigen Algorithmus", auf dem kostengünstigsten Folgeknoten beruht [293]. Dieser wird über die heuristische Bewertungsfunktion f(s) = h(s)unter Nutzung der geschätzten Kosten zum Ziel h(s) bestimmt, wobei diese die tatsächlichen Kosten nicht überschätzen dürfen [293]. Eine zulässige Heuristik für Entfernungen, bei welcher der tatsächliche niemals kürzer als der geschätzte Weg sein kann, stellt der euklidische Abstand dar [293]. Eine weitere bekannte Heuristik ist beispielsweise die Manhattan-Distanz.

Es gibt verschiedene Erweiterungen des A*-Algorithmus zur Reduktion des Zeit- und Speicherbedarfs auf Kosten der Wegoptimalität. Der **gewichtete A*-Algorithmus** (engl. "**Weighted A***") verwendet eine gewichtete, heuristische Kostenschätzfunktion $\varepsilon \cdot h(s)$ mit $\varepsilon > 1$ und die darauf basierende heuristische Bewertungsfunktion $f(s) = g(s) + \varepsilon \cdot h(s)$. Hierdurch wird die Suche auf Grund der Expandierung einer geringeren Anzahl an Knoten oft verkürzt. Allerdings kann die Heuristik unzulässig werden, sodass ein suboptimaler Weg resultiert. Die Optimalität wird durch den Faktor ε begrenzt, d. h. die auftretenden Kosten in Form der resultierenden Pfadlänge betragen maximal das ε -fache der kürzesten Lösung. Durch wiederholtes Suchen mit reduziertem Gewichtungsfaktor ε verbessert sich in der Regel die Qualität der gefundenen Wege auf Kosten eines steigenden Zeitbedarfs. [294] Der **ARA*** (**Anytime Repairing A***)-**Algorithmus** [295] nutzt ebenfalls mehrere Suchdurchläufe mit einer gewichteten Heuristik $\varepsilon \cdot h(s)$, läuft jedoch auf Grund der Wiederverwendung von Informationen meist effizienter ab. Der **D*** Lite (bzw. "Focussed Dynamic A* Lite")-Algorithmus [296] stellt eine inkrementelle Variante des A*-Algorithmus dar, bei der eine bereits gefundene Lösung bei sich ändernden Kantenkosten des zu durchsuchenden Graphen, z. B. auf Grund neuer Umgebungsinformationen, lokal umgeplant wird [294]. Der Anytime Dynamic A* (AD*)-Algorithmus [297] nutzt wie der ARA*-Algorithmus Informationen aus vorherigen Suchdurchläufen und plant wie der D* Lite-Algorithmus ungültige Pfadabschnitte neu [294]. Ein Suchverfahren, das den gewichteten A*-Algorithmus mit einem stichprobenbasierten Ansatz zur Vermeidung lokaler Minima kombiniert, ist der **R*** (bzw. randomisierte A*)-**Planer** [298]. Hierbei werden Wegabschnitte zu zufällig ausgewählten Zwischenzielen auf Basis des gewichteten A*-Algorithmus ermittelt.

Zur Berechnung des kürzesten TCP-Pfads zwischen der Start- und Zielzelle, d. h. des Start- und Zielknotens des Nachbarschaftsgraphen, bietet sich der A*-Algorithmus, das schnellste Verfahren zur Ermittlung der optimalen Lösung, an. Allerdings steigt die Berechnungszeit mit einem höheren Zellzerlegungsgrad und einer damit verbundenen größeren Anzahl zu berücksichtigender Zellen bzw. Knoten. Zur Beschleunigung der Wegsuche wird deshalb eine modifizierte Variante des A*-Algorithmus eingesetzt, bei der in die heuristische Kostenschätzfunktion $h_m(s)$ die euklidische Distanz zum Zielknoten d(s) und der Zerlegungsgrad z(s) des aktuellen Knotens s eingehen:

$$h_m(s) = d(s) + \alpha \cdot z(s), \text{ mit } \alpha > 1$$
(5.4)

$$f_m(s) = g(s) + h_m(s) = g(s) + d(s) + \alpha \cdot z(s)$$
(5.5)

Hierdurch weisen größere Zellen, d. h. Knoten mit einem kleineren Zerlegungsgrad z(s), geringere geschätzte Kosten zum Ziel $h_m(s)$ sowie geringere Gesamtkosten $f_m(s)$ auf und werden bei der Wegsuche bevorzugt. Durch den Faktor α kann der Einfluss des Zerlegungsgrads zusätzlich gewichtet und den Weglängen und somit der Robotergeometrie entsprechend angepasst werden. Auf Grund der verwendeten Heuristik kann nicht mehr garantiert werden, dass $h_m(s)$ die tatsächlichen Kosten zum Ziel unterschreitet und somit der kürzeste, optimale Pfad gefunden wird. Allerdings werden die Suche verkürzt sowie Wege mit tendenziell größeren Zellen und weniger Stützpunkten generiert. Prinzipiell ist der Einsatz auch anderer Graphsuchverfahren denkbar, wie des R*-Algorithmus, falls viele Hindernisse vorhanden sind und das schnelle Auffinden einer gültigen Lösung im Vordergrund steht, oder des ursprünglichen A*-Algorithmus, um den kürzesten Pfad zu erhalten.
5.2 Konkretisierung des verallgemeinerten Ansatzes für Sechsachs-Knickarmroboter mit Zentralhand

Der bisher dargestellte Ansatz, bei dem zur Reduktion der Planungsdimension zunächst ein gültiger Pfad für den TCP ermittelt wird, ist grundsätzlich auf verschiedene Robotertypen übertragbar. Zur Realisierung einer Bahn für den betrachteten Anwendungsfalls eines Knickarmroboters werden ein zeiteffizienter Löser zu Berechnung der inversen Transformation aller Pfadpunkte sowie Kollisionsprüfungen zwischen der Robotergeometrie und Hindernissen benötigt. Die Kombination gültiger Konfigurationen für einzelne Wegpunkte ergibt anschließend einen vollständigen Roboterpfad.

5.2.1 Einsatz eines geometrischen Lösers zur zeiteffizienten Realisierung der inversen Transformation

In Kapitel 4.1.2 wird die direkte bzw. Vorwärtskinematik für Sechsachs-Knickarmroboter erläutert, bei der auf Basis eines vorgegebenen Gelenkwinkelvektors $\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)^T$ die Pose des Werkzeugkoordinatensystems K_W in Koordinaten des festen Roboterbasiskoordinatensystem K₀ berechnet wird. Die Vorwärtskinematik kann einfach mittels Multiplikation der einzelnen Transformationsmatrizen $_{i-1}^{i}T$ mit i = 1, ..., 6 gemäß Gleichung (4.2) durchgeführt werden. Bei der umgekehrten Problemstellung, der inversen Transformation/ Kinematik (IK) oder Rückwärtstransformation, werden für eine definierte Roboterpose ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$) in Basis- bzw. Weltkoordinaten die zughörigen Achswinkel gesucht. Auf Grund der enthaltenen Rotationen in der Transformation ${}_{0}^{6}T(\vec{\theta})$ zwischen dem Flansch- und dem Basiskoordinatensystem, stellt deren inverse Lösung ein nichtlineares Gleichungssystem dar, für das keine allgemeingültigen analytischen Verfahren existieren [241]. Numerische Ansätze sind auf Grund ihrer iterativen Vorgehensweise in der Regel langsamer und ermitteln nicht immer alle gültigen Lösungen [240] [241]. Für alle Sechsachs-Knickarmroboter, bei denen sich drei aufeinanderfolgende Rotationsachsen in einem Punkt schneiden oder parallel angeordnet sind, existieren jedoch analytische Lösungen auf Basis algebraischer bzw. geometrischer Methoden [240] [241]. Dies trifft somit auch für den Betrachtungsfall des weit verbreiteten Sechsachs-Knickarmroboters mit Zentralhand zu, bei dem sich die letzten drei Achsen im sogenannten Handwurzelpunkt (HWP) schneiden [235].

Da im vorliegenden Fall die inverse Transformation einschließlich der Bestimmung aller Lösungen sehr häufig durchgeführt werden muss, wird ein analytisches Verfahren auf Basis eines **geometrischen Ansatzes** eingesetzt. Da hierbei jedoch auf die Robotergeometrie zurückgegriffen wird, ist eine entsprechende Lösung nicht allgemeingültig, sondern muss an den jeweiligen Robotertyp angepasst werden. Zur Abdeckung der in dieser Arbeit betrachteten Roboter wird deshalb ein inverser Löser eingesetzt, der die kinematischen Robotermodelle auf Basis der DH-Parameter (siehe Kapitel 4.1.2) einschließlich der jeweiligen positiven Drehrichtungen der Achsen und der Achsgrenzen berücksichtigt. Geometrische Lösungsansätze für bestimmte Sechsachs-Knickarmroboter mit Zentralhand finden sich beispielsweise in [235] [279] und [299], welche als Ausgangsbasis zur Anpassung an die vorliegenden Robotertypen genutzt werden. Um bei der Rückwärtskinematik die bekannte, feste Transformation $_6^7T$ zwischen dem Werkzeugkoordinatensystems $K_W = K_7$ und dem Flanschkoordinatensystem $K_F = K_6$ auszuschließen, wird die Gesamttransformation $_0^7T(\vec{\theta})$ aus Gleichung (4.2) zu $_0^6T(\vec{\theta})$ vereinfacht:

Die grundlegende Idee der inversen Lösung auf Basis eines geometrischen Ansatzes ist eine Aufteilung der vollständigen Problemstellung in eine getrennte inverse Positions- und Orientierungsbestimmung [240] gemäß der Umstellung von Gleichung (5.6) zu:

$${}^{6}_{0}T(\vec{\theta}) \cdot {}^{5}_{6}T(\theta_{6}) \cdot {}^{4}_{5}T(\theta_{5}) \cdot {}^{3}_{4}T(\theta_{4}) = {}^{1}_{0}T(\theta_{1}) \cdot {}^{2}_{1}T(\theta_{2}) \cdot {}^{3}_{2}T(\theta_{3})$$

$$= {}^{3}_{0}T(\theta_{1}, \theta_{2}, \theta_{3})$$
(5.7)

Die ersten drei Achswinkel θ_1 bis θ_3 können anhand der gegebenen Position des Flanschkoordinatensystems durch einzelne Betrachtungen in der Ebene bestimmt werden. Die letzten drei Achswinkel θ_4 bis θ_6 ergeben sich anschließend auf Basis dieser Winkel und der Orientierung des Flanschkoordinatensystems. Zunächst wird die Position des Handwurzelpunktes \vec{p}_{HWP} in Weltkoordinaten berechnet, indem vom Ursprung des Flanschkoordinatensystems K_6 , welcher sich durch die vierte Spalte von ${}_{0}^{6}T$ ergibt, der DH-Parameter d_6 in \vec{z}_6 -Richtung, die der dritten Spalte von ${}_{0}^{6}T$ entspricht, subtrahiert wird [235] (vgl. Bild 14, Bild 15 und Gleichung (4.2)):

$$\vec{p}_{HWP}^{(0)} = \vec{t}_{0,6}^{(0)} - d_6 \cdot \vec{z}_6^{(0)}, \text{ mit } \vec{t}_{0,6}^{(0)} = {}_0^6 T_{(:,4)} \text{ und } \vec{z}_6^{(0)} = {}_0^6 T_{(:,3)}$$
 (5.8)

Zur Ermittlung von θ_1 wird die Position des Handwurzelpunktes \vec{p}_{HWP} in die x_0y_0 -Ebene des Roboterbasiskoordinatensystems K_0 projiziert, die Arkustangensfunktion [279] sowie im Fall von $d_2 \neq 0$ die Hilfswinkel α und β genutzt [299] wie Bild 46 skizziert.



Bild 46: Ermittlung jeweils beider Lösungen θ_{1_1} und θ_{1_2} des ersten Achswinkels für die Roboter Reis RV30-16 (oben) und Stäubli TX60L (unten) in der x_0y_0 -Ebene des Koordinatensystems K₀ unter Nutzung von [279] [299]

Hierbei ergeben sich in der Regel zwei Lösungen θ_{1_1} und θ_{1_2} , da der Handwurzelpunkt durch einen rechten oder linken Roboterarm erreicht werden kann (siehe Bild 48) [279]. Unter Nutzung der Sinus- und Kosinusfunktionen, deren Additionstheoremen und des Satzes von Pythagoras für den Fall von $d_2 \neq 0$ [299]

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta, \qquad \sin \alpha = -\sin(\alpha \pm \pi)$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta, \qquad \cos \alpha = -\cos(\alpha \pm \pi)$$

$$\sin \alpha = \frac{p_{HWP_{y0}}}{l}, \qquad \sin \beta = \frac{d_2}{l}, \qquad \cos \alpha = \frac{p_{HWP_{x0}}}{l} \qquad \text{und} \qquad \cos \beta = \frac{\sqrt{l^2 - d_2^2}}{l} \qquad (5.9)$$

$$\text{mit} \quad l = \sqrt{p_{HWP_{x0}}^2 + p_{HWP_{y0}}^2}$$

lassen sich die beiden Lösungen θ_{1_1} und θ_{1_2} für die Roboter Reis RV30-16 bzw. Stäubli TX60L berechnen (auf Basis von [279] [299] und [300]):

$$\theta_{1_{-1}} = \arctan 2 \left(p_{HWP_{y0}}, p_{HWP_{x0}} \right) \qquad \text{rechter Arm} \\ \theta_{1_{-2}} = -\pi + \arctan 2 \left(p_{HWP_{y0}}, p_{HWP_{x0}} \right) \qquad \text{linker Arm} \qquad \qquad \begin{array}{c} \text{Reis} \\ \text{RV30-16} \end{array} (5.10) \end{array}$$

$$\theta_{1_{-1}} = \alpha - \beta \qquad \text{linker Arm} \\ = \arctan 2 \left(\sin(\alpha - \beta), \cos(\alpha - \beta) \right) \\ = \arctan 2 \begin{pmatrix} p_{HWP_{y0}} \sqrt{p_{HWP_{x0}}^2 + p_{HWP_{y0}}^2 - d_2^2} - p_{HWP_{x0}} d_2, \\ p_{HWP_{x0}} \sqrt{p_{HWP_{x0}}^2 + p_{HWP_{y0}}^2 - d_2^2} + p_{HWP_{y0}} d_2 \end{pmatrix} \\ \theta_{1_{-2}} = -\pi + \alpha + \beta \qquad \text{rechter Arm} \\ = \arctan 2 \left(\sin(\alpha + \beta), \cos(\alpha + \beta) \right) - \pi \\ = \arctan 2 \left(\sin(\alpha + \beta - \pi), \cos(\alpha + \beta - \pi) \right) \\ = \arctan 2 \left(-\sin(\alpha + \beta), -\cos(\alpha + \beta) \right) \\ = \arctan 2 \begin{pmatrix} -p_{HWP_{y0}} \sqrt{p_{HWP_{x0}}^2 + p_{HWP_{y0}}^2 - d_2^2} - p_{HWP_{x0}} d_2, \\ -p_{HWP_{x0}} \sqrt{p_{HWP_{x0}}^2 + p_{HWP_{y0}}^2 - d_2^2} + p_{HWP_{y0}} d_2, \end{pmatrix}$$
(5.11)

Die Ermittlung von θ_2 und θ_3 erfolgt durch Betrachtung in der x_1y_1 -Ebene des Roboterkoordinatensystems K_1 unter Verwendung der Hilfswinkel γ , δ sowie ε wie Bild 47 für die erste Lösung des ersten Achswinkels θ_{1_1} darstellt.



Bild 47: Ermittlung jeweils beider Lösungen θ_{2_1} und θ_{2_2} des zweiten (links) sowie θ_{3_1} und θ_{3_2} des dritten (rechts) Achswinkels für die Roboter Reis RV30-16 (oben) und Stäubli TX60L (unten) in der x₁y₁-Ebene des Koordinatensystems K₁, jeweils dargestellt für die Lösung θ_{1_1} , unter Nutzung von [279]

Für die Winkelkombinationen θ_2 und θ_3 können wiederum jeweils zwei Lösungen gemäß der Gleichungen (5.12) und (5.13) für eine vorgegebene Position des Handwurzelpunktes existieren, bei denen sich der Ellenbogen in einer oberen oder unteren Lage befindet und dabei ein rechter oder linker Roboterarm vorliegt (auf Basis von [279]):

$\theta_{2_1} = \gamma - \delta$	rechter Arm und Ellenbogen oben bzw.	
$\theta_{3_1} = \pi - \varepsilon$	linker Arm und Ellenbogen unten	Reis
$\theta_{2_2} = \gamma + \delta$	rechter Arm und Ellenbogen unten bzw.	RV30-16 (5.12)
$\theta_{3_2} = -\pi + \varepsilon$	linker Arm und Ellenbogen oben	

$$\begin{array}{ll} \theta_{2_{-1}} = \gamma - \delta - \frac{\pi}{2} & \text{linker Arm und Ellenbogen oben bzw.} \\ \theta_{3_{-1}} = \pi - \varepsilon & \text{rechter Arm und Ellenbogen unten} \\ \theta_{2_{-2}} = \gamma + \delta - \frac{\pi}{2} & \text{linker Arm und Ellenbogen unten bzw.} \\ \theta_{3_{-2}} = -\pi + \varepsilon & \text{rechter Arm und Ellenbogen oben} \end{array}$$
(5.13)

Die verwendeten Hilfswinkel γ , δ und ε ergeben sich nach Gleichung (5.14) anhand der Koordinaten des Handwurzelpunktes in der x_1y_1 -Ebene $p_{HWP_{x1}}$ und $p_{HWP_{y1}}$, der DH-Parameter a_2 und d_4 sowie des Abstands r zwischen dem Handwurzelpunkt und dem Ursprung des Koordinatensystems K_1 in der x_1y_1 -Ebene unter Nutzung der Arkustangensfunktion, des Kosinussatzes sowie des Satzes von Pythagoras [279]:

$$\gamma = \arctan 2 \left(p_{HWP_{y1}}, p_{HWP_{x1}} \right), \quad \delta = \arccos \left(\frac{a_2^2 + r^2 - d_4^2}{2ra_2} \right)$$

$$\text{und} \quad \varepsilon = \arccos \left(\frac{a_2^2 + d_4^2 - r^2}{2a_2 d_4} \right), \quad \text{mit} \quad r = \sqrt{p_{HWP_{x1}}^2 + p_{HWP_{y1}}^2}$$
(5.14)

Auf Grund des Wertebereichs der Arkuskosinusfunktion befinden sich hierbei sowohl δ als auch ε im Intervall [0; π] und sind somit immer positiv oder null. Die in Gleichung (5.14) verwendeten x- und y-Koordinaten von $\vec{p}_{HWP}^{(1)}$ basieren auf den Lösungen zur Darstellung der Position des Handwurzelpunktes \vec{p}_{HWP} in der x_0y_0 -Ebene und den DH-Parametern a_1 bzw. d_2 unter Nutzung des Satzes von Pythagoras sowie der z-Koordinate p_{HWPz0} (vgl. Bild 46) (auf Basis von [279]):

$$p_{HWP_{x1_{1}}} = \sqrt{p_{HWP_{x0}}^{2} + p_{HWP_{y0}}^{2} - a_{1}} \quad \text{rechter Arm } (\theta_{1_{1}}) \quad \bigcup_{k=1}^{2} p_{HWP_{x1_{2}}} = -\sqrt{p_{HWP_{x0}}^{2} + p_{HWP_{y0}}^{2} - a_{1}} \quad \text{linker Arm } (\theta_{1_{2}}) \quad \bigcup_{k=1}^{2} p_{HWP_{y1}} = -(p_{HWP_{z0}}) \quad \bigcup_{k=1}^{2} p_{HWP_{x0}} = -(p_{HWP_{z0}}) \quad \bigcup_{k=1}^{2} p_{HWP_{y0}} = -(p_{HWP_{z0}}) \quad \bigcup_{k=1}^{2} p_{HWP_{x0}} = -(p_{HWP_{x0}}) \quad \bigcup_{k=1}^{2} p_{HWP_{x0}} = -(p_{HWP_$$

$$p_{HWP_{x1_{1}}} = -\sqrt{p_{HWP_{x0}}^{2} + p_{HWP_{y0}}^{2} - d_{2}^{2}} \quad \text{linker Arm } (\theta_{1_{1}}) \qquad \text{Igng}$$

$$p_{HWP_{x1_{2}}} = \sqrt{p_{HWP_{x0}}^{2} + p_{HWP_{y0}}^{2} - d_{2}^{2}} \quad \text{rechter Arm } (\theta_{1_{2}}) \qquad \text{Igng}$$

$$p_{HWP_{y1}} = p_{HWP_{z0}} \qquad \text{Igng}$$

Auf Grund der durch die beiden Lösungen für den ersten Achswinkel bedingten Mehrdeutigkeit von $p_{HWP_{x1}}$ in Gleichung (5.15) können jeweils zwei Lösungen für γ in Gleichung (5.14) sowie damit für $\theta_{2,1}$ und $\theta_{2,2}$ in Gleichung (5.12) und somit insgesamt vier Lösungen für den zweiten Achswinkel θ_2 resultieren. Ebenfalls können sich auf Grund der Berechnungsvorschriften für $p_{HWP_{x1_1}}$ und $p_{HWP_{x1_2}}$ in Gleichung (5.15) im Fall des Reis-Roboters zwei theoretische Möglichkeiten für den Abstand r und somit auch für δ und ε in Gleichung (5.14) ergeben, sodass vier Lösungen für den dritten Achswinkel θ_3 möglich werden.

Anhand der ermittelten Achswinkel θ_1 bis θ_3 kann gemäß Gleichung (5.7) die Transformationsmatrix ${}_0^3T(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ bestimmt werden. Mit der bekannten Transformationsmatrix ${}_0^6T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ lässt sich daraus ${}_0^6T(\theta_4, \theta_5, \theta_6)$ nach Gleichung (5.16) ermitteln. Hierbei ist zu beachten, dass die in ${}_0^6T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ enthaltene, linke obere 3×3 -Rotationsmatrix ${}_3^6R(\alpha, \beta, \gamma)$ nach Gleichung (4.3) für die zy'x''-Eulerwinkelkonvention (bei Stäubli-Robotern) bzw. Gleichung (4.4) für die xy'z''-Eulerwinkelkonvention (bei Reis-Robotern) zu berechnen ist.

$${}^{6}_{3}T(\theta_{4},\theta_{5},\theta_{6}) = {}^{3}_{0}T(\theta_{1},\theta_{2},\theta_{3})^{-1} \cdot {}^{6}_{0}T(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma) = {}^{0}_{3}T(\theta_{1},\theta_{2},\theta_{3}) \cdot {}^{6}_{0}T(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$$
(5.16)

Durch geschickte Verwendung von einzelnen Einträgen der Transformationsmatrix ${}_{3}^{6}T(\theta_{4}, \theta_{5}, \theta_{6})$ lassen sich die drei letzten Achswinkel θ_{3} bis θ_{6} bestimmen [54]. Auf Grund der in der Regel vorhandenen, zur selben Orientierung von K_{6} führenden zwei Möglichkeiten für θ_{5} , bei denen die Roboterhand und damit die Achsen vier und sechs um π verdreht und der Achswinkel fünf negativiert sind oder nicht, ergeben sich θ_{4} bis θ_{6} unter Berücksichtigung der Achsoffsets (θ_{i_offset}) der DH-Parameter θ_i für i = 4, 5, 6 nach Tabelle 5 entsprechend zu (auf Basis von [54]):

$$\theta_{4_{1}} = \arctan 2 \left(-\frac{6}{3} T_{(2,3)}, -\frac{6}{3} T_{(1,3)} \right) - \theta_{4_{0} Offset}$$
Hand
$$\theta_{4_{2}} = \arctan 2 \left(\frac{6}{3} T_{(2,3)}, \frac{6}{3} T_{(1,3)} \right) - \theta_{4_{0} Offset}$$
Hand
$$gedreht$$
(5.17)

$$\theta_{5_{1}} = \arctan 2 \left(-\sqrt{\binom{6}{3}T_{(1,3)}}^{2} + \binom{6}{3}T_{(2,3)}^{2}}, -\frac{6}{3}T_{(3,3)} \right) - \theta_{5_{0}offset} \quad \begin{array}{l} \text{Hand} \\ \text{normal} \\ \\ \theta_{5_{2}} = \arctan 2 \left(\sqrt{\binom{6}{3}T_{(1,3)}}^{2} + \binom{6}{3}T_{(2,3)}^{2}}, -\frac{6}{3}T_{(3,3)} \right) - \theta_{5_{0}offset} \quad \begin{array}{l} \text{Hand} \\ \text{gedreht} \end{array}$$
(5.18)

$$\theta_{6_{-1}} = \arctan 2 \begin{pmatrix} {}^{6}_{3}T_{(3,2)}, -{}^{6}_{3}T_{(3,1)} \end{pmatrix} - \theta_{6_{-}Offset}$$
 Hand

$$\theta_{6_{-2}} = \arctan 2 \begin{pmatrix} -{}^{6}_{3}T_{(3,2)}, {}^{6}_{3}T_{(3,1)} \end{pmatrix} - \theta_{6_{-}Offset}$$
 Hand
gedreht

Die verwendeten Beziehungen in den Gleichungen (5.17) - (5.19) werden ersichtlich aus der Definition der Transformationsmatrix ${}_{3}^{6}T(\theta_{4},\theta_{5},\theta_{6})$, die sich durch Kettenmultiplikation der drei Transformationsmatrizen nach Gleichung (4.1) zur Definition der Gelenkkoordinatensysteme K_{4} , K_{5} und K_{6} unter Anwendung der DH-Parameter der Achsen vier, fünf und sechs aus Tabelle 5 ergibt (mit den Abkürzungen $c\theta_{i} = \cos \theta_{i}$ und $s\theta_{i} = \sin \theta_{i}$):

Da die Achswinkel θ_4 bis θ_6 in Gleichung (5.20) die DH-Achsoffsets θ_{i_Offset} der jeweiligen Roboter beinhalten, werden sie in den Gleichungen (5.17) - (5.19) subtrahiert, um die gemäß der Robotersteuerung gültigen Werte zu erhalten. Alle Lösungen θ_1 bis θ_6 werden jeweils auf Einhaltung der roboterspezifischen Achsbegrenzungen überprüft und gegebenenfalls auf einen realisierbaren Wert durch Addition bzw. Subtraktion von $\pm 2\pi$ angepasst. Bild 48 visualisiert zusammenfassend alle acht zur Erreichung einer beispielhaft gegebenen Pose des Flanschkoordinatensystems K_6 möglichen Grundkonfigurationen des Roboters Stäubli TX60L.



Bild 48: Ermittlung aller acht Grundkonfigurationen für eine gegebene Flanschpose am Beispiel des Roboters Stäubli TX6oL

5.2.2 Ermittlung realisierbarer Roboterkonfigurationen auf Basis kollisionsfreier TCP-Pfade

Nachdem ein gültiger TCP-Pfad und kinematisch realisierbare Roboterkonfigurationen anhand der Rückwärtstransformation für einzelne Stützpunkte ermittelt worden sind, sind diese auf Kollisionsfreiheit mit der Robotergeometrie einschließlich eines Werkzeuges sowie den Umgebungshindernissen zu überprüfen. Hierbei wird wieder auf einfache Hüllkörpertypen zurückgegriffen, wobei die Robotergeometrieelemente mittels orientierter Quader (Oriented-Bounding Boxes, OBBs) und Sphere-swept Lines (SSLs) approximiert werden. Zylinder werden auf Grund der aufwendigen Kollisionsprüfungen nicht eingesetzt.

Im Fall eines vorhandenen Werkzeuges erfolgt zunächst ein Test auf **Selbst-kollision** zwischen dem Werkzeug und den Hüllkörpern der statischen sowie der ersten beweglichen Roboterarmelemente, mit denen eine Kollision nicht ausgeschlossen werden kann. Das Werkzeug wird für einen schnellen Vorabtest mittels einer umschließenden Kugel und im Kollisionsfall mit dessen an die Geometrie besser angepassten, eigentlichen Hüllkörpern in Form von OBBs, SSLs oder Kugeln dargestellt.

Wird keine Selbstkollision für die Roboterkonfiguration festgestellt, erfolgt die Überschneidungsprüfung zwischen dem Roboter und den **Umgebungshindernissen**. Zur Beschleunigung wird hierfür eine dreistufige **Hüllkörperhierarchie** (engl. **"Bounding Volume Hierarchy", BVH**) auf Basis der für die einzelnen Armelemente und das Werkzeug modellierten Hüllkugeln (engl. "Bounding Spheres") eingesetzt. Anhand der aktuellen Positionen der einzelnen Robotersegmente wird der Sphere Tree zur Laufzeit kontinuierlich neu berechnet. Der Einsatz von Kugeln begründet sich durch die einfache und dadurch zeiteffiziente Erstellung der jeweils übergeordneten Hierarchiekugeln. Bild 49 skizziert deren Aufbau sowie den generellen Ablauf der Überschneidungsprüfung auf Basis der Sphere Tree-BVH.



Bild 49: Ablauf der Kollisionsprüfung zwischen dem Roboter und den Umgebungshindernissen auf Basis einer dreistufigen Sphere Tree-Hüllkörperhierarchie in Anlehnung an [P7]

Die Hüllkugel der ersten Ebene (siehe Bild 49 links), welche zu Beginn auf Kollision mit der Umgebung getestet wird, ergibt sich aus den beiden Hierarchiekugeln der Ebene zwei. Die erste Hierarchiekugel dieser zweiten Ebene wird aus den Bounding Spheres des ersten und zweiten Armelements, die zweite aus den beiden Bounding Spheres der Armelemente drei bis sechs und des Werkzeugs gebildet (siehe jeweils Bild 49 Mitte). Ein Kollisionstest mit den an die Robotergeometrie am besten angepassten Hüllkörpern (siehe Bild 49 rechts) erfolgt nur, wenn die vorherigen Überprüfungen auf Basis der Hierarchiekugeln eine Überschneidung liefern.

Bild 50 visualisiert die Kollisionsprüfung zwischen einem beispielhaften Umgebungshindernis und dem Reis-Roboter RV30-16 auf Basis der Sphere Tree-Hüllkörperhierarchie und den einzelnen Armelementhüllkörpern, welche aus orientierten Quadern bestehen. Durch die mögliche Hüllkörpermodellierung der Roboter mittels OBBs, SSLs und Kugeln ergeben sich neben den in Kapitel 5.1.2 dargestellten Überschneidungstests für Axis-Aligned Bounding Boxes (AABBs) weitere, notwendige Kollisionsprüfungen, welche im Folgenden aufgeführt werden. Anders als in den vorherigen Fällen ist jedoch nur von Interesse, ob eine Kollision stattfindet oder nicht. Die Ermittlung der vollständigen Überlappung eines Hüllkörpers durch den anderen ist nicht erforderlich. Die Überprüfung zwischen zwei OBBs kann als Verallgemeinerung des beschriebenen AABB-OBB-Überschneidungstests mittels des Separating-Axis-Tests (SAT) angesehen werden. Ebenso kann im Fall einer OBB und einer Kugel der dargestellte AABB-Kugel-Test eingesetzt werden, da zunächst der Kugelmittelpunkt ins AABB- bzw. OBB-Koordinatensystem umgerechnet wird.



Bild 50: Visualisierung der Kollisionsprüfung zwischen einem beispielhaften Umgebungshindernis und dem Reis-Roboter RV30-16 auf Basis der Hüllkörperhierarchie (links) sowie den einzelnen Armelementhüllkörpern (rechts) in Anlehnung an [P7]

Kugel-Kugel-Kollisionstest

Der Kugel-Kugel-Kollisionstest stellt die einfachste Überschneidungsprüfung von Hüllkörpern dar. Zur Vermeidung einer aufwändigen Wurzelberechnung wird der quadrierte euklidische Abstand zwischen den beiden Kugelmittelpunkten M_1 und M_2 mit der quadrierten Summe ihrer Radien r_1 und r_2 verglichen [243]. Im Fall von $(M_1 - M_2)^2 < (r_1 + r_2)^2$ kollidieren beide Hüllkörper.

SSL-Kugel-Kollisionstest

Beim Kollisionstest zwischen einer Sphere-swept Line (SSL) und einer Kugel wird zunächst der zur Kugel nächste Punkt auf der die SSL aufspannenden Strecke nach [243] bestimmt, wobei der Kugelmittelpunkt auf die durch das SSL-Liniensegment definierte Gerade projiziert wird. Anschließend erfolgt entsprechend dem Kugel-Kugel-Test ein Vergleich des quadrierten Abstands zwischen dem ermittelten nächsten Punkt auf der SSL und dem Kugelmittelpunkt mit der quadrierten Summe der Radien von SSL und Kugel.

SSL-SSL-Kollisionstest

Bei der Kollisionsüberprüfung zwischen zwei Sphere-swept Lines (SSLs) werden die zwei zueinander nächsten Punkte auf den die SSLs bildenden Strecken nach der in [243] beschriebenen Vorgehensweise sowie deren Abstand ermittelt. Anschließend erfolgt analog den vorherigen Tests ein Vergleich des quadrierten Abstands der nächsten Punkte mit der quadrierten Summe der SSL-Radien.

OBB-SSL-Kollisionstest

Zur Kollisionsprüfung zwischen beliebig orientierten Quadern (OBBs) und SSLs werden die die Kapsel aufspannende Strecke ins lokale OBB-Koordinatensystem transformiert, sodass die OBB für die weitere Berechnung als AABB betrachtet werden kann, und die zueinander nächsten Punkte der Strecke und der OBB anhand der in [301] beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Hierbei werden zur Vereinfachung zunächst nur die positiven Koordinaten des Richtungsvektors der SSL-Strecke berücksichtigt und verschiedene vereinfachte Fälle unterschieden, bei denen die Strecke senkrecht zu einer, zwei oder keiner der Achsen des OBB-Koordinatensystems ausgerichtet ist. Im Anschluss erfolgt die Kollisionsermittlung über einen Vergleich des quadrierten Abstands der beiden nächsten Punkte der OBB und dem SSL-Liniensegment mit dem quadrierten Radius der SSL.

5.2.3 Generierung von Roboterpfaden durch Kombination gültiger Konfigurationen

Der Gesamtablauf des autonomen Pfadplaners ist in Bild 51 skizziert. Zu Beginn werden auf Basis der aktuellen Ist- und der vorgegebenen, kartesischen Zielpose des Roboters zunächst alle gültigen, d. h. kinematisch realisierbaren und kollisionsfreien, Konfigurationen der Zielpose ermittelt und ein direkter Weg auf Machbarkeit überprüft. Hierfür werden gemäß einer feinen Auflösungsschrittweite (von 0,1° bzw. 1 mm) Stützposen anhand der wählbaren Verfahrarten der synchronen Punktsteuerung (engl. "Point-to-Point", PTP) mittels Interpolation der Achswerte oder der Bahnsteuerung (engl. "Continuous Path", CP) mit Linearbahnen (engl. "Continuous Path Linear", CPLIN) mittels Interpolation der Positions- und Orientierungswerte auf Basis der Rückwärtstransformation berechnet. Bei der Bestimmung aller in Frage kommender Konfigurationen der Zielpose wird für die resultierenden Standardkonfigurationen überprüft, ob sich hierdurch weitere, lediglich durch Addition bzw. Subtraktion von $2n\pi$ mit $n \in \mathbb{N}^+$ unterscheidende Konfigurationen innerhalb der Achsbegrenzungen ergeben und somit grundsätzlich zu berücksichtigen sind.

5.2 Konkretisierung des verallgemeinerten Ansatzes für Sechsachs-Knickarmroboter mit Zentralhand



Bild 51: Ablauf der autonomen, kollisionsfreien Pfadplanung für den betrachteten Fall eines vertikalen Sechsachs-Knickarmroboters in Anlehnung an [P5]

Bei Linearbewegungen werden zudem alle Stützposen hinsichtlich auftretender singulärer Roboterstellungen analysiert, sodass diese vermieden werden können. Bei den eingesetzten Robotertypen können sogenannte Schulter-, Ellenbogen- und Handachsensingularitäten, verbunden mit einer Einschränkung der Endeffektorbewegung und unendlich vielen Lösungsmöglichkeiten der inversen Kinematik bzw. sehr hohen Achsgeschwindigkeiten, auftreten [54].

Falls kein direkter, kollisionsfreier Weg existiert, wird der eigentliche, auf der Zellzerlegung basierende **Bahnplaner** gestartet. Hierfür werden zunächst alle Stützposen des TCP-Pfads ermittelt, die sich als Mittelpunkte der Zellen sowie als mittige Punkte zweier aneinander angrenzender Zellenflächen ergeben. Zur Vereinfachung der Planung ist die Orientierung dieser TCP-Posen nicht beliebig möglich, sondern wird anteilig an die Wegänderung der berechneten Positionen gekoppelt. Bild 52 veranschaulicht die zunächst zu berücksichtigenden, aus Zellenmittel- und Grenzflächenpunkten bestehenden Stützpunkte eines beispielhaft generierten, kollisionsfreien TCP-Pfads.



Bild 52: Zu überprüfende Zellenmittel- sowie Grenzflächenpunkte zwischen Zellen als Stützpunkte eines beispielhaften, anhand des autonomen Bahnplaners ermittelten, kollisionsfreien TCP-Pfads

Die zugehörige Orientierung kann anhand der jeweils eingefügten Koordinatensysteme abgelesen werden. Für diese Stützposen werden entsprechend des oben beschriebenen Vorgehens anhand der Rückwärtstransformation alle möglichen Konfigurationen, einschließlich der durch größere Achsbereiche gegebenenfalls möglichen Mehrdeutigkeiten durch Addition bzw. Subtraktion von $2n\pi$ mit $n \in \mathbb{N}^+$ der Achswerte, bestimmt und hinsichtlich der Einhaltung der Achsgrenzwerte und Kollisionsfreiheit analysiert. Ergibt die Überprüfung, dass eine dieser Stützposen des TCP-Pfads auf Grund der Roboterkinematik oder einer Kollision nicht realisierbar ist, werden an den entsprechenden Stellen künstliche AABB-Hindernisse mit einer der minimalen Zellzerlegungsgröße entsprechenden Ausdehnung erstellt und eine erneute Zellzerlegung unter Berücksichtigung der aktualisierten Hindernissituation durchgeführt. Anderenfalls erfolgt eine Überprüfung der Pfadabschnitte zwischen den Stützposen, wobei zur Beschleunigung ein hierarchisches Vorgehen mit einer zunächst gröberen Auflösungsschrittweite gewählt wird. In einem zweiten Schritt werden gültige Pfadabschnitte mittels einer

feineren Auflösung erneut getestet, um Kollisionen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschließen zu können. Bild 53 visualisiert die zu überprüfenden Pfadabschnitte, die sich als Kombinationen aller auf Basis der vorherigen Schritte resultierender, maximal i Konfigurationen der einzelnen n Stützposen ergeben.



Bild 53: Zu überprüfende Pfadabschnitte zwischen n gültigen Stützposen (SP) mit jeweils maximal i Konfigurationen in Anlehnung an [P4]

Die einzelnen Zwischenposen der Pfadabschnitte werden entsprechend der gewählten synchronen PTP- oder linearen CP-Verfahrart mittels Interpolation der Achswerte bzw. Posewerte sowie der Rückwärtstransformation berechnet und auf mögliche Kollisionen getestet. Im Fall der Linearbewegung erfolgt zudem eine Überprüfung hinsichtlich auftretender Singularitäten. Ein Gesamtpfad ohne Konfigurationswechsel zwischen allen Stützposen wird zunächst untersucht und präferiert. Ist dies nicht möglich, wird der erste kollisionsfreie Pfad, der als Kombination gültiger Teilabschnitte mit Konfigurationswechsel resultiert, ausgewählt. Eine kürzeste Wegsuche mittels Standardsuchverfahren wird hierbei nicht durchgeführt, kann jedoch zusätzlich integriert werden. Ergeben sich zwischen zwei Stützposen keine realisierbaren Wegabschnitte, werden ebenfalls künstliche AABB-Hindernisse an den entsprechenden Positionen erzeugt und der Zellzerlegungsprozess erneut durchlaufen.

Ein kollisionsfreier Gesamtpfad als Kombination gültiger Teilbahnen wird anschließend mit der Angabe der jeweiligen Bewegungsart an die Robotersteuerung übermittelt, was beispielhaft für den Fall des Reis-Roboters kurz dargestellt wird. Die Kommunikation erfolgt hierbei über die in Kapitel 4.1.1 beschriebene, Ethernet basierte XML-Schnittstelle unter Nutzung des externen Verfahrmodus [234] und Vorgabe von Systemvariablen anhand der XML-Tags *«writeSymbolValue»* bzw. *«bitSetVar»*. Die Verfahrart wird mittels der Systemvariablen *_IEXTMODE* und die einzelnen Stützposen als Sollpositionen über *_PEXTPOS* angegeben. Die Bahngeschwindigkeit und -beschleunigung können durch die Systemvariablen *_RVEL_CART_EXT* und *_RACC_CART_EXT* bzw. im Fall einer PTP-Bewegung durch *_IVEL_PTP_EXT* und *_IACC_PTP_EXT* festgelegt werden.

5.3 Evaluierung des realisierten Bahnplanungsverfahrens

Zur Darstellung der Leistungsfähigkeit und Ableitung weiterer Optimierungsmöglichkeiten des realisierten Bahnplanungsverfahrens für serielle Industrieroboter auf Basis der Zellzerlegung erfolgt zunächst eine Evaluierung anhand verschiedener Testszenarien in der Simulation. Die Funktionsfähigkeit wird zudem anhand des in Kapitel 7 beschriebenen Demonstratorsystems unter Einsatz eines realen Industrieroboters nachgewiesen.

5.3.1 Weiterentwicklung eines Famos-Interface-Plugins zur Simulation des Planers

In der Simulation kann ein möglichst realitätsgetreues Roboterverhalten durch Nutzung eines Emulators nachgebildet werden. Im Fall der Robotersteuerung ROBOTstarV von Reis Robotics steht dieser als Teil der Software RobOffice zur Verfügung, sodass ohne Vorhandensein eines realen Roboters die vollständige Funktionalität des autonomen Bahnplaners überprüfbar wird. Wie in Kapitel 4.3.1 erläutert, wird zur 3D-Visualisierung der mittels der Umgebungserfassung detektierten Objekte, der definierten statischen Hindernisse, der Kamera-Pose sowie der aktuellen Roboterkonfiguration die um ein Interface-Plugin ergänzte, kommerzielle Software Famos robotic genutzt.

Zur Evaluierung des Bahnplaners erfolgt eine Erweiterung des erstellten Famos-Plugins, um die einzelnen Ablaufschritte nachvollziehen zu können. Diese umfasst die autonome Generierung sowie das Ein- und Ausblenden verschiedener Objekte anhand der durch den autonomen Bahnplaner vorgegebenen Daten auf Basis einer realisierten Datenschnittstelle. Hierzu zählen die als Ausgangspunkt des Zellerzerlegungsprozesses definierte Startzelle, wie beispielsweise in Bild 36 rechts abgebildet, einschließlich des zugehörigen Weltkoordinatensystems als Frame. Des Weiteren können relevante Informationen wie die Zielpose, die aktuell erstellten, aus einzelnen Zellen bestehenden, kollisionsfreien TCP-Pfade, gegebenenfalls generierte künstliche Hindernisse sowie final resultierende, gültige Roboterbahnen dargestellt werden. Bild 54 zeigt die Visualisierung ausgewählter Teilschritte des Bahnplaners für eine beispielhaft definierte Umgebung mit mehreren statischen Hindernisobjekten sowie die berechnete, kollisionsfreie Bewegungsbahn. Die zugehörigen, aus Zellenmittel- und Grenzflächenpunkten bestehenden Stützposen werden als Famos-Zielpunkte, sogenannte Targets, eingefügt, sodass ein ermittelter Pfad unabhängig vom Roboteremulator simuliert werden kann. Einzelne Kollisionsprüfungen können zudem durch die zum jeweiligen Planungszeitpunkt berechneten, hierarchischen Hüllkörpermodelle und die an die Robotergeometrie angepassten Armelement-Bounding Volumes gezielt veranschaulicht werden, wie Bild 50 zeigt.



Bild 54: Visualisierung von Teilschritten eines beispielhaften Bahnplanungsproblems mit mehreren Hindernisobjekten (schwarz und blau), kollisionsfrei generierten TCP-Pfaden (grün) und künstlichen Hindernissen (gelb) für den Reis Roboter RV30-16 in Anlehnung an [P7]

5.3.2 Nachweis der grundsätzlichen Funktionsfähigkeit des vorgestellten Ansatzes

Die Testszenarien zur simulativen Überprüfung des Bahnplanungsverfahrens erfolgen für den konkreten Anwendungsfall des Reis Roboters RV30-16 unter Nutzung des Roboteremulators von RobOffice und der um die beschriebene Interface-Plugin ergänzte Software Famos robotic. Zur Modellierung einer realistischen Umgebung werden neben einem, den Robotersockel einhüllenden statischen Hindernis weitere, die Peripheriekomponenten in der unmittelbaren Umgebung abbildende Objekte definiert. Die einzelnen Tests unterscheiden sich durch die Anzahl, Ausdehnung, die Positionierung und die Art zusätzlich modellierter Hindernisse in Form von AABBs und OBBs, wodurch der direkte Weg zwischen Start- und Zielpose unzugänglich wird. Zudem werden nach Integration in das in Kapitel 7 beschriebene Montagesystem autonom durch die 3D-Kamera basierte Arbeitsraumüberwachung generierte Hindernisdaten einer realen Szene aufgezeichnet und als Eingangsdaten herangezogen.

Die Testläufe in der Simulation sowie der Einsatz im Rahmen des realisierten Montagesystems bestätigen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Bahnplanungsansatzes. Es kann jedoch nicht in allen Fällen ein vorhandener Pfad gefunden werden, sodass es sich nicht um einen vollständigen Planer handelt. Dies resultiert vor allem aus der Planung im Dreidimensionalen, bei der zur gezielten Weglenkung um Hindernisse zunächst lediglich kartesische Positionsinformationen für die Roboter-TCP-Posen ermittelt werden. Die zugehörigen Orientierungen werden anschließend entsprechend der Wegänderung vorgegeben und sind somit nicht frei wählbar, wodurch sich der Planungsraum reduziert und mögliche, realisierbare Pfade nicht berücksichtigt werden. Zusätzlich ergibt sich eine Reduktion von Lösungen durch die Anordnung der Startzelle, den gewählten Zerlegungsgrad und die damit im Zusammenhang stehenden, im Verlauf des Verfahrens erstellten künstlichen Hindernisse sowie die gewählte Hüllkörpermodellierung. Wird wie im vorliegenden Fall ein Werkzeug relativ großer Ausdehnung mit lediglich einem Bounding Volume approximiert, können falsche Positivtests im Rahmen der Kollisionsprüfung ebenfalls dazu führen, dass gültige Lösungen ausgeschlossen werden. Auf weitere bestehende Probleme und mögliche Optimierungsansätze wird im folgenden Teilkapitel eingegangen.

Die angestrebte Zielstellung des Verfahrens, systematisch Wege um Hindernisse abzuleiten, kann erreicht werden. In Abhängigkeit der Hindernispositionen erfolgen die Zellaufteilung, die darauf basierenden TCP-Pfade und die damit resultierende Wegoptimalität. Auf Grund der konservativen geometrischen Modellierung des Roboters und einer hohen Auflösung einzelner Wegabschnitte zur Generierung zu überprüfender Zwischenposen kann bei den ermittelten Pfaden mit einer hohen Wahrscheinlichkeit von einer Kollisionsfreiheit ausgegangen werden. Zudem ergeben sich grundsätzlich nachvollziehbare Bewegungsbahnen, was bei probabilistischen Verfahren, die deutliche Vorteile hinsichtlich der Berechnungszeit aufweisen, nicht immer gegeben ist. Eine Einsetzbarkeit für unterschiedliche Typen des betrachteten vertikalen Sechsachs-Knickarmroboters ist bei entsprechender Anpassung des direkten und inversen kinematischen sowie des geometrischen Planungsmodells gegeben.

5.3.3 Bestehende Defizite und mögliche Weiterentwicklungen des Bahnplanungsverfahrens

Wie dargelegt, kann auf Grund der Nichtvollständigkeit des Planers das Auffinden gültiger Pfade nicht sichergestellt werden. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit, existierende Wege zu finden, besteht in der nachgelagerten, gezielten Anpassung der Orientierung ermittelter Stützposen. Denkbar ist beispielsweise beim Auftreten von Kollisionen anstelle des direkten Hinzufügens von künstlichen Hindernissen die Orientierung einzelner, problematischer Posen gezielt zu variieren und erneut zu überprüfen. Ein zusätzlicher, theoretisch möglicher Planungsschritt zur Detektion geeigneter Orientierungen aller Stützposen erscheint auf Grund des damit einhergehenden Zeitbedarfs nicht sinnvoll. Um falsche Positivtests bei der Kollisionsprüfung zu vermeiden und damit die Wahrscheinlichkeit der Ermittlung gültiger Wege zu erhöhen, bietet sich zudem eine Verfeinerung der geometrischen Robotermodellierung, insbesondere durch die Hüllkörperwahl der verwendeten Werkzeuge oder zu handhabender Werkstücke, an. Zu beachten ist hierbei jedoch die in der Realität auftretende Abweichung von geplanten zu tatsächlich ausgeführten Bewegungsbahnen sowie der steigende Zeitbedarf für eine höhere Anzahl an durchzuführenden Kollisionsprüfungen.

Auf Grund der Berücksichtigung aller Hindernisse des Umgebungsmodells handelt es sich um einen globalen, zeitaufwändigen Planer, der als Offline-Verfahren einzusetzen ist. Durch die Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Hindernissen, welche die Umgebungserfassung bereitstellt, könnten jedoch zunächst alle beweglichen Objekte von der Betrachtung ausgeschlossen und die Kollisionsvermeidung durch eine anschließende onlinefähige Überwachung während der Bewegung sichergestellt werden. In der gegenwärtigen Umsetzung bewirkt ein zu einer Kollision führendes, dynamisches Hindernis eine Neuplanung des Weges, welche bei einer geänderten Szeneninformation zeitverzögert zum selben Ergebnis führt.

Ein Defizit des umgesetzten Bahnplanungsansatzes im Vergleich zu etablierten Verfahren besteht in der hohen Laufzeit, welche bei der eingesetzten Testplattform (siehe Kapitel 4.3.2) im Bereich von mehreren Sekunden bis teilweise sogar Minuten liegt. Ein Großteil der Planungszeit entfällt auf die Kollisionstests aller Interpolationspunkte, wobei aus Sicherheitsgründen eine Reduktion der Auflösungsschrittweite von Wegabschnitten nicht sinnvoll erscheint. Die Zellzerlegung sowie das Aufstellen des Nachbarschaftsgraphen nehmen einen weiteren wesentlichen Zeitanteil ein. Eine Möglichkeit zur Optimierung besteht in der Erweiterung zu einem Multi-Query-Verfahren, um bei einem erneuten Zyklus der Zellzerlegung Zeit einzusparen. Hierbei wären die auf Basis der Kollisionstests mit statischen Hindernissen, wie der unveränderlichen Peripherie, sich als frei erweisende Zellen im Rahmen des Zellzerlegungsprozesses zu speichern und lediglich zusätzliche Hindernisse zur Laufzeit jeweils neu zu berücksichtigen. Ebenfalls zeitaufwändig ist der eingesetzte, modifizierte A*-Algorithmus, um möglichst kurze TCP-Pfade mit großen Zellen zu bevorzugen. Zur Erhöhung der Berechnungsgeschwindigkeit ist der Einsatz eines weniger wegoptimalen, jedoch in der Regel schnelleren Algorithmus möglich. Ein weiterer Ansatz zur Laufzeitreduktion besteht in der Einschränkung des betrachteten Zellzerlegungsbereichs, der gegenwärtig den vollständigen Roboterarbeitsraum umfasst. Entsprechend könnten aus der Planung auszunehmende Regionen ermittelt werden, welche sich aus Roboterperspektive hinter vorhandenen Hindernissen befinden und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht kollisionsfrei anfahrbar sind.

Weitere Optimierungen des Bahnplanungsverfahrens auf Kosten zusätzlichen Rechenaufwands bestehen in einem nachträglichen Glätten berechneter Bahnen, um beispielsweise Überschleifen zu ermöglichen, oder dem Einsatz von Standardsuchverfahren zur Ermittlung des kürzesten Wegs bei der Kombination gültiger Teilabschnitte zu Roboterpfaden. 6 Sichere Kollisionsvermeidung zwischen Industrierobotern und Personen

Das Assistenzsystem erfordert zur Gewährleistung der Sicherheit im Rahmen der eingesetzten Kollaborationsart der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, dass während der Bewegung des Industrieroboters ein festgelegter Mindestabstand zu Personen durchgehend eingehalten wird. Die auszuführende Bewegungsbahn kann autonom durch den Bahnplaner vorgegeben werden, der nur zu Beginn und nicht während der weiteren Planung eines Durchlaufs die aktuellen Umgebungsdaten heranzieht, sodass Kollisionen bei einer sich verändernden Szene nicht auszuschließen sind. Ein hierfür geeigneter Ansatz zur sicheren Kollisionsvermeidung assistierender Industrieroboter auf Basis der Abstandsermittlung wird im Folgenden dargestellt.

6.1 Online-Kollisionsvermeidung auf Basis von Mindestabständen zu dynamischen Objekten

Grundlage der Kollisionsvermeidung bildet die sensorische Ermittlung der gegenwärtigen Positionen von Menschen, welche die in Kapitel 4 beschriebene Arbeitsraumüberwachung ermöglicht. Hierbei erfolgt eine einfache Unterscheidung zwischen Personen und anderen Objekten, die ebenfalls keinen Kontakt, eine Annäherung jedoch ohne besondere Sicherheitsaufschläge erlauben. Verschiedene bekannte Reaktionsstrategien für Industrieroboter bei einer erkannten, drohenden Kollision durch Unterschreiten eines Mindestabstands stellen das Anhalten der Roboterbewegung, die Online-Geschwindigkeitsanpassung in Abhängigkeit des ermittelten Abstandes sowie das aktive Ausweichen und ggf. das Umplanen einer ursprünglichen Roboterbahn dar. Hierfür ist es erforderlich, Personen online und sicher detektieren, den Abstand berechnen und die Robotergeschwindigkeit in Echtzeit anpassen zu können.

Die konzipierte Kollisionsvermeidung berücksichtigt alle Objekte, welche durch die 3D-Kamera basierte Aufnahme der Umgebung erstellt werden. Ein Kontaktausschluss mit statischen Objekten, welche bereits im Hintergrundmodell enthalten sind, wird durch die autonome Bahnplanung sichergestellt. Anhand der bekannten, aktuellen geometrischen Roboter- und dynamischen Objektmodelle wird deren kürzester Abstand ermittelt. Eine zusätzliche Differenzierung hinsichtlich unterschiedlicher Mindestabstände zwischen Menschen und anderen beweglichen Objekten wird nicht vorgenommen, wäre jedoch einfach integrierbar. Die für einen konkreten Anwendungsfall einzuhaltenden Abstände zu Personen und maximal auftretenden Robotergeschwindigkeiten sind wie in Kapitel 2.1.2 dargelegt nach DIN EN ISO 10218-1 [5] entsprechend einer jeweiligen Risikobeurteilung festzulegen. Im konzipierten Assistenzsystem wird beim Unterschreiten des Sicherheitsabstandes als Reaktionsstrategie des Roboters ein einfacher Stopp der Bewegung vorgesehen, die wieder aufgenommen wird, sobald sich die Person entfernt hat. Hierbei kann die parallel laufende Bahnplanung einen neugenerierten Pfad auf Basis weiterer, geänderter Umgebungsdaten vorgeben. In der DIN EN ISO 10218-1 wird zur Berechnung des Mindestabstands zu Personen bei der Kollaborationsart der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung auf die DIN EN ISO 13855 "Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen" [36] und die Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeiten zwischen Mensch und Roboter verwiesen. Diese Norm wird als Grundlage für die Ermittlung der zum Roboterhalt führenden Abstandsschranke herangezogen. Sie basiert auf Werten für Annäherungsgeschwindigkeiten von Erwachsenen, welche sich mit Schrittgeschwindigkeit bewegen [36]. Bei besonderer Gefährdung, beispielsweise auf Grund des Arbeitsprozesses, kann es jedoch möglich sein, dass die genannten Vorgaben allein nicht ausreichend sind. Nach der DIN EN ISO 13855 berechnet sich der einzuhaltende Mindestabstand S in mm anhand von

$$S = (K \cdot T) + C \tag{6.1}$$

mit *K* als Annäherungsgeschwindigkeit des Körpers bzw. von Körperteilen in mm/s, dem Nachlauf des Systems *T* in s und dem Eindringabstand *C* in den Gefahrenbereich bis zum Auslösen der Schutzeinrichtung in mm [36]. Da bei der eingesetzten PMD-Kamera von einem Sensordetektionsvermögen $d \le 40$ mm und einem sich ergebenden Mindestabstand *S* > 100 mm ausgegangen wird, berechnet sich *C* zu [36]

$$C = 8 \cdot (d - 14). \tag{6.2}$$

Im Fall von $S > 100 \text{ mm} \land S < 500 \text{ mm}$ ist die Annäherungsgeschwindigkeit auf einen höheren Wert von K = 2.000 mm/s festzulegen. Beträgt S >500 mm, kann mit K = 1.600 mm/s gerechnet werden [36]. Da von einer relativ hohen Nachlaufzeit T auf Grund der Verarbeitungszeit der Umgebungserkennung und der Abstandsermittlung und damit von S > 500 mmauszugehen ist, wird der zu berücksichtigende Mindestabstand S in mm mittels

$$S = (1.600 \cdot T) + 8 \cdot (d - 14) \tag{6.3}$$

berechnet [36]. Zur Abschätzung der Abstandsschranke wird das Sensordetektionsvermögen der ToF-Kamera auf Basis der in Kapitel 4.3.2 durchgeführten Versuche auf einen konservativen, oberen Grenzwert von d = 10 mm gesetzt. Die Nachlaufzeit des gesamten Systems muss die Zeitanteile aller Teilkomponenten und Kommunikationswege von der Kameraaufnahme bis zum Stillstand des Industrieroboters beinhalten. Da nicht alle Werte bekannt sind, erfolgt zunächst eine Abschätzung mit T = 0.8 s, welche im Rahmen von durchzuführenden Praxistests mit Worst-Case-Szenarien zu überprüfen und anzupassen ist. Die getroffenen Annahmen ergeben durch Anwendung von Gleichung (6.3) einen einzuhaltenden Mindestabstand zu Personen von S = 1.248 mm, um einen rechtzeitigen Roboterstillstand zur Kollisionsvermeidung zu realisieren.

6.2 Realisierung der Kollisionsvermeidung über Abstandstests für aktuelle Umweltmodelle

Die im Rahmen der Online-Kollisionsvermeidung anwendbaren Berechnungen zur Ermittlung der kürzesten Abstände zwischen dynamischen Objekten und dem Industrieroboter basieren auf Grund der Zeitanforderungen wie bei der Arbeitsraumüberwachung und dem autonomen Bahnplaner auf einfachen Hüllkörpern. Ein Großteil der im Kontext dieser Teilkomponenten des Roboter-Assistenzsystems entwickelten Überschneidungstests kann mit geringem Modifikationsaufwand auf Entfernungsprüfungen erweitert werden, da bereits der Abstand zwischen den nächsten Punkten der Grundstrukturen, durch welche die einfachen Volumenkörper definiert werden, ermittelt wird. Entsprechend werden für die Kombinationen der Hüllkörpertypen Kugel, SSL (Sphere-swept Line) und OBB (Oriented-Bounding Box), welche AABBs (Axis-Aligned Bounding Box) einschließen, Abstandstests realisiert. Eine Ausnahme stellt die Betrachtung zweier orientierter Hüllquader dar, bei denen zur Kollisionsbetrachtung der Separating-Axis-Test (SAT) eingesetzt wird, welcher sich nicht einfach zur Entfernungsberechnung erweitern lässt. Eine Möglichkeit, dennoch auf den schnellen SAT zurückzugreifen, besteht in der Ausdehnung einer der beiden OBBs um die Sicherheitsdistanz in alle Raumrichtungen im Fall eines Roboterquaders bzw. bei dynamischen Hindernissen, die an der z-Achse des Roboterbasiskoordinatensystems K_0 ausgerichtete OBBs darstellen, in der x_0y_0 -Ebene. Dieser konservative Ansatz kann zu falschen Positivtests, die eine nicht vorhandene Unterschreitung des Mindestabstands ergeben, führen, vermeidet jedoch drohende Kollisionen und wird zur Überprüfung definierter Entfernungen zwischen zwei Quadern umgesetzt. Die Hüllkörper basierte Modellierung des Roboters mittels OBBs, SSLs und Kugeln wird ebenso wie der Einsatz der dreistufigen Sphere Tree-Hüllkörperhierarchie entsprechend des Einsatzes beim autonomen Bahnplanungsverfahren übernommen (siehe Kapitel 5.2.2).

Eine alternative Herangehensweise stellt die Verwendung allgemeingültigerer Verfahren zur Abstandsberechnung zwischen der Robotergeometrie und Menschen dar. Beispiele hierfür sind die in Kapitel 2.3.3 erwähnten, inkrementellen Verfahren wie der für konvexe Polyeder anwendbare Lin-Canny-Closest-Feature-Tracking-Algorithmus oder der generalisierte Gilbert-Johnson-Keerthi (GJK)-Algorithmus für generelle, konvexe Objekte [244].

6.3 Diskussion des vorgestellten Ansatzes

Die Verifikation der Funktionsfähigkeit einzelner Entfernungsprüfungen anhand eines kommerziellen CAD-Systems sowie deren Visualisierung auf Basis des entwickelten Famos-Interface-Plugins bestätigen die grundsätzliche Anwendbarkeit des realisierten Ansatzes zur Online-Kollisionsvermeidung in der Simulation.

Für eine sichere und sinnvolle Festlegung des zu berücksichtigenden Mindestabstands zwischen Personen und dem Roboter sind die relevanten Zeitanteile aller Komponenten durch ausführliche Tests mit Worst-Case-Annahmen zu ermitteln. Die Einhaltung maximaler Zeitschranken zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs erfordert zudem eine echtzeitfähige Rechnerhardware, welche die eingesetzte Testplattform (vgl. Kapitel 4.3.2) im Rahmen des prototypisch realisierten Roboter-Assistenzsystems nicht ermöglicht. Dieses zielt, wie in Kapitel 3.2 erläutert, nicht darauf ab, die normativen Anforderungen hinsichtlich der sicherheitsbezogenen Leistungsfähigkeit der Steuerung zu erfüllen.

Problematisch im praktischen Einsatz können sich als relativ groß herausstellende Sicherheitsabstände auf Grund hoher Nachlaufzeiten des Gesamtsystems erweisen. Zusätzlicher Platzbedarf um die Roboterinstallation und große Anbringungshöhen des Tiefensensors führen dazu, dass die angestrebten Zielstellungen der Wirtschaftlichkeit und die durch eine Mensch-Roboter-Kooperation erwünschte Flexibilität nur eingeschränkt oder nicht erreicht werden. Entsprechend können wie in Kapitel 4.3.3 dargelegte Ansätze, die Verarbeitungsraten der Arbeitsraumüberwachung und der Abstandsprüfungen zu optimieren, verfolgt werden. Gegebenenfalls ist auch eine Reduktion der Robotergeschwindigkeit zur Minimierung der damit einhergehenden Anhaltezeiten sinnvoll.

7 Integration in ein Montagesystem zur Unterstützung leistungsgeminderter Mitarbeiter

Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Teilkomponenten für eine sichere und flexible Mensch-Roboter-Kooperation werden im Rahmen des Forschungsprojektes AsProMed (Assistenzsysteme für die Produktion und Medizin nahe Anwendungen) in ein funktionsfähiges, prototypisches Montagesystem zur Unterstützung leistungsgeminderter Werker integriert. Einen Überblick der relevanten Beiträge aller beteiligten Forschungspartner gibt hierzu [P8].

7.1 Motivation und Randbedingungen für den Einsatz eines Roboter-Assistenzsystems in einer Behindertenwerkstatt

Wesentliche Zielstellungen der in dieser Arbeit entwickelten Arbeitsraumüberwachung und autonomen Bahnplanung zur Realisierung von MRK-Systemen in der Fertigung stellen die Erhöhung der Ergonomie und Wirtschaftlichkeit dar. Neben dem Einsatz in Industrieunternehmen können Roboterassistenten jedoch auch einen wichtigen Beitrag in der Unterstützung von leistungsgeminderten und -gewandelten Personen zur Befähigung höherwertiger Arbeitstätigkeiten leisten. Die Motivation für den Einsatz des Industrieroboters liegt hierbei nicht in einer prinzipiell realisierbaren Vollautomatisierung oder in einer teilautomatisierten Kooperation zur Effizienzsteigerung, sondern in der Übernahme ausgewählter Aufgabenschritte, welche die Mitarbeiter auf Grund körperlicher Einschränkungen nicht selbst ausführen können. Anhand eines beispielhaften Montageprozesses in einer Behindertenwerkstatt der Diakonie Neuendettelsau wird die grundsätzliche Machbarkeit eines Industrieroboter basierten Assistenzsystems aufgezeigt. Beim betrachteten Anwendungsfall sind sperrige Holzpaletten zu handhaben und mittels eines Nagelvorgangs zu fügen. Da dies ohne zusätzliche Unterstützung für bestimmte Werkergruppen, wie Mitarbeiter im Rollstuhl, nicht durchführbar ist, arbeiten nur wenige Personen in der Holzwerkstatt. Durch den Einsatz des Assistenzsystems soll es weiteren Mitarbeitern möglich werden, ihr Aufgabenspektrum durch selbst gesteuerte Übertragung entsprechender Montageschritte auf den Roboter zu erweitern. Das Anwendungsszenario ist in Bild 55 (Mitte) veranschaulicht. Die einzelnen Palettenteile sind auf einer Werkstückaufnahme grob positioniert und können durch einen am Industrieroboter angebrachten Druckluftnagler gefügt werden.

Im betrachteten Fall einer Behindertenwerkstatt sind anders als bei vielen Industrieunternehmen keine, in der Nutzung und Programmierung von Industrierobotern erfahrenen Fachexperten verfügbar. Als besondere Randbedingung ist somit ein sicherer und einfach zu bedienender Roboterassistent zu realisieren, der mittels intuitivem Feedback den aktuellen Systemstatus vermittelt.

7.2 Aufbau und Teilkomponenten des Montage-Assistenzsystems

Die sich aus den genannten Anforderungen ergebenden, wesentlichen Teilkomponenten des Montagesystems, welche durch alle beteiligten Forschungspartner des Projektes realisiert werden, sowie dessen Gesamtaufbau sind in Bild 55 überblicksartig dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert. Als Industrieroboter wird der in den vorherigen Kapiteln bereits betrachtete RV30-16 von Reis eingesetzt, der mit einer maximalen Traglast von 16 kg die Voraussetzungen für den Werkzeugeinsatz und der Anbringung zusätzlicher Peripheriekomponenten am Roboterflansch erfüllt. Zudem verfügt er über eine sichere Steuerung, sodass das sichere Einhalten vorgegebener Geschwindigkeiten und Positionen gewährleistet werden kann.



Bild 55: Wesentliche Teilkomponenten des Montagesystems zur Unterstützung leistungsgeminderter Mitarbeiter aller beteiligten Forschungspartner

Gewährleistung der Systemsicherheit

Zur Realisierung eines prototypisch sicheren, auf einem inhärent nicht sicheren Standard-Industrieroboter basierenden Montage-Assistenzsystems dient die in Kapitel 4 beschriebene 3D-Kamera gestützte Umgebungserfassung. Die Tiefenkamera wird zentral über dem vorderen Arbeitsbereich des Roboters an einem Gestell unter der Decke der Holzwerkstatt neben einem Projektor und einer Netzwerkkamera (siehe Bild 55 Mitte und links oben) angebracht, um sich nähernde Personen und neue Objekte möglichst verdeckungsfrei detektieren zu können. Direkt hinter dem Roboter befindet sich eine Seitenwand der Werkstatt, sodass dieser Bereich nicht zusätzlich abgesichert wird. Als statische Hindernisse werden die unbeweglichen Roboterelemente wie der Sockel und die Steuerungseinheit, ein die Werkzeugaufnahme beinhaltender Arbeitstisch vor dem Roboter sowie die zur Anbringung der Kamera und weiterer Komponenten dienende Balkenstruktur auf beiden Seiten im vorderen Roboterarbeitsraum modelliert wie Bild 56 als Ausschnitt einer Famos-Visualisierung zeigt.



Bild 56: Eingesetztes Umgebungsmodell mit manuell definierten, statischen Hindernissen (links) und Ausschnitt einer autonom umgeplanten, kollisionsfreien Roboterbewegung (rechts) des Montage-Assistenzsystems

Nach einmaliger Roboter-Kamera-Kalibrierung und der Aufnahme des Hintergrunds zu Beginn des Robotereinsatzes werden alle zur Systemlaufzeit dynamisch detektierten Objekte in Form der erweiterten, XML-basierten Umgebungsbeschreibung an die Robotersteuerung RSV übermittelt. Über das XML-Attribut *error* kann seitens der Robotersteuerung auf erkannte Fehler reagiert werden, falls beispielsweise auf Grund fehlerhafter Pixelwerte der Kamera zu viele kleine Objekte erstellt werden. Die Kollisionsvermeidung erfolgt durch Implementierung von Entfernungsprüfungen auf Basis der Hindernisdaten und definierter Abstandsschranken zur Geschwindigkeitsanpassung bis zum Stillstand direkt in der Robotersteuerung durch Reis Robotics. Anhand des in Kapitel 5 beschriebenen autonomen Pfadplaners kann eine ungültig gewordene Bewegungsbahn neu berechnet werden, falls sich die Umgebung während des Betriebs verändert. Einen Ausschnitt einer autonom umgeplanten, kollisionsfreien Bewegung auf Grund eines detektierten, statischen Hindernisses zeigt Bild 56 rechts.

Einfache Bedienbarkeit des Montagesystems

Um eine einfache Bedienung des Montage-Assistenzsystems zu realisieren, wird durch den Lehrstuhl für Informatik VII, Robotik und Telematik (LRT), der Universität Würzburg eine intuitive Fernsteuerung des Industrieroboters auf Basis einer graphischen Benutzeroberfläche (siehe Bild 55 rechts unten) erstellt. Hierdurch wird ohne die Notwendigkeit spezieller Robotikvorkenntnisse sowohl ein Einlernen neuer Zielposen durch Betreuungspersonal als auch das Auswählen geteachter Nagelpositionen zur Ausführung von Roboterprogrammen durch leistungsgeminderte Mitarbeiter ermöglicht. Neue Roboterposen können mittels eines im Rahmen des Projektes durch den Lehrstuhl für Eingebettete Systeme (Embedded Systems Lab, ESL) der Universität Passau entwickelten Eingabegeräts (siehe Bild 55 rechts oben) vorgegeben werden. Dieses besitzt die Form eines Zeigestifts, mit dem intuitiv eine aktuelle Bearbeitungspose im Raum ausgewählt und gespeichert werden kann. Die Positions- und Orientierungsdaten werden hierbei aus einer Kombination eines ortsfesten Magnetfeldmess- und eines am Roboterflansch angebrachten Stereokamerasystem ermittelt. Auf Basis vorgegebener Nagelpositionen wird mittels des autonomen Pfadplaners die Kollisionsfreiheit der direkten Bewegungsbahn überprüft und, falls notwendig, ein neuer Weg gesucht. Die graphische Benutzeroberfläche dient zudem zur Visualisierung von durch die Umgebungserfassung detektierten Hindernissen anhand ihrer berechneten Hüllkörper und zur Vorabdarstellung von geplanten Roboterbewegungen auf dem Bildschirm (siehe jeweils Bild 55 rechts unten).

Generierung eines intuitiven Systemfeedbacks

Um den in der Robotik unerfahrenen Anwendern und Programmierern des Assistenzsystems ein Verständnis des aktuellen Roboterzustandes und der Systemabläufe zu vermitteln, wird vom LRT eine Augmented Reality (AR)-Komponente entwickelt. Diese besteht aus einer Netzwerkkamera zur Aufnahme und Darstellung der aktuellen Szene auf der Benutzeroberfläche sowie einem stationären und einem am Roboterwerkzeug installierten, mobilen Beamer zur Projektion komplexer Daten, wie ausgewählter Nagelzonen auf der Holzpalette, aktuell detektierter Hindernisse im Arbeitsraum (siehe jeweils Bild 55 links unten) sowie geplanter Roboterbewegungen. Für letztere erfolgt eine Übertragung aller durch den autonomen Bahnplaner generierten Zwischenposen an die AR-Einheit.

7.3 Diskussion des realisierten Demonstratorsystems

Im Montagesystem zur Unterstützung leistungsgeminderter Mitarbeiter wird die Integration aller beschriebenen Teilkomponenten zur prototypischen Realisierung der Sicherheit und einfachen Bedienbarkeit vor dem Hintergrund nicht vorhandener Robotikkenntnisse erfolgreich demonstriert. Hierbei werden die in dieser Arbeit entwickelten Komponenten der Arbeitsraumerfassung, -interpretation und autonomen Bahnplanung in einer Anwendung zur Mensch-Roboter-Koexistenz eingesetzt, bei welcher der Mensch direkten Einfluss auf den Ablauf nimmt.

In verschiedenen Praxistests zeigt sich, dass Personen auf Basis der umgesetzten Arbeitsraumüberwachung rechtzeitig detektiert werden, sodass der sich bewegende Roboter im Fall einer Annäherung kontinuierlich bis zum Stillstand verlangsamt und nach deren Entfernen wieder beschleunigt wird, wie Bild 57 beispielhaft zeigt. Anhand auf dem Arbeitstisch positionierter, statischer Hindernisse wird die Funktionsfähigkeit sowohl der Objekterkennung als auch der autonomen Umplanung der Roboterbewegung bestätigt. Die erfolgreiche Detektion von Kollisionsobjekten im Betrieb wird zusätzlich über die zweidimensionale Visualisierung der Arbeitsraumüberwachung (vgl. Kapitel 4.3.1), die AR-Bodenprojektion und Einblendung auf der graphischen Benutzeroberfläche zur Ablaufsteuerung nachgewiesen.



Bild 57: Ausschnitte der Kollisionsvermeidung durch Reduktion der Robotergeschwindigkeit bis zum Stillstand im Fall einer detektierten, sich nähernden Person

Hinsichtlich des realisierten Pfadplaners können die bereits angesprochenen Probleme beobachtet werden, dass im Fall einer Umplanung nicht immer ein vorhandener Weg gefunden wird und die Berechnungsdauer als zu lang empfunden werden kann. Dies wird durch die neben dem eigentlichen Roboterwerkzeug zusätzlichen, am Roboterflansch angebrachten Komponenten wie dem mobilen Beamer und der Stereokamera und einem damit verbundenen großen Hüllkörper erschwert, sodass sich der verfügbare, kollisionsfreie Bewegungsraum reduziert. Teilweise wird die Umgebungserfassung durch einige am Roboterarm herabhängender Kabel, welche nicht durch die Hüllkörperapproximation abgedeckt werden, gestört. Fehlerhafte Wahrscheinlichkeitskategorien einzelner Pixel führen hierbei zu einer falschen Objekterstellung. Da alle von den beteiligten Forschungspartnern entwickelten Komponenten Daten an die Robotersteuerung senden bzw. abfragen, wird ein Kommunikationsserver des LRT als zentrale Schnittstelle zur RSV eingesetzt. Hierdurch werden im Vergleich zu mehreren Einzelverbindungen zusätzliche, durch den parallelen Zugriff entstehende Latenzzeiten vermieden. Insgesamt resultiert jedoch eine langsamere Übertragung als bei lediglich einer direkten Punkt-zu-Punkt-Kommunikation. Das Montagesystem wird in der Holzwerkstatt aufgebaut, welche sich im Freien befindet und nur teilweise durch Seitenwände und einer Überdachung vor dem Einfluss von äußeren Witterungsbedingungen geschützt ist. Auf Grund von zu starker Sonneneinstrahlung, großen Temperaturunterschieden sowie durch die Holzbearbeitung hervorgerufenem Staub kann das optische Sensorsystem, das für den Einsatz im Innenbereich ausgelegt ist, gestört werden, sodass höhere Abweichungen der Tiefenwerte auftreten können. Für eine Nutzung eines entsprechenden Roboter-Assistenzsystems im Betrieb sind neben der Behebung der auf Grund des prototypischen Systemaufbaus bedingten Probleme weitere Nutzerstudien notwendig, um eine gezielte Anpassung der Mensch-Maschine-Schnittstelle an die jeweiligen Anwender zu ermöglichen und die Akzeptanz des unterstützenden Industrieroboters zu evaluieren.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden wesentliche Teilkomponenten für ein sicheres und flexibles Industrieroboter basiertes Unterstützungssystem zur Ermöglichung der Mensch-Roboter-Kooperation entworfen, realisiert und am Beispiel eines Montageprozesses in einer Behindertenwerkstatt prototypisch aufgebaut und erprobt. Primäre Zielstellungen sind die Entlastung einer im Durchschnitt immer älter werdenden Belegschaft von körperlich stark beanspruchenden, ermüdenden und repetitiven Aufgabenstellungen in der Produktion und eine damit verbundene Steigerung der Mitarbeiterzufriedenheit sowie eine fähigkeitsorientierte Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter zur Erhöhung der Produktivität. Automatisierbare und für den Menschen wenig zufriedenstellende Arbeitsschritte werden durch die Nutzung eines MRK-Systems auf einen Industrieroboter übertragen. Eine in dieser Arbeit gezeigte, weitere Einsatzmöglichkeit ist die Unterstützung leistungsgeminderter Personen in Behindertenwerkstätten, wobei die Befähigung zu höherwertigen Aufgabeninhalten im Vordergrund steht. Das Industrieroboter-Assistenzsystem wird auf Basis der einfach strukturierten sowie zeiteffizienten Komponenten einer 3D-Kamera gestützten Umgebungserfassung, einer autonomen Pfadplanung sowie einer sicheren Kollisionsvermeidung als übergeordnete, externe Planungseinheit konzipiert. Die Basisfunktionalitäten der Feininterpolation und Achsregelung können in Echtzeit und sicherer Technik weiterhin auf dem Robotersystem ausgeführt werden.

Mit der umgesetzten Arbeitsraumerfassung und -absicherung wird ein Lösungsansatz zum intelligenteren Einsatz von inhärent nicht sicheren Industrierobotern der Kollaborationsart der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung sowie für robotische Anwendungen, bei denen auf Grund der Gefährdung ein Mindestabstand zu Personen eingehalten werden muss, entwickelt. Bisher am Markt verfügbare Systeme wie Sicherheitslaserscanner oder das Pilz SafetyEye, die über eine ausreichend hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Ausfällen verfügen, erlauben lediglich die Anwesenheitserkennung von Objekten ohne eine weitergehende Klassifikation und entsprechend angepasste Reaktionsstrategie. Die Umgebungserfassung und -interpretation des Roboterarbeitsraums zur Gewährleistung der Sicherheit sowie zur Generierung von Eingangsdaten für eine kollisionsfreie Bahnplanung basieren auf dem Einsatz einer ortsfesten Tiefenkamera. Anhand der realisierten Roboter-Kamera-Kalibrierung zur Ermittlung der Kamerapose im Roboterbasiskoordinatensystem kann eine schnelle Anpassung an unterschiedliche Umgebungen und Roboter erfolgen. Eine neuartige Kombination aus einem pixel- sowie regionenbasierten Verfahren, bei welchem das aktuelle Differenzbild mittels Wahrscheinlichkeitskategorien klassifiziert wird, ermöglicht die robuste Detektion und Lokalisierung von Objekten, welche zur zeiteffizienten

weiteren Verarbeitung durch einfache geometrische Volumenkörper modelliert werden. Ohne den Einsatz komplexer und zeitaufwändiger Deskriptoren wird unter Nutzung weniger Übereinstimmungsmerkmale eine schnelle Wiedererkennung von Objekten ermöglicht. Zur Realisierung angepasster Reaktionsstrategien des Assistenzroboters im Fall einer drohenden Kollision erfolgt eine konservative Klassifizierung in Personen und andere statische bzw. dynamische Hindernisse.

Der effiziente und flexible Einsatz eines Industrieroboters bei sich ändernden Umgebungsbedingungen oder dem Fehlen von Fachpersonal mit entsprechenden Programmierkenntnissen erfordert eine autonome Generierung kollisionsfreier, möglichst kurzer Roboterbewegungsbahnen. Zu diesem Zweck wird ein neuartiger Planer auf Basis der Zellzerlegung des Arbeitsraums für den betrachteten und weit verbreiteten Anwendungsfall des vertikalen Sechsachs-Knickarmroboters mit Zentralhand umgesetzt. Hierbei wird zur Reduktion des Planungsraums zunächst ein kollisionsfreier Weg für den Roboter-TCP in freien Zellbereichen ermittelt und anschließend die Machbarkeit für den vollständigen Roboterarm überprüft. An nicht anfahrbaren Konfigurationen werden sogenannte künstliche Hindernisse zur Berücksichtigung bei einem neuen Planungsdurchlauf erstellt. Die Zielstellung, einen nachvollziehbaren und möglichst direkten Weg um Hindernisse zu generieren, kann in den meisten Testszenarien erreicht werden. Problematisch zeigen sich die benötigte Berechnungszeit sowie die Nichtvollständigkeit des Planers, welche sich vor allem durch die Orientierungseinschränkung des Verfahrens ergibt. Konkretisierungen für den verallgemeinerbaren Ansatz erfolgen für die beiden Testroboter Reis RV30-16 sowie Stäubli TX60L.

Durch Integration in ein in nicht sicherer Technik ausgeführtes Montage-Assistenzsystem für leistungsgeminderte Personen werden die Funktionsfähigkeit der Arbeitsraumüberwachung und der autonomen Bahnplanung anhand eines realen Anwendungsfalls nachgewiesen. Hierbei werden ein Reis Industrieroboter RV30-16 sowie Standard-Hardware zur Informationsverarbeitung eingesetzt. Eine erfolgreiche Evaluierung der Umgebungserfassung erfolgt zudem mit einem Stäubli-Roboter TX6oL im Praxistest sowie des Bahnplanungsverfahrens auf Basis eines entwickelten Famos-Interface-Plugins in der Simulation. Für einen Einsatz im Betrieb bedarf es jedoch der durchgängigen Verwendung sicherer Einzelkomponenten zur Erstellung eines den Normenanforderungen entsprechenden Gesamtsystems. Dies trifft sowohl auf die zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht verfügbare 3D-Sensorik als auch auf die Datenverarbeitung mit zu gewährleistenden Echtzeitanforderungen zu. Durch zukünftig zu erwartende Entwicklungen im Bereich kostengünstiger, leistungsfähiger und möglicherweise sicherer Tiefenkameras und weiterer Sensorik sowie eine stetig steigende Rechenleistung können die

Voraussetzungen für eine breite Anwendung von nicht kraft- und leistungsbegrenzten, kollaborierenden Robotersystemen geschaffen werden. Der flächendeckende Einsatz von flexiblen und sicheren MRK-Systemen in der Fertigung erfordert weitere, vielfältige Entwicklungs- und Forschungsanstrengungen der betroffenen Themenfelder, wie beispielsweise zur Realisierung intuitiver und akzeptierter Mensch-Maschine-Schnittstellen oder der optimalen Aufgabenteilung zwischen Assistenzrobotern und Personen. Ein wesentlicher Forschungsbedarf ist hierbei die geeignete Kombination und Datenauswertung stationärer und mitgeführter Sensoren, um eine umfassende, zeiteffiziente und wirtschaftliche Umgebungsklassifikation zu ermöglichen. Beispielsweise ist der Einsatz niedrigpreisiger Sensoren für lediglich nicht sicherheitskritische Zusatzfunktionen denkbar. Zur Verwirklichung zukünftiger intelligenter und flexibler Robotersysteme sind zudem die sinnvolle Auslagerung, Verteilung und adäquate Bereitstellung von wiederverwendbaren Teilaufgaben zu erforschen. Komplexe Programme zur übergeordneten Bewegungsplanung oder Objektklassifikation könnten so ohne strikte Zeitvorgaben ortsunabhängig entwickelt und bei Bedarf von unterschiedlichen Systemen in Anspruch genommen werden.

9 Summary and prospects

In this thesis essential components of a secure und flexible industrial robot based assistance system for enabling human-robot cooperation (HRC) are designed, realized and prototypicly built up and tested using the example of an assembly process in a working place for disabled people. The main objectives are relieving an on average aging personnel of highly physically burdening, exhausting and repetitive production tasks and thereby increasing the satisfaction of employees as well as splitting up capability based the labour between humans and robots for raising the productivity. Automatable and poorly satisfying production steps are transferred to an industrial robot by the use of an HRC system. Another application that is shown in this thesis is the assistance in working places for handicapped, where enabling people to perform higher demanding work content is focussed. The industrial robot assistance system is designed as a higher-level, external planning unit on the basis of the simply structured as well as time efficient components of an environment surveillance using a 3D camera, an autonomous path planning and a safe collision avoidance. The basic functionalities of fine interpolation and axis control can still run in real-time and failsafe technology on the robot system.

An approach for the more intelligent use of inherent not safe industrial robots of the collaboration type of velocity and distance control as well as for robotic applications, where due to exposures to hazard a minimum distance has to been kept to people, is developed by the realised work space surveillance and protection. So far available market systems as security laser scanners or the Pilz SafetyEye, which possess a sufficiently high resistance against failures, merely permit the detection of present objects without a further classification and an appropriate adjusted reaction strategy. The environment surveillance and interpretation of the robot work space for guaranteeing the security as well as for generating the input data for a collision free path planning are based on the use of a stationary depth camera. By means of the realised robotcamera calibration for determining the camera pose in the robot base coordinate system a fast adaption to different surroundings and robots can take place. A novel combination of a pixel and region based method, which uses probability categories for classifying the current difference image, enables the robust detection and localisation of objects, which are modelled by simple geometric volumetric bodies for time efficient further processing. Without using complex and time consuming descriptors a fast recognition of objects is provided on the basis of few matching criteria. For realising adapted reaction strategies of the assistance robot in case of an imminent collision a conservative classification into persons and other static respectively dynamic obstacles takes place.

The efficient and flexible use of industrial robots during changing ambient conditions or the lack of experts with appropriate programming knowledge requires an autonomous generation of collision free, preferably short robot paths. For this purpose a novel planner using the cell decomposition technique for the use case of the vertical six-axis articulated robot with in-line wrist is implemented. Firstly a collision free path for the robot TCP is determined in the free cell regions for reducing the planning space and then the feasibility for the whole robot arm is verified. At non reachable configurations so-called artificial obstacles are created for consideration in a new planning cycle. The objective of generating a comprehensible and preferably direct path around obstacles can be reached in the most test scenarios. Appearing problems are the required processing time as well as the incompleteness of the planner, which arises mainly from the orientation restriction of the method. Concrete adaptions of the generalised approach are realised for the two test robots Reis RV30-16 as well as Stäubli TX60L.

By integration into an assembly assistance system for disabled people, implemented in non-safe technique, the functional capability of the work space surveillance and the autonomous path planning are verified on the basis of a real application using a Reis RV30-16 industrial robot and standard hardware for data processing. In addition a successful evaluation of the ambient recognition takes place with a Stäubli TX6oL robot in a practical test scenario and of the path planning method on the basis of a developed Famos interface plugin in a simulation environment. An operational use, however, requires a consistent integration of secure individual components for providing an overall system which meets the requirements of all standards. This applies to the deployed 3D sensor technology, that is not available until now, as well as to the data processing assuring real time demands. On the basis of expectant developments in the future in the area of cost-efficient, powerful and possibly secure depth cameras and other sensors as well as the continuously increasing computing power the conditions for a broad usage of non-force and power limited, collaborative robot systems can be provided. The widespread application of flexible and safe HRC systems in the area of production requires other, various development and research efforts in the tangent fields, as for example realising intuitive and accepted human-robot interfaces or an optimal task sharing between assistance robots and humans. In this context an essential need for research lies in the appropriate combination and data processing of stationary and movable sensors for enabling a comprehensive, time efficient and economic classification of the environment. A possible example is the use of low-priced sensors for merely non-safety critical, additional functionalities. Moreover, for realising future intelligent and flexible robot systems the reasonable separation, distribution and adequate provision of reusable tasks have to be addressed by research. By this means
complex programs for higher-level motion planning or object classification could be developed without strict time limits location-independent and used by different systems as needed.

Literaturverzeichnis

- [1] International Federation of Robotics (IFR): *Executive Summary World Robotics 2016 Service Robots*. 2016
- [2] Fetch Robotics: Datasheet Fetch. 2015
- [3] UNIVERSAL ROBOTS: About Universal Robots News Centre: Universal Robots experiencing rapid growth, doubling revenue and profit in 2014. 2015-04-17. URL http://www.universal-robots.com/about-universalrobots/news-centre/universal-robots-experiencing-rapid-growthdoubling-revenue-and-profit-in-2014/
- [4] DIN EN ISO 10218-1. Juli 2009. Industrieroboter Sicherheitsanforderungen
 Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2006, einschließlich Berichtigung 1:2007);
 Deutsche Fassung EN ISO 10218-1:2008
- [5] DIN EN ISO 10218-1. Januar 2012. Industrieroboter -Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-1:2011
- [6] DIETZ, T.: Mensch-Roboter-Kollaboration: Nutzen, Technik, Anwendungsbeispiele und Entwicklungsrichtung (Sichere Mensch-Maschine-Kooperation). Erlangen, 2012-04-18
- [7] E DIN EN ISO 8373. November 2010. Roboter und Robotikgeräte -Wörterbuch (ISO/DIS 8373:2010); Deutsche Fassung prEN ISO 8373:2010
- [8] DIN EN ISO 10218-2. Juni 2012. Industrieroboter Sicherheitsanforderungen
 Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-2:2011
- [9] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA;
 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; HÄGELE,
 M. (Mitarb.); BLÜMLEIN, N. (Mitarb.); KLEINE, O. (Mitarb.): Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik-Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung (EFFIROB). 1. Auflage. 2011
- [10] VDI-Richtlinie 2860. Mai 1990. Montage- und Handhabungstechnik -Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole
- [11] VDI-Richtlinie 6222 Blatt 1. November 2013. Bionik Bionische Roboter
- PESHKIN, M. A.; COLGATE, J. E.; WANNASUPHOPRASIT, W.; MOORE, C. A.;
 GILLESPIE, R. B.; AKELLA, P.: Cobot architecture. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 17 (2001), Nr. 4, S. 377–390
- [13] POTT, A.; NAUMANN, M.; HÄGELE, M.; VERL, A.: Industrieroboter und Handhabungsgeräte. In: FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G. (Hrsg.):

Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014 (Handbuch der Fertigungstechnik), S. 316–336

- [14] DGUV-Information 209-074 (bisher BG-Information 5123). Juni 2008. Industrieroboter
- [15] THIEMERMANN, S.: Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter. Stuttgart, Universität Stuttgart: Dissertation. 2005
- [16] REINHART, G.; RÖSEL, W.: Interaktiver Assistenzroboter in der Montage: Sicherheitsaspekte in der Mensch-Roboter-Kooperation. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010), 1-2, S. 80–83
- [17] VOGEL, C.; WALTER, C.; ELKMANN, N.: A projection-based sensor system for safe physical human-robot collaboration. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013, S. 5359–5364
- [18] LEE, S.-D.; KIM, M.-C.; SONG, J.-B.: Sensorless collision detection for safe human-robot collaboration. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, S. 2392–2397
- [19] HADDADIN, S.; ALBU-SCHÄFFER, A.; LUCA, A. de; HIRZINGER, G.: Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2008, S. 3356–3363
- [20] DING, H.: Optimization-based robotic manipulation for safe interaction with human operators. Kassel, Universität Kassel: Dissertation. 2013
- [21] SPILLNER, R.: Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion. Dissertation, München, Technische Universität, 2014. München: Herbert Utz Verlag GmbH, 2015 (Forschungsberichte IWB 296)
- [22] HENRICH, D.; FISCHER, M.; GECKS, T.; KUHN, S.: Sichere Mensch/Roboter-Koexistenz und Kooperation. In: *Robotik 2008. Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends: Tagung München, 11. und 12. Juni 2008.* Düsseldorf: VDI-Verlag, 2008 (VDI-Berichte, 2012).
- [23] SHEN, Y.: System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage.
 Dissertation, München, Technische Universität, 2015. München:
 Herbert Utz Verlag GmbH, 2015 (Forschungsberichte IWB 305)
- [24] TIMPE, K.-P.: Unterstützungssysteme als interdisziplinäre Herausforderung - Einführung in die Tagung "Wohin führen Unterstützungssysteme?". In: WILLUMEIT, H.-P.; KOLREP, H. (Hrsg.): Wohin führen Unterstützungssysteme?: Entscheidungshilfe und Assistenz in Mensch-Maschine-Systemen. 2. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme 7.-9. Oktober

1997. 1. Auflage. Sinzheim: Pro Universitate Verlag, 1998 (ZMMS-Spektrum, Bd. 5), S. 1–20

- [25] KLINDT, T.; KRAUS, T.; VON LOCQUENGHIEN, D.; OSTERMANN, H.-J.: *Die neue EG-Maschinenrichtlinie* 2006/42/EG. DIN Deutsches Institut f
 ür Normung e. V. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006
- [26] NEUDÖRFER, A.: Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie.
 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014
- [27] LACH, S.; POLLY, S.: *Produktsicherheitsgesetz: Leitfaden für Hersteller und Händler*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012
- [28] DGUV-Information FB HM-080. November 2015. Kollaborierende Robotersysteme - Planung von Anlagen mit der Funktion "Leistungs- und Kraftbegrenzung"
- [29] EUROPÄISCHE KOMMISSION: Informationen der Organe, Einrichtungen und sonstigen Stellen der Europäischen Union: Mitteilung der Kommission im Rahmen der Durchführung der Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung) (Veröffentlichung der Titel und der Bezugsnummern der harmonisierten Normen im Sinne der Harmonisierungsrechtsvorschriften). 2014-07-11 (Amtsblatt der Europäischen Union C 220)
- [30] DIN EN ISO 12100. März 2011. Sicherheit von Maschinen Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010); Deutsche Fassung EN ISO 12100:2010
- [31] DIN ISO/TR 14121-2 (DIN SPEC 33885). Februar 2013. Sicherheit von Maschinen - Risikobeurteilung - Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele (ISO/TR 14121-2:2012)
- [32] DIN EN 61508 (Teile 1-7) (VDE 0803). Februar 2011. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme
- [33] DIN EN ISO 11161. Oktober 2010. Sicherheit von Maschinen Integrierte Fertigungssysteme - Grundlegende Anforderungen (ISO 11161:2007 + Amd 1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 11161:2007 + A1:2010
- [34] DIN EN ISO 13849-1. Juni 2016. Sicherheit von Maschinen Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2015
- [35] DIN EN ISO 13849-2. Februar 2013. Sicherheit von Maschinen Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung (ISO 13849-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13849-2:2012

- [36] DIN EN ISO 13855. Oktober 2010. Sicherheit von Maschinen Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen (ISO 13855:2010); Deutsche Fassung EN ISO 13855:2010
- [37] DIN EN ISO 13857. Juni 2008. Sicherheit von Maschinen Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen (ISO 13857:2008); Deutsche Fassung EN ISO 13857:2008
- [38] DIN EN 62046 (VDE 0113-211). April 2013. Sicherheit von Maschinen -Anwendungen von Schutzausrüstungen zur Anwesenheitserkennung von Personen (IEC 44/679/CD:2012)
- [39] DIN EN 60204-1 (VDE 0113-1). Juni 2007. Sicherheit von Maschinen -Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 60204-1:2005, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60204-1:2006
- [40] DIN EN 61496-1 (VDE 0113-201). Mai 2014. Sicherheit von Maschinen Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen (IEC 61496-1:2012); Deutsche Fassung EN 61496-1:2013
- [41] DIN EN 62061 (VDE 0113-50). Mai 2016. Sicherheit von Maschinen Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme (IEC 62061:2005 + A1:2012 + A2:2015); Deutsche Fassung EN 62061:2005 + Cor.:2010 + A1:2013 + A2:2015
- [42] DIN EN 954-1. März 1997. Sicherheit von Maschinen Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze; Deutsche Fassung EN 954-1:1996
- [43] GEHLEN, P.: Funktionale Sicherheit von Maschinen und Anlagen: Umsetzung der europäischen Maschinenrichtlinie in der Praxis.
 2. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing, 2010
- [44] WRATIL, P.; KIEVIET, M.; RÖHRS, W.: Sicherheit für Maschinen und Anlagen: Mechanische Einheiten, elektronische Systeme und sicherheitsgerichtete Programmierung. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag GMBH, 2010
- [45] DIN EN 61496-2 (VDE 0113-202). Juni 2014. Sicherheit von Maschinen -Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 2: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, welche nach dem aktiven opto-elektronischen Prinzip arbeiten (IEC 61496-2:2013); Deutsche Fassung EN 61496-2:2013
- [46] DIN CLC/TS 61496-3 (VDE V 0113-203). August 2009. Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 3: Besondere Anforderungen an aktive optoelektronische diffuse Reflektion nutzende Schutzeinrichtungen (AOPDDR) (IEC 61496-3:2008); Deutsche Fassung CLC/TS 61496-3:2008

- [47] DIN IEC 61496-4-2 (VDE 0113-204-2). Dezember 2010. Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 4-2: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, die bildverarbeitende Schutzeinrichtungen (VBPD) verwenden - zusätzliche Anforderungen bei Verwendung von Testmusterverfahren (IEC 44/613/CD:2010)
- [48] DIN IEC/TS 61496-4-3 (VDE V 0113-204-3). Dezember 2012. Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 4-3: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, die bildverarbeitende Schutzeinrichtungen (VBPD) verwenden - Zusätzliche Anforderungen bei Verwendung von Stereoverfahren (VBPDST) (IEC 44/667A/CD:2012)
- [49] VDMA-Position Paper "Safety in Human-Robot-Collaboration". Mai 2014
- [50] U 001/2009. Februar 2011. BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie - Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern
- [51] PARLITZ, C.: *Leichtbauarme für die Mensch-Roboter-Kooperation* (Technikforum - Produktion 2020: Sichere Mensch-Maschine und Mensch-Roboter-Kooperation). Nördlingen, 2012-01-17
- [52] DIN EN ISO 13482. November 2014. Roboter und Robotikgeräte Sicherheitsanforderungen für persönliche Assistenzroboter (ISO 13482:2014); Deutsche Fassung EN ISO 13482:2014
- [53] LATOMBE, J.-C.: Robot motion planning. Boston: Kluwer, 1991
- [54] SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G.: *Robotics: Modelling, planning and control.* London: Springer, 2009
- [55] CHOSET, H.; LYNCH, K.; HUTCHINSON, S.; KANTOR, G.; BURGARD, W.; KAVRAKI, L. E.; THRUN, S.: *Principles of robot motion: Theory, algorithms and implementation.* Cambridge: The MIT Press, 2005
- [56] CHUNG, W.; FU, L.-C.; HSU, S.-H.: Motion control. In: SICILIANO, B.;
 KHATIB, O. (Hrsg.): Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, 2008, S. 133–159
- [57] GATTRINGER, H.: *Starr-elastische Robotersysteme: Theorie und Anwendungen.* Berlin: Springer, 2011
- [58] Kavraki, Lydia E., LaValle, Steven M.: Motion planning. In: SICILIANO, B.;
 KHATIB, O. (Hrsg.): Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, 2008,
 S. 109–131
- [59] LAVALLE, S. M.: *Planning algorithms*. 1. publ. Cambridge: Cambridge University Press, 2006
- [60] NILSSON, N. J.: A mobile automaton: An application of artificial intelligence techniques. In: WALKER, D. E.; NORTON, L. M. (Hrsg.): *Proceedings* of the 1st International Joint Conference on Artificial Intelligence: 7-9 May

1969, Washington, D.C: International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1969, S. 509–520

- [61] BROOKS, R. A.: Solving the find-path problem by good representation of free space. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) 13 (1983), Nr. 3, S. 190–197
- [62] CANNY, J. F.: *The complexity of robot motion planning*. Zugl.: Cambridge, Mass., MIT, Dissertation, 1987. Cambridge, Mass. u.a.: MIT Press, 1988 (Association for Computing Machinery: ACM doctoral dissertation awards 1987)
- [63] CANNY, J. F.; LIN, M. C.: An opportunistic global path planner. In: Algorithmica 10 (1993), 2-4, S. 102–120
- [64] ACAR, E. U.; CHOSET, H.; RIZZI, A. A.; ATKAR, P. N.; HULL, D.: Morse decompositions for coverage tasks. In: The International Journal of Robotics Research 21 (2002), Nr. 4, S. 331–344
- [65] CHOSET, H.; PIGNON, P.: Coverage path planning: The boustrophedon decomposition. In: *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics*, 1997
- [66] Bibliographisches Institut GmbH: *Bustrophedon, das: Herkunft*. URL http://www.duden.de/rechtschreibung/Bustrophedon – Überprüfungsdatum 2015-02-03
- [67] BARRAQUAND, J.; LATOMBE, J.-C.: A Monte-Carlo algorithm for path planning with many degrees of freedom. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1990, S. 1712–1717
- [68] BARRAQUAND, J.; LATOMBE, J.-C.: Robot motion planning: A distributed representation approach. In: The International Journal of Robotics Research 10 (1991), Nr. 6, S. 628–649
- [69] BORENSTEIN, J.; KOREN, Y.: *The vector field histogram fast obstacle avoidance for mobile robots.* In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7 (1991), Nr. 3, S. 278–288
- [70] ULRICH, I.; BORENSTEIN, J.: VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots, Bd. 2. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1998, S. 1572–1577
- [71] ULRICH, I.; BORENSTEIN, J.: VFH*: local obstacle avoidance with look-ahead verification, Bd. 3. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2000, S. 2505–2511
- [72] FOX, D.; BURGARD, W.; THRUN, S.: The dynamic window approach to collision avoidance. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 4 (1997), Nr. 1, S. 23–33

- [73] Kavraki, Lydia E., Svestka, Petr; LATOMBE, J.-C.; OVERMARS, M. H.: *Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces.* In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12 (1996), Nr. 4, S. 566–580
- [74] HSU, D.: *Randomized single-query motion planning in expansive spaces*. Stanford, Stanford University: Dissertation. 2000
- [75] LAVALLE, S. M.; KUFFNER, JAMES J., JR.: Randomized kinodynamic planning, Bd. 1. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1999, S. 473–479
- [76] KUFFNER, JAMES J., JR.; LAVALLE, S. M.: RRT-connect An efficient approach to single-query path planning, Bd. 2. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2000, S. 995–1001
- [77] SÁNCHEZ, G.; LATOMBE, J.-C.: On delaying collision checking in PRM planning Application to multi-robot coordination. In: The International Journal of Robotics Research 21 (2002), Nr. 1, S. 5–26
- [78] SCHEURER, C.; ZIMMERMANN, U. E.: Path planning method for palletizing tasks using workspace cell decomposition. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, S. 1–4
- [79] HENRICH, D.; WURLL, C.; WÖRN, H.: 6 DOF path planning in dynamic environments - a parallel online approach, Bd. 1. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1998, S. 330–335
- [80] LINGELBACH, F.: *Path planning using probabilistic cell decomposition*. Stockholm, 2005 (Trita-S3-REG 0501)
- [81] LIN, C.-C.; CHUANG, J.-H.: Potential-based path planning for robot manipulators in 3-D workspace, Bd. 3. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2003, S. 3353–3358
- [82] KLANKE, S.; LEBEDEV, D.; HASCHKE, R.; STEIL, J.; RITTER, H.: Dynamic path planning for a 7-DOF robot arm. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2006, S. 3879–3884
- [83] RÜCKEL, V.: Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung für kooperierende Industrieroboter. Dissertation. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2006 (Reihe Fertigungstechnik - Erlangen 178)
- [84] REITELSHÖFER, S.: Kooperierende Roboter für Montageaufgaben. In: FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G. (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014 (Handbuch der Fertigungstechnik), S. 534–543

- [85] TING, Y.; LEI, W. I.; JAR, H. C.: A path planning algorithm for industrial robots. In: Computers & Industrial Engineering 42 (2002), 2–4, S. 299–308. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083520200013X
- [86] ELLMER, B.; SCHAAF, A.; LÜCHINGER, F.: Open Source-Software: Chance und Risiko für Unternehmen. München: ScienceFactory, 2013
- [87] SCHMITZ, S. S.; MÜLLER, M.: *Open Source: Kurz & gut.* 1. Auflage. Köln: O'Reilly, 1999 (O'Reillys Taschenbibliothek Sonderband)
- [88] Open Source Initiative: *The zlib/libpng License (Zlib)*. URL https:// opensource.org/licenses/zlib-license.php – Überprüfungsdatum 2017-10-17
- [89] *ROS: Is ROS For Me?* URL http://www.ros.org/is-ros-for-me Überprüfungsdatum 2015-03-16
- [90] QUIGLEY, M.; GERKEY, B. P.; CONLEY, K.; FAUST, J.; FOOTE, T.; LEIBS, J.;
 BERGER, E.; WHEELER, R.; NG, A.: ROS: an open-source robot operating system. In: *ICRA Workshop: Open source software in robotics*, 2009-05-17, S. 1–6
- [91] *Open Source Robotics Foundation*. URL http://www.osrfoundation.org/ Überprüfungsdatum 2015-03-16
- [92] *ROS: History*. URL http://www.ros.org/history Überprüfungsdatum 2015-03-16
- [93] BRUYNINCKX, H.: Open robot control software: the OROCOS project, Bd. 3. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2001, S. 2523–2528
- [94] BRUYNINCKX, H.; SOETENS, P.; KONINCKX, B.: The real-time motion control core of the Orocos project, Bd. 2. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2003, S. 2766–2771
- [95] *The Orocos Project: History*. URL http://www.orocos.org/content/history – Überprüfungsdatum 2015-03-20
- [96] Movelt!: Kinematics/Configuration The KDL kinematics plugin. URL http://moveit.ros.org/wiki/Kinematics/Configuration -Überprüfungsdatum 2015-03-23
- [97] *The Orocos Project: Orocos Licenses*. URL http://www.orocos.org/ content/orocos-licenses – Überprüfungsdatum 2015-03-20
- [98] Rock the Robot Construction Kit: What is Rock? URL http://rock-robotics.org/stable/documentation/about/index.html – Überprüfungsdatum 2015-03-20
- [99] *Rock the Robot Construction Kit: Package Index*. URL http://rockrobotics.org/stable/pkg/ – Überprüfungsdatum 2015-03-20

- [100] Rock the Robot Construction Kit: The ROS-Rock Bridge. URL http://rock-robotics.org/stable/documentation/ros/index.html – Überprüfungsdatum 2015-03-20
- [101] Orca Robotics: *Orca History*. URL http://orca-robotics.sourceforge.net/orca_doc_history.html – Überprüfungsdatum 2015-03-25
- [102] BROOKS, A.; KAUPP, T.; MAKARENKO, A.; WILLIAMS, S.; OREBÄCK, A.: Orca: A Component Model and Repository. In: BRUGALI, D. (Hrsg.): Software engineering for experimental robotics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007 (Springer tracts in advanced robotics, 30), S. 231–251
- [103] Orca Robotics: Orca Overview. URL http://orca-robotics.sourceforge.net/orca_doc_overview.html – Überprüfungsdatum 2015-03-26
- [104] MAKARENKO, A.; BROOKS, A.; KAUPP, T.: Orca: Components for Robotics. In: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (*IROS*): Workshop on Robotic Standardization, 2006-10-10, S. 1–5
- [105] Orca Robotic: Orca License and Copyright. URL http://orca-robotics.sourceforge.net/orca_doc_license.html – Überprüfungsdatum 2015-03-26
- [106] *OpenRAVE Documentation: History*. URL http://openrave.org/docs/ latest_stable/overview/#overview – Überprüfungsdatum 2015-03-23
- [107] DIANKOV, R.: Automated Construction of Robotic Manipulation Programs. Carnegie Mellon University, Robotics Institute. 2010. URL http://www.programmingvision.com/rosen_diankov_thesis.pdf
- [108] *MoveIt!: Kinematics/IKFast*. URL http://moveit.ros.org/wiki/ Kinematics/IKFast – Überprüfungsdatum 2015-03-23
- [109] GERKEY, B. P.; VAUGHAN, R. T.; HOWARD, A.: The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2003, S. 317–323
- [110] COLLETT, T. H.J.; MACDONALD, B. A.; GERKEY, B. P.: Player 2.0: Toward a Practical Robot Programming Framework. In: *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*, 2005
- [111] VAUGHAN, R. T.; GERKEY, B. P.: Really Reusable Robot Code and the Player/Stage Project. In: BRUGALI, D. (Hrsg.): Software engineering for experimental robotics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007 (Springer tracts in advanced robotics, 30), S. 267–289
- [112] Player: Supported devices. URL http://playerstage.sourceforge.net/doc/Player-3.0.2/player/supported_hardware.html – Überprüfungsdatum 2015-03-23

- [113] Player: The Player Robot Device Interface License.
 URL http://playerstage.sourceforge.net/doc/Player-3.0.2/player Überprüfungsdatum 2015-03-23
- [114] FITZPATRICK, P.; CESERACCIU, E.; DOMENICHELLI, D. E.; PAIKAN, A.; METTA, G.; NATALE, L.: A middle way for robotics middleware. In: Journal of Software Engineering for Robotics 5 (2014), Nr. 2, S. 42–49. URL http://joser.unibg.it/index.php?journal=joser&page=article&op=view&path=69&path=27 – Überprüfungsdatum 2015-03-25
- [115] FITZPATRICK, P.; METTA, G.; NATALE, L.: *Towards long-lived robot genes*. In: *Robotics and Autonomous Systems* 56 (2008), Nr. 1, S. 29–45
- [116] *YARP Yet Another Robot Platform: Welcome to YARP.* URL http://wiki. icub.org/yarpdoc/index.html – Überprüfungsdatum 2015-03-25
- BAILLIE, J.-C.: Design principles for a universal robotic software platform and application to URBI. In: *ICRA Workshop: Software development and integration in robotics: understanding robot software architectures*, 2007-04-14, S. 1–6
- [118] Aldebaran Robotics: Aldebaran Robotics buys out Gostai and thus reinforces its position as a major player in the international world of robotics. Paris, 2012-07-25. URL http://www.gostai.com/static/CP%20Gostai%20Juillet2012%20EN.pdf
- [119] *Gostai: Urbi Open Source*. URL http://www.gostai.com/products/urbi/ index.html – Überprüfungsdatum 2015-03-30
- [120] NEWMAN, P. M.: MOOS Mission Orientated Operating Suite. 2.1. Aufl. März 2006
- [121] Oxford Mobile Robotics Group: MOOS: What is MOOS? URL http://www.robots.ox.ac.uk/~mobile/MOOS/wiki/pmwiki.php/Main/Introduction – Überprüfungsdatum 2015-03-26
- [122] Oxford Mobile Robotics Group: *MOOS*. URL http://mrg. robots.ox.ac.uk/moos/ – Überprüfungsdatum 2015-03-26
- [123] RICKERT, M.: Efficient Motion Planning for Intuitive Task Execution in Modular Manipulation Systems. München, Technische Universität München: Dissertation. 2011. URL http://nbn-resolving.de/urn/ resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20110719-981979-1-6 – Überprüfungsdatum 2015-03-13
- [124] RICKERT, M.: *Robotics Library (RL)*. URL http://www.roboticslibrary.org Überprüfungsdatum 2015-03-13
- [125] RATLIFF, N.; ZUCKER, M.; BAGNELL, J. A.; SRINIVASA, S.: CHOMP: Gradient optimization techniques for efficient motion planning. In: *Proceedings of*

the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009, S. 489–494

- [126] ZUCKER, M.; RATLIFF, N.; DRAGAN, A. D.; PIVTORAIKO, M.; KLINGENSMITH, M.; DELLIN, C. M.; BAGNELL, J. A.; SRINIVASA, S. S.: CHOMP: Covariant Hamiltonian optimization for motion planning. In: The International Journal of Robotics Research 32 (2013), 9-10, S. 1164–1193
- [127] KALAKRISHNAN, M.; CHITTA, S.; THEODOROU, E.; PASTOR, P.; SCHAAL, S.: STOMP: Stochastic trajectory optimization for motion planning. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, S. 4569–4574
- [128] HORNUNG, A.; WURM, K. M.; BENNEWITZ, M.; STACHNISS, C.; BURGARD, W.: OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. In: Autonomous Robots 34 (2013), Nr. 3, S. 189–206
- [129] CHITTA, S.; SUCAN, I.; COUSINS, S.: *MoveIt!* [ROS Topics]. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 19 (2012), Nr. 1, S. 18–19
- [130] *MoveIt!: Concepts.* URL http://moveit.ros.org/documentation/concepts Überprüfungsdatum 2015-03-31
- [131] *MoveIt!: About License*. URL http://moveit.ros.org/about Überprüfungsdatum 2015-03-31
- [132] SUCAN, I. A.; MOLL, M.; KAVRAKI, L. E.: *The Open Motion Planning Library*. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19 (2012), Nr. 4, S. 72–82
- [133] Rice University, Department of Computer Science, Physical and Biological Computing Group: *OMPL: Available Planners*. URL http://ompl.kavrakilab.org/planners.html – Überprüfungsdatum 2015-03-31
- [134] Search-Based Planning Lab: *ROS: sbpl.* URL http://wiki.ros.org/sbpl. Aktualisierungsdatum: 2013-05-31 Überprüfungsdatum 2015-04-02
- [135] COHEN, B. J.; CHITTA, S.; LIKHACHEV, M.: Search-based planning for manipulation with motion primitives. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010, S. 2902–2908
- [136] COHEN, B. J.; SUBRAMANIAN, G.; CHITTA, S.; LIKHACHEV, M.: Planning for manipulation with adaptive motion primitives. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, S. 5478–5485
- [137] LAVALLE, S. M.: Motion Strategy Library: Motion Strategy Library Main Page. URL http://msl.cs.uiuc.edu/msl/index.html – Überprüfungsdatum 2015-04-07
- [138] Stanford Artificial Intelligence Laboratory: MPK Motion Planning Kit. URL http://ai.stanford.edu/~mitul/mpk/. – Aktualisierungsdatum: 2006-05-07 – Überprüfungsdatum 2015-04-07

- [139] PLAKU, E.; BEKRIS, K. E.; KAVRAKI, L. E.: OOPS for motion planning: An online, open-source, programming system. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2007, S. 3711–3716
- [140] ESTRADA, A. V.; LIEN, J.-M.; AMATO, N. M.: VIZMO++: A visualization, authoring, and educational tool for motion planning. In: *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2006, S. 727–732
- [141] KOCKARA, S.; HALIC, T.; IQBAL, K.; BAYRAK, C.; ROWE, R.: Collision detection: A survey. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2007, S. 4046–4051
- [142] SOLID: Software Library for Interference Detection.
 URL http://solid.sourceforge.net. Aktualisierungsdatum: 2002-06-13 Überprüfungsdatum 2015-04-10
- [143] GILBERT, E. G.; JOHNSON, D. W.; KEERTHI, S. S.: A fast procedure for computing the distance between complex objects in three space.
 In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1987, S. 1883–1889
- [144] GILBERT, E. G.; FOO, C.-P.: Computing the distance between general convex objects in three-dimensional space. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation 6 (1990), Nr. 1, S. 53–61
- [145] CAMERON, S.: Enhancing GJK: Computing minimum and penetration distances between convex polyhedra, Bd. 4. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1997, S. 3112–3117
- [146] BERGEN, G. van den: Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees. In: Journal of Graphics Tools 2 (1997), Nr. 4, S. 1–13
- [147] BERGEN, G. van den: A fast and robust GJK implementation for collision detection of convex objects. In: Journal of Graphics Tools 4 (1999), Nr. 2, S. 7–25
- [148] COHEN, J. D.; LIN, M. C.; MANOCHA, D.; PONAMGI, M.: I-COLLIDE: An interactive and exact collision detection system for large-scale environments. In: ZYDA, M. (Hrsg.): Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York: ACM, 1995, S. 189–197
- [149] LIN, M. C.; MANOCHA, D.; COHEN, J.; GOTTSCHALK, S.: Collision detection: Algorithms and applications. In: LAUMOND, J.-P.; OVERMARS, M.; PETERS, A.K. (Hrsg.): Proceedings of Algorithms for Robotics Motion and Manipulation, 1997, S. 129–142
- [150] GAMMA (Geometric Algorithms for Modeling, Motion, and Animation) research group, University of North Carolina at Chapel Hill (UNC): *Collision Detection and Proximity Query Packages.*

URL http://gamma.cs.unc.edu/research/collision/packages.html -Überprüfungsdatum 2015-04-14

- [151] EHMANN, S. A.; LIN, M. C.: Accelerated proximity queries between convex polyhedra by multi-level Voronoi marching, Bd. 3. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2000, S. 2101–2106
- [152] EHMANN, S. A.; LIN, M. C.: Accurate and fast proximity queries between polyhedra using convex surface decomposition. In: Computer Graphics Forum 20 (2001), Nr. 3, S. 500–511
- [153] GOTTSCHALK, S.; Ming C. Lin; MANOCHA, D.: OBBTree: A hierarchical structure for rapid interference detection. In: FUJII, J. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH). New York: ACM, 1996, S. 171–180
- [154] HUDSON, T. C.; LIN, M. C.; COHEN, J.; GOTTSCHALK, S.; MANOCHA, D.: V-COLLIDE: Accelerated collision detection for VRML. In: BRUTZMAN, D.; CAREY, R.; STRAUSS, P. (Hrsg.): Proceedings of the Second Symposium on Virtual Reality Modeling Language (VRML). New York: ACM, 1997, S. 117–123
- [155] LARSEN, E.; GOTTSCHALK, S.; LIN, M. C.; MANOCHA, D.: Fast distance queries with rectangular swept sphere volumes, Bd. 4. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2000, S. 3719–3726
- [156] PAN, J.; CHITTA, S.; MANOCHA, D.: FCL: A general purpose library for collision and proximity queries. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2012, S. 3859–3866
- [157] MIRTICH, B.: V-Clip: Fast and robust polyhedral collision detection. In: ACM Transactions on Graphics 17 (1998), Nr. 3, S. 177–208
- [158] MIRTICH, B.: V-Clip User's Manual. URL www3.cs.stonybrook.edu/ ~algorith/implement/V-CLIP/distrib/vclipManual.ps – Überprüfungsdatum 2015-04-20
- [159] Google Code Archive: Bullet Physics Library.
 URL https://code.google.com/archive/p/bullet/ –
 Überprüfungsdatum 2016-11-21
- [160] COUMANS, E.: Bullet 2.83 Physics SDK Manual: Bullet Physics Library. URL https://github.com/bulletphysics/bullet3/blob/master/docs/ Bullet_User_Manual.pdf – Überprüfungsdatum 2016-11-21
- [161] FOOTE, T.: *tf*2. URL http://wiki.ros.org/tf2. –
 Aktualisierungsdatum: 2016-03-29 Überprüfungsdatum 2016-11-22
- [162] BRADSKI, G.; KAEHLER, A.: Learning OpenCV. Peking: O'Reilly, 2008

- [163] LAGANIÈRE, R.: *OpenCV 2 computer vision application programming cookbook*. Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2011
- [164] OpenCV (Open Source Computer Vision). URL http://opencv.org/ Überprüfungsdatum 2015-04-27
- [165] RUSU, R. B.; COUSINS, S.: 3D is here: Point Cloud Library (PCL).
 In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, S. 1–4
- [166] SCHUNK GmbH & Co. KG: Neuheiten Greifsysteme:
 2-Finger-Parallelgreifer EGN. 3-Finger-Zentrischgreifer EZN. Die ersten zertifizierten Safety Greifsysteme. 2015
- [167] REIS GMBH & CO. KG MASCHINENFABRIK: Reis SafetyController Die einzigartige, patentierte Sicherheitslösung: Presseinformation. URL http://www.reisrobotics.de/de/media/file/1130 – Überprüfungsdatum 2015-05-27
- [168] KUKA Roboter GmbH: Produkte Software Querschnittstechnologien: Safe Robot Technology. URL http://www.kuka-robotics.com/ germany/de/products/software/hub_technologies – Überprüfungsdatum 2015-05-27
- [169] FANUC Robotics: Products Software Controller Software: Dual Check Safety (DCS). URL http://se.fanucrobotics.eu/en/products/software/ controller%20software - Überprüfungsdatum 2015-05-27
- [170] ABB Automation GmbH: Datenblatt SafeMove Software. 2011
- [171] MEYER, C.: Aufnahme und Nachbearbeitung von Bahnen bei der Programmierung durch Vormachen von Industrierobotern. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2011 (IPA-IAO Forschung und Praxis 507)
- [172] SOM, F.: Intuitives Bedieninterface für effiziente Mensch-Roboter-Kooperation: Intuitive User Interface for Efficient Man/Robot Cooperation. In: at - Automatisierungstechnik 58 (2010), Nr. 12, S. 665–669
- [173] MRK-Systeme GmbH: *Produkte SafeGuiding*. URL http://www.mrksysteme.de/produkte_guiding.html – Überprüfungsdatum 2015-05-29
- [174] KUKA Roboter GmbH: Der "Intelligente Roboter".
 URL www.kuka.com/nl_media/o6/vortrag_intelligenter_roboter.pdf. Aktualisierungsdatum: 2015-05-29
- [175] SafetyEYE Sichere Kamerasysteme: Bedienungsanleitung-21743-DE-18.
 2015
- [176] TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH: *Produktinformation BioRob-Sicherheit: Der klügere Roboter gibt nach*. März 2011

- [177] ABB Automation GmbH: Datenblatt YuMi: Zusammen in die Zukunft der Automatisierung: You and Me. 2015
- [178] KUKA Roboter GmbH: Produktbroschüre LBR iiwa ii feel you. 2015
- [179] Rethink Robotics: Baxter Research Robot: Arms Series Elastic Actuators (SEAs). URL http://sdk.rethinkrobotics.com/wiki/Arms – Überprüfungsdatum 2015-07-24
- [180] FANUC EUROPE CORPORATION: CR series. 2017
- [181] F&P ROBOTICS AG: P-Rob: Versatile and safe lightweight Robot Arm working alongside humans. 2015
- [182] F&P ROBOTICS AG: P-Rob 2R: TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN -Kollaborativer, 6- achsiger leichtgewicht Roboterarm. 2015
- [183] FRANKA EMIKA GmbH: *FRANKA EMIKA: SOLUTIONS*. URL https://www.franka.de/solutions/ – Überprüfungsdatum 2017-11-18
- [184] YASKAWA Europe GmbH: News: Kollaborativer Roboter Motoman HC10 -Sichere und flexible Interaktion.
 URL https://www.yaskawa.eu.com/de/news-events/news/artikel/news/motoman-hc10-collaborative-robot-safe-and-flexible-interaction/?tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=cf0141f4e63bdc5f20cf735e5edocda5. – Aktualisierungsdatum: 2016-06-28 – Überprüfungsdatum 2017-11-18
- [185] MRK-Systeme GmbH: Prospekt KR 5 SI (SafeInteraction)
- [186] POMREHN, W.: Ortsflexible Produktionsassistenten für die Smart Factory: Flexible Automatisierungslösungen (Fachtagung Mensch-Roboter-Kollaboration). Nürnberg, 2015-07-08
- [187] ABB Automation GmbH: Produktpräsentation YuMi IRB 14000: Überblick. 2015-04-13
- [188] SCHMIRGEL, V.: *Grundlagen der Leichtbaurobotik* (Sichere Mensch-Maschine-Kooperation). Erlangen, 2012-04-18
- [189] FRANKA EMIKA GmbH: FRANKA EMIKA: STORE. URL https://www.franka.de/cart/ – Überprüfungsdatum 2017-11-18
- [190] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV): Themenfeld Robotik: Zertifizierung von kollaborierenden Robotern. URL http://www.dguv.de/fb-holzundmetall/sg/sg_maf/robotik/index.jsp – Überprüfungsdatum 2015-08-06
- [191] KUKA SYSTEMS GMBH: Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration bei KUKA Systems: KUKA flexFELLOW-Applikation mit dem LBR iiwa erhält DGUV-Sicherheitszertifizierung. 2015-04-22. URL http://www.kuka-

systems.com/de/pressevents/news/print/NM20150422_DGUV_Zertifizierung – Überprüfungsdatum 2016-03-29

- [192] LUCA, A. de; ALBU-SCHÄFFER, A.; HADDADIN, S.; HIRZINGER, G.: Collision detection and safe reaction with the DLR-III lightweight manipulator arm. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2006, S. 1623–1630
- [193] FRITZSCHE, M.; ELKMANN, N.; SCHULENBURG, E.: Tactile sensing: A key technology for safe physical human robot interaction. In: *6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI),* 2011, S. 139–140
- [194] GREBENSTEIN, M.; ALBU-SCHÄFFER, A.; BAHLS, T.; CHALON, M.; EIBERGER, O.; FRIEDL, W.; GRUBER, R.; HADDADIN, S.; HAGN, U.; HASLINGER, R.; HÖPPNER, H.; JÖRG, S.; NICKL, M.; NOTHHELFER, A.; PETIT, F.; REILL, J.; SEITZ, N.; WIMBÖCK, T.; WOLF, S.; WÜSTHOFF, T.; HIRZINGER, G.: The DLR hand arm system. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, S. 3175–3182
- [195] RUNGE, G.; PRELLER, T.; ZELLMER, S.; BLANKEMEYER, S.; KREUZ, M.; GARNWEITNER, G.; RAATZ, A.: SpineMan: Design of a soft robotic spine-like manipulator for safe human-robot interaction. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, S. 1103–1110
- [196] DEIMEL, R.; BROCK, O.: A compliant hand based on a novel pneumatic actuator. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013, S. 2047–2053
- [197] BOBLAN, I.; SCHULZ, A.; TUCHSCHERER, A.; PERFILOV, I.; BERTRAND, B.: A Compliant Lightweight Universal Joint Cascadable to a Multi-joint Kinematics - Tripedale Alternanzkaskade TAK. In: 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animal and Machines (AMAM 2013), 2013
- [198] REITELSHÖFER, S.; GÖTTLER, M.; SCHMIDT, P.; TREFFER, P.; LANDGRAF, M.; FRANKE, J.: Aerosol-Jet-Printing silicone layers and electrodes for stacked dielectric elastomer actuators in one processing device. In: BAR-COHEN, Y.; VIDAL, F. (Hrsg.): SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring: SPIE, 2016 (SPIE Proceedings), 97981Y-1-97981Y-9
- BROWN, E.; RODENBERG, N.; AMEND, J.; MOZEIKA, A.; STELTZ, E.; ZAKIN, M.
 R.; LIPSON, H.; JAEGER, H. M.: Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 107 (2010), Nr. 44, S. 18809–18814

- [200] AMEND, J. R.; BROWN, E.; RODENBERG, N.; JAEGER, H. M.; LIPSON, H.: A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material. In: IEEE Transactions on Robotics 28 (2012), Nr. 2, S. 341–350
- [201] Festo AG & Co. KG: *Bionic Handling Assistant*. URL https://www.festo.com/net/de_group/SupportPortal/Downloads/146909 – Überprüfungsdatum 2016-04-04
- [202] Festo AG & Co. KG: *FlexShapeGripper: Greifen nach dem Vorbild der Chamäleonzunge*. URL https://www.festo.com/net/de_corp/SupportPor-tal/Downloads/372192 Überprüfungsdatum 2016-04-04
- [203] OBERER, S.; SCHRAFT, R. D.: Robot-dummy crash tests for robot safety assessment. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2007, S. 2934–2939
- [204] HADDADIN, S.; ALBU-SCHÄFFER, A.; FROMMBERGER, M.; ROSSMANN, J.; HIRZINGER, G.: The "DLR Crash Report": Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - Part I: Results. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009, S. 272–279
- [205] HADDADIN, S.; ALBU-SCHÄFFER, A.; FROMMBERGER, M.; ROSSMANN, J.; HIRZINGER, G.: The "DLR crash report": Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - Part II: Discussions. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009, S. 280–287
- [206] BEHRENS, R.: Biomechanische Untersuchungen für sichere Mensch-Roboter-Kollaboration. In: SCHENK, M. (Hrsg.): *Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -Automatisierung. Leistungen und Ergebnisse. Jahresbericht* 2013. Magdeburg, 2014, S. 32–33
- [207] EBERT, D.: Bildbasierte Erzeugung kollisionsfreier Transferbewegungen für Industrieroboter. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern: Dissertation. 2003
- [208] HENRICH, D.; GECKS, T.: Multi-camera collision detection between known and unknown objects. In: *Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC)*, 2008, S. 1–10
- [209] FISCHER, M.; HENRICH, D.: Surveillance of robots using multiple colour or depth cameras with distributed processing. In: *Third ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC)*, 2009, S. 1–8
- [210] FISCHER, M.; HENRICH, D.: 3D collision detection for industrial robots and unknown obstacles using multiple depth images. In: KRÖGER, T.; WAHL, F. M. (Hrsg.): Advances in Robotics Research: Theory, Implementation, Application. Proceedings of first International German Workshop on Robotics GWR 2009, 2009, S. 111–122

- [211] WALTER, C.; VOGEL, C.; ELKMANN, N.: A stationary sensor system to support manipulators for safe human-robot interaction.
 In: 41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK), 2010, S. 1–6
- [212] BEYL, T.; NICOLAI, P.; RACZKOWSKY, J.; WÖRN, H.; COMPARETTI, M. D.; MOMI, E. de: Multi kinect people detection for intuitive and safe human robot cooperation in the operating room. In: *16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, 2013, S. 1–6
- [213] GRAF, J.: Sichere Mensch-Roboter-Kooperation durch Auswertung von Bildfolgen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Dissertation. 2010
- [214] KARLSSON, B.; KARLSSON, N.; WIDE, P.: A dynamic safety system based on sensor fusion. In: Journal of Intelligent Manufacturing 11 (2000), Nr. 5, S. 475-483
- [215] OSTERMANN, B.: Entwicklung eines Konzepts zur sicheren Personenerfassung als Schutzeinrichtung an kollaborierenden Robotern. Wuppertal, Bergische Universität Wuppertal: Dissertation. 2014
- [216] ESCAIDA NAVARRO, S.; MARUFO, M.; DING, Y.; PULS, S.; GÖGER, D.; HEIN, B.; WÖRN, H.: Methods for safe human-robot-interaction using capacitive tactile proximity sensors. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013, S. 1149–1154
- [217] WINKLER, B.: Dynamische Umgebungsüberwachung mittels roboterintegrierter Sensorik. In: WESTKÄMPER, E.; VERL, A. (Hrsg.): 6. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik: Sichere Mensch-Roboter-Interaktion ohne trennende Schutzzäune, 2011, S. 104–114
- [218] PULS, S.: Situationsverstehen für die Risikobeurteilung bei der Mensch-Roboter-Kooperation. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014: Karlsruhe Scientific Publishing, 2015
- [219] KUHN, S.: *Wissens- und sensorbasierte geometrische Rekonstruktion*. Bayreuth, Universität Bayreuth: Dissertation. 2012
- [220] STENGEL, D.: Optische Arbeitsraumüberwachung zur sicheren und effizienten Mensch-Roboter-Kooperation. München, Technische Universität München: Dissertation. 2015
- [221] BASCETTA, L.; FERRETTI, G.; ROCCO, P.; ARDÖ, H.; BRUYNINCKX, H.; DEMEESTER, E.; DI LELLO, E.: Towards safe human-robot interaction in robotic cells: An approach based on visual tracking and intention estimation. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011, S. 2971–2978

- [222] MAINPRICE, J.; BERENSON, D.: Human-robot collaborative manipulation planning using early prediction of human motion. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2013, S. 299–306
- [223] OBER-GECKS, A.; HÄNEL, M.; WERNER, T.; HENRICH, D.: Fast multi-camera reconstruction and surveillance with human tracking and optimized camera configurations. In: 45th International Symposium on Robotics (ISR) and 8th German Conference on Robotics (ROBOTIK). Berlin: VDE VERLAG GMBH, 2014, S. 497–504
- [224] GECKS, T.; HENRICH, D.: Path planning and execution in fast-changing environments with known and unknown obstacles. In: *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (*IROS*), 2007, S. 21–26
- [225] GECKS, T.: Sensorbasierte, echtzeitfähige Online-Bahnplanung für die Mensch-Roboter-Koexistenz. Bayreuth, Universität Bayreuth: Dissertation. 2011
- [226] LEUTERT, F.; FREIER, C.; SCHILLING, K.: 3D-sensor based dynamic path planning and obstacle avoidance for industrial manipulators. In: German Association of Robotics (DGR) (Hrsg.): 7th German Conference on Robotics (ROBOTIK): VDE VERLAG GMBH, 2012, S. 92–97
- [227] ALBU-SCHÄFFER, A.; EIBERGER, O.; FUCHS, M.; GREBENSTEIN, M.; HADDADIN, S.; OTT, C.; STEMMER, A.; WIMBÖCK, T.; WOLF, S.; BORST, C.; HIRZINGER, G.: Anthropomorphic soft robotics from torque control to variable intrinsic compliance. In: PRADALIER, C.; SIEGWART, R.; HIRZINGER, G. (Hrsg.): *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*, 2011 (Springer tracts in advanced robotics, 70), S. 185–207
- [228] LASCHI, C.; CIANCHETTI, M.: Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control. In: Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 2 (2014). URL http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4090912
- [229] Empire Robotics, Inc.: *Versaball gripper*. URL http://empirerobotics.com/products – Überprüfungsdatum 2016-04-04
- [230] BIOKON DAS BIONIK-KOMPETENZNETZ: *Elefanten helfen beim Roboterbau*. Berlin, 2013-05-27. URL http://www.biokon.de/news-uebersicht/ elefanten-helfen-beim-roboterbau – Überprüfungsdatum 2016-04-04
- [231] LENZ, C.; GRIMM, M.; RÖDER, T.; KNOLL, A.: Fusing multiple kinects to survey shared human-robot-workspaces. 2012 (Technischer Bericht TUM-I1214)
- [232] WEIß, K.; WÖRN, H.: The working principle of resistive tactile sensor cells, Bd. 1. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2005, S. 471–476

- [233] REIS GMBH & CO. KG MASCHINENFABRIK: *RSV-COMMAND-XML-Kommunikationsschnittstelle: Dokumentation*
- [234] REIS GMBH & CO. KG MASCHINENFABRIK: *Externes Verfahren:* Dokumentation. 2007-01-11
- [235] WEBER, W.: Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung.2. Aufl.: Carl Hanser Verlag, 2009
- [236] STÄUBLI ROBOTICS: Referenzanleitung VAL3: Version 6. 2007
- [237] BALZERT, H.: Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb. 3. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011 (Lehrbücher der Informatik)
- [238] WELLENREUTHER, G.; ZASTROW, D.: Automatisieren mit SPS: Theorie und Praxis. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer, 2005 (Viewegs Fachbücher der Technik)
- [239] DENAVIT, J.; HARTENBERG, R. S.: A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. In: Journal of Applied Mechanics 22 (1955), S. 215–221
- [240] WALDRON, K.; SCHMIEDELER, J.: Kinematics. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (Hrsg.): *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer, 2008, S. 9–33
- [241] CRAIG, J. J.: Introduction to robotics: mechanics and control. 2. Aufl.
 Reading: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989 (Addison-Wesley Series in Electrical and Computer Engineering: Control Engineering)
- [242] NISCHWITZ, A.; FISCHER, M.; HABERÄCKER, P.; SOCHER, G.: *Computergrafik und Bildverarbeitung*. Band I: Computergrafik. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [243] ERICSON, C.: *Real-time collision detection*. Amsterdam: Elsevier Inc., 2005 (The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology)
- [244] BERGEN, G. van den: Collision detection in interactive 3D environments. Amsterdam: Elsevier Inc., 2004 (The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology)
- [245] PIATTI, D.; REMONDINO, F.; STOPPA, D.: State-of-the-Art of TOF Range-Imaging Sensors. In: REMONDINO, F.; STOPPA, D. (Hrsg.): TOF Range-Imaging Cameras. Berlin: Springer, 2013, S. 1–9
- [246] BEYERER, J.; PUENTE LEÓN, F.; FRESE, C.: Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung: Springer Vieweg, 2012
- [247] LANGE, R.: 3D Time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. Siegen, Universität Siegen: Dissertation. 2000

- [248] HEINOL, H.: Untersuchung und Entwicklung von modulationslaufzeitbasierten 3D-Sichtsystemen. Siegen, Universität Siegen: Dissertation. 2001
- [249] PERTUZ, S.; PUIG, D.; GARCIA, M. A.: Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. In: Pattern Recognition 46 (2013), Nr. 5, S. 1415–1432
- [250] HESSE, S.; SCHNELL, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung. 6. Aufl.: Springer Vieweg, 2014
- [251] MUTTO, C. Dal; ZANUTTIGH, P.; CORTELAZZO, G. M.: *Time-of-Flight Cameras and Microsoft Kinect*TM: A user perspective on technology and applications: Springer, 2013
- [252] Fisher; Robert B.; KONOLIGE, K.: Range sensors. In: SICILIANO, B.; KHATIB, O. (Hrsg.): Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, 2008, S. 521–542
- [253] AUE, J.; LANGER, D.; MÜLLER-BESSLER, B.; HUHNKE, B.: Efficient segmentation of 3D LIDAR point clouds handling partial occlusion. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011, S. 423–428
- [254] ZHOU, G.; ZHOU, X.; YANG, J.; TAO, Y.; NONG, X.; BAYSAL, O.: Flash Lidar Sensor Using Fiber-Coupled APDs. In: IEEE Sensors Journal 15 (2015), Nr. 9, S. 4758–4768
- [255] WIORA, G.: Optische 3D-Messtechnik: Präzise Gestaltvermessung mit einem erweiterten Streifenprojektionsverfahren. Heidelberg, Ruprechts-Karls-Universität Heidelberg: Dissertation. 2001
- [256] BLAIS, F.: Review of 20 years of range sensor development. In: Journal of Electronic Imaging 13 (2004), Nr. 1, S. 231–243
- [257] Velodyne Acoustics, Inc.: Velodyne's HDL-64E: A High Definition Lidar[™] Sensor for 3-D applications: White Paper. URL http://velodynelidar.com/docs/papers/HDL%20white%20paper_OCT2007_web.pdf – Überprüfungsdatum 2016-06-27
- [258] MCFARLAND, M.: The \$75,000 problem for self-driving cars is going away. In: The Washington Post (2015-12-04)
- [259] PANCHERI, L.; STOPPA, D.: Sensors Based on In-Pixel Photo-Mixing Devices. In: REMONDINO, F.; STOPPA, D. (Hrsg.): TOF Range-Imaging Cameras. Berlin: Springer, 2013, S. 69–89
- [260] KOLB, A.; BARTH, E.; KOCH, R.; LARSEN, R.: Time-of-Flight Sensors in Computer Graphics. In: PAULY, M.; GREINER, G. (Hrsg.): 30th Annual Conference of the European Association for Computer Graphics (Eurographics), 2009
- [261] LINDNER, M.; KOLB, A.: Compensation of Motion Artifacts for Time-of-Flight Cameras. In: KOLB, A.; KOCH, R. (Hrsg.): Dynamic 3D imaging: DAGM 2009 Workshop, Dyn3d 2009, Jena, Germany, September 9, 2009.

Proceedings. Berlin: Springer, 2009 (Lecture notes in computer science, 5742), S. 16–27

- [262] LINDNER, M.; KOLB, A.: Calibration of the intensity-related distance error of the PMD TOF-camera. In: CASASENT, D. P.; HALL, E. L.; RÖNING, J. (Hrsg.): SPIE Proceedings Vol. 6764: Intelligent Robots and Computer Vision XXV: Algorithms, Techniques, and Active Vision, 2007
- [263] MÖLLER, T.; KRAFT, H.; FREY, J.; ALBRECHT, M.; LANGE, R.: Robust 3D measurement with PMD sensors. In: *Proceedings of the 1st Range Imaging Research Day at ETH*, 2005
- [264] RINGBECK, T.; HAGEBEUKER, B.: *Mehrdimensionale Objekterfassung mittels PMD-Sensorik.* In: *Sensor Magazin* (2006), Nr. 2, S. 40–42
- [265] PMD Technologies: PMD [vision] CamCube 3.0: Datasheet V.
 No. 20100601. High resolution 3D video camera. 2010. High resolution 3D video camera
- [266] SÜßE, H.; RODNER, E.: Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [267] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung: und Bildgewinnung.* 7. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012
- [268] HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. Aufl. New York: Cambridge University Press, 2004
- [269] GRAF, S.: *Kamerakalibrierung mit radialer Verzeichnung die radiale essentielle Matrix.* Passau, Universität Passau: Dissertation. 2007
- [270] ZHANG, Z.: A flexible new technique for camera calibration.
 In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 (2000), Nr. 11, S. 1330–1334
- [271] BOUGUET, J.-Y.: Camera Calibration Toolbox for Matlab. URL http://robots.stanford.edu/cs223bo4/JeanYvesCalib/ – Überprüfungsdatum 2016-07-12
- [272] HEIKKILÄ, J.; SILVÉN, O.: A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997, S. 1106–1112
- [273] Brown; Duane C.: Decentering Distortion of Lenses. In: Photometric Engineering 32 (1966), Nr. 3, S. 444–462
- [274] BOUGUET, J.-Y.: Camera Calibration Toolbox for Matlab: Description of the calibration parameters. URL http://robots.stanford.edu/cs223bo4/JeanYvesCalib/htmls/parameters.html – Überprüfungsdatum 2016-07-12

- [275] LINDNER, M.; KOLB, A.: Lateral and Depth Calibration of PMD-Distance Sensors. In: BEBIS, G.; BOYLE, R.; PARVIN, B.; KORACIN, D.; REMAGNINO, P.; NEFIAN, A.; MEENAKSHISUNDARAM, G.; PASCUCCI, V.; ZARA, J.; MOLINEROS, J.; THEISEL, H.; MALZBENDER, T. (Hrsg.): Advances in Visual Computing: Second International Symposium, ISVC 2006 Lake Tahoe, NV, USA, November 6-8, 2006. Proceedings, Part II: Springer, 2006 (Lecture notes in computer science, 4292), S. 524–533
- [276] LINDNER, M.; SCHILLER, I.; KOLB, A.; KOCH, R.: Time-of-Flight sensor calibration for accurate range sensing. In: Computer Vision and Image Understanding 114 (2010), Nr. 12, S. 1318–1328
- [277] LINDNER, M.; KOLB, A.; RINGBECK, T.: New insights into the calibration of ToF-sensors. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPR Workshops), 2008, S. 1–5
- [278] KAHLMANN, T.; INGENSAND, H.: Calibration and development for increased accuracy of 3D range imaging cameras. In: Journal of Applied Geodesy 2 (2008), Nr. 1, S. 1–11
- [279] STARK, G.: *Robotik mit MATLAB*. München: Carl Hanser Verlag, 2009 (Lehrbücher zur Informatik)
- [280] PICCARDI, M.: Background subtraction techniques: a review, Bd. 4. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2004, S. 3099–3104
- [281] MORRIS, G.; ANGELOV, P.: Real-time novelty detection in video using background subtraction techniques: State of the art: A practical review. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (SMC), 2014, S. 537–543
- [282] WITZNER HANSEN, D.; SYSKA HANSEN, M.; KIRSCHMEYER, M.; LARSEN, R.; SILVESTRE, D.: Cluster tracking with Time-of-Flight cameras. In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2008, S. 1–6
- [283] GECKS, T.; HENRICH, D.: SIMERO: Camera supervised workspace for service robots. In: *2nd International Workshop on Advances in Service Robotics (ASER)*, 2004, S. 1–5
- [284] HANDELS, H.: Medizinische Bildverarbeitung: Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die computergestützte ärztliche Diagnostik und Therapie. 2. Aufl.: Vieweg + Teubner Verlag, 2009
- [285] WELZL, E.: Smallest enclosing disks (balls and ellipsoids). In: MAURER, H. (Hrsg.): New Results and New Trends in Computer Science: Graz, Austria, June 20–21, 1991 Proceedings: Springer, 1991 (Lecture notes in computer science, 555), S. 359–370

- [286] HANDL, A.: Multivariate Analysemethoden: Theorie und Praxis multivariater Verfahren unter besonderer Berücksichtigung von S-PLUS.
 2. Aufl. Heidelberg: Springer, 2010 (Statistik und ihre Anwendungen)
- [287] Roweis; Sam: EM algorithms for PCA and SPCA. In: JORDAN, M. I.; KEARNS, M. J.; SOLLA, S. A. (Hrsg.): Advances in Neural Information Processing Systems 10: Proceedings of the 1997 Conference. Cambridge: MIT Press, 1997, S. 626–632
- [288] REN, X.; FOX, D.; KONOLIGE, K.: Change their perception: RGB-D cameras for 3-D modeling and recognition. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 20 (2013), Nr. 4, S. 49–59
- [289] REIS GMBH & CO. KG MASCHINENFABRIK; Haag (Mitarb.): Modellschnittstelle. 2010-10-05
- [290] REIS GMBH & CO. KG MASCHINENFABRIK; LANGE, C. (Mitarb.): Modellschnittstelle. 2012-04-05
- [291] GESSLER, R.: Entwicklung Eingebetteter Systeme: Vergleich von Entwicklungsprozessen für FPGA- und Mikroprozessor-Systeme. Entwurf auf Systemebene. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [292] RUSSELL, S. J.; NORVIG, P.: Artificial Intelligence: A Modern Approach.
 2. Aufl.: Prentice Hall, 2003 (Prentice Hall series in artificial intelligence)
- [293] ERTEL, W.: Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine praxisorientierte Einführung. 3. Aufl.: Springer Vieweg, 2013
- [294] FERGUSON, D.; LIKHACHEV, M.; STENTZ, A.: A guide to heuristic based path planning. In: GUETTIER, C.; YORKE-SMITH, N. (Hrsg.): Proceedings of the International Workshop on Planning under Uncertainty for Autonomous Systems, 2005, S. 9–18
- [295] LIKHACHEV, M.; GORDON, G.; THRUN, S.: ARA*: Anytime A* with provable bounds on sub-optimality. In: THRUN, S.; SAUL, L. K.; SCHÖLKOPF, B. (Hrsg.): Advances in Neural Information Processing Systems 16: Proceedings of the 2003 Conference. Cambridge: MIT Press, 2004, S. 767–774
- [296] KOENIG, S.; LIKHACHEV, M.: Improved fast replanning for robot navigation in unknown terrain. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA),* 2002, S. 968–975
- [297] LIKHACHEV, M.; FERGUSON, D.; GORDON, G.; STENTZ, A.; THRUN, S.: Anytime Dynamic A*: An anytime, replanning algorithm. In: BIUNDO, S.; MYERS, K.; RAJAN, K. (Hrsg.): Proceedings of the 15th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS), 2005
- [298] LIKHACHEV, M.; STENTZ, A.: R* Search. In: FOX, D.; GOMES, C. P. (Hrsg.): Proceedings of the 23rd National Conference on Artificial Intelligence (AAAI). Menlo Park: The AAAI Press, 2008, S. 344–350

- [299] SPONG, M. W.; HUTCHINSON, S.; Vidyasagar M.: *Robot modeling and control.* Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [300] SCHMIDT, U.: Robotik. Ingolstadt, 2012
- [301] SCHNEIDER, P.; EBERLY, D.: *Geometric Tools for Computer Graphics:* Morgan Kaufmann Publishers, 2003 (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling)

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] YOO, I. S.; LANDGRAF, M.; RAMER, C.; REITELSHÖFER, S.; ZIEGLER, C.; FRANKE, J.: My new colleague has artificial muscles: A DEA based approach for inherently compliant robotic systems. In: Production Engineering Research and Development (Prod. Eng. Res. Devel.) 8 (2014), Nr. 6, S. 711–717
- [P2] REITELSHÖFER, S.; RAMER, C.; GRÄF, D.; MATERN, F.; FRANKE, J.: Combining a collaborative robot and a lightweight jamming-gripper to realize an intuitively to use and flexible co-worker. In: 2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2014, S. 1–5
- [P3] RAMER, C.; FRANKE, J.: Work space surveillance of a robot assistance system using a ToF camera. In: Advanced Materials Research (WGP Congress 2012 Progress in Production Engineering) 907 (2014), S. 291–298
- [P4] RAMER, C.; REITELSHÖFER, S.; FRANKE, J.: Automatisierte Pfadgenerierung und Kollisionsüberwachung für Sechsachs-Industrieroboter durch 3D-kameragestützte Umgebungserfassung. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): Kongress Automation: Automation (in the) cloud, 2013
- [P5] RAMER, C.; FRANKE, J.: Kollisionsfreie Bewegungsgenerierung für ein Industrieroboter-Assistenzsystem auf Basis von 3D-Kameradaten.
 In: ZHAW, Institut für Mechatronische Systeme (Hrsg.): Internationales Forum Mechatronik 2013. Winterthur, 2013
- [P6] RAMER, C.; ZIEGLER, C.; REITELSHÖFER, S.; FRANKE, J.: Sensor-guided jogging for visually impaired. In: IEEE RAS & EMBS (Hrsg.): 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2014), 2014, S. 467–472
- [P7] RAMER, C.; REITELSHÖFER, S.; FRANKE, J.: A robot motion planner for 6-DOF industrial robots based on the cell decomposition of the workspace. In: LEE, J.-J. (Hrsg.): 44th International Symposium on Robotics (ISR 2013), 2013

[P8] LEUTERT, F.; RAMER, C.; PIRKL, G.; BAHLE, G.; POXRUCKER, A.; DRESSELHAUS, M.; ZIEGLER, C.; SCHILLING, K.; FRANKE, J.; LUKOWICZ, P.: Roboterassistenz in der Behindertenwerkstatt: Intuitiv bedienbare, sichere und flexible Zusammenarbeit mit Industrierobotern. In: wt - Werkstattstechnik online 104 (2014), Nr. 9, S. 567–572

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten*

- [S1] KNEIßL, P.; RAMER, C.; ZIEGLER, C.; FRANKE, J.: Realisierung einer Objekterkennung und -verfolgung zur automatischen Generierung von Kinematikmodellen auf Basis von PMD-Kameradaten: Bachelorarbeit. Erlangen, 2011
- [S2] ERHARD, S.; RAMER, C.; FRANKE, J.: Weiterentwicklung einer Objekterkennung auf Basis von PMD-Kameradaten zur Arbeitsraumüberwachung von Industrierobotern: Bachelorarbeit. Erlangen, 2012
- [S3] GÄRTNER, F.; RAMER, C.; FRANKE, J.: Entwicklung eines Softwaremoduls zur automatisierten Bahnplanung von Industrierobotern mittels Zellzerlegung: Bachelorarbeit. Erlangen, 2012
- [S4] KUNZ, S.; RAMER, C.; FRANKE, J.: Konzeption und Realisierung einer Kollisionsüberwachung zur sicheren Mensch-Roboter-Kooperation: Projektarbeit. Erlangen, 2012

^{*} Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den Lehrstuhlinhaber

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 10/2018): Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308 FAU Studien aus dem Maschinenbau ISSN 2625-9974 FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting Projektierung von Montagesystemen FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2. Band 7: Wolfgang Scholz Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16112-0. Band 13: Frank Vollertsen Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO2-Hochleistungslasern LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16454-5. Band 19: Arnold vom Ende Untersuchungen zum Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991. ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2. Band 25: Christoph Thim Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller CO2 -Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4. Band 31: Hubert Reinisch Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1. Band 37: Stephanie Abels Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1. Band 43: Werner Heckel Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf Zielkostenorientierte Montageplanung FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0. Band 49: Wolfgang Greska Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3. Band 55: Henning Hanebuth Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6. Band 61: Andreas Brand Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID) FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5. Band 67: Klaus-Uwe Wolf Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus Laserstrahlumformen von Profilen LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer Adaptive Strahlführungen für CO2-Laseranlagen LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4. Band 73: Volker Franke Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2. Band 79: Elke Rauh Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO2-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.
Band 85: Ralf Luchs Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999. ISBN 3-87525-119-9. Band 91: Horst Arnet Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO2-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans Laserstrahlsintern von Metallpulver -Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-128-8. Band 97: Gunter Beitinger Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000. ISBN 3-87525-138-5. Band 103: Stefan Bobbert Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-139-3. Band 111: Jürgen Göhringer Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 105: Thomas Hennige Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1. Band 108: Frank Pitter Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0. Band 114: Alexander Huber Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0. Band 120: Nicolas Tiesler Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, o Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9. Band 126: Stefan Kaufmann Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch 3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1. Band 132: Matthias Negendanck Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener

Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-185-7. Band 138: Andreas Licha Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.

ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2. Band 144: Andreas Kach Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3. Band 150: Martino Celeghini Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005. ISBN 3-87525-218-7. Band 156: Frank Niebling Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.

ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005. ISBN 3-87525-224-1. Band 162: Peter K. Kraus Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, o Tab. 2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou Kollaboratives Engineering Management

in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005. ISBN 3-87525-232-2. Band 168: Werner Enser Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, o Tab. 2006. ISBN 3-87525-240-3. Band 174: Alexander Hofmann Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4. Band 180: Yong Zhuo Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6. Band 185: Klaus Lamprecht Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2. Band 190: Joachim Hecht Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5 LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1. Band 196: Wolfgang Hußnätter Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3. Band 202: Andreas Schaller Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, o Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8. Band 208: Uwe Vogt Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8. Band 214: Stefan Geißdörfer Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5. Band 219: Andreas Dobroschke Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 215: Christian Matzner Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8. Band 220: Azhar Zam Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 217: Massimo Cojutti Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3. Band 222: Thomas Rechtenwald Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5. Band 224: Kay Wagner Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7. Band 229: Alexander Grimm Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegbarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9. Band 234: Florian Albert Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4. Band 239: Rajesh Kanawade In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-357-3. Band 244: Christian Neudel Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-363-4. Band 249: Paul Hippchen Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-369-6. Band 254: Markus Weigl Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-375-7. Band 259: Felix Lütteke Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-384-9. Band 264: Matthias Domke Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-391-7. Band 269: Thomas Svec Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-396-2. Band 274: Michael Lechner Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-402-0. Band 279: Fabian Zöller Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexibelen Fabrik FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-407-5. Band 284: Stefan Berger Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9. Band 289: Thomas Senner Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrimanidis Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8. Band 294: Ioannis Tsoupis Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9. Band 299: Mario Lušić Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020 LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-430-3. Band 304: Bassim Bachy

Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS) FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, vi u. 166 Seiten, 90 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1. Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trennund Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren

LFT, xi u. 145 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 164 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9. Traditionell werden Industrieroboter hinter abgetrennten Schutzeinrichtungen zur automatisierten Fertigung bei hohen Stückzahlen, beispielsweise beim Schweißen oder Lackieren von Karosserieteilen in der Automobilproduktion, eingesetzt. In dieser Arbeit werden wesentliche Teilkomponenten für ein sicheres und flexibles, Industrieroboter basiertes Unterstützungssystem zur Ermöglichung der Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) entwickelt und am Beispiel eines Montageprozesses in einer Behindertenwerkstatt erfolgreich demonstriert. Primäre Zielstellungen sind die Entlastung einer im Durchschnitt immer älter werdenden Belegschaft von körperlich stark beanspruchenden, ermüdenden und repetitiven Aufgabenstellungen in der Produktion und eine damit verbundene Steigerung der Mitarbeiterzufriedenheit sowie eine fähigkeitsorientierte Arbeitsteilung zwischen Mensch und Roboter zur Erhöhung der Produktivität und Qualität. Eine weitere, in dieser Arbeit gezeigte Einsatzmöglichkeit ist die Unterstützung leistungsgeminderter Personen in Behindertenwerkstätten, wobei die Befähigung zu höherwertigen Aufgabeninhalten im Vordergrund steht.

Mit der umgesetzten Arbeitsraumerfassung und -absicherung wird ein effizienter Lösungsansatz zum intelligenteren Einsatz von potentiell gefährlichen Industrierobotern der Kollaborationsart der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung entwickelt. Durch eine robuste Detektion von Hindernisobjekten sowie eine konservative Klassifizierung in Personen und andere Hindernisse werden Kollisionen mit dem eingesetzten Assistenzroboter zuverlässig vermieden und angepasste Reaktionsstrategien ermöglicht. Der flexible und wirtschaftliche Einsatz von kooperierenden Industrierobotern mit lediglich kurzen Stillstandszeiten bei sich ändernden Umgebungsbedingungen und ohne die Programmierung durch Fachpersonal erfordert eine möglichst autonome Ableitung von Roboterbewegungsbahnen. Zur Lösung dieses Handlungsbedarfs wird ein neuartiger Planer auf Basis der Zellzerlegung des Arbeitsraums für den betrachteten und weit verbreiteten Anwendungsfall des vertikalen Sechsachs-Knickarmroboters mit Zentralhand realisiert, um kollisionsfreie, möglichst kurze und für den Bediener intuitiv nachvollziehbare Bahnen autonom generieren zu können.

