STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

MATTHIAS PALZKILL

Heuristisches Suchverfahren zur Objektlageerkennung aus Punktewolken für industrielle Zuführsysteme

Universität Stuttgart

Fraunhofer IPA

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 37

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Matthias Palzkill

Heuristisches Suchverfahren zur Objektlageerkennung aus Punktewolken für industrielle Zuführsysteme

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00, Telefax 0711 970-1399
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Liebherr-Verzahntechnik GmbH

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.
ISSN: 2195-2892
ISBN (Print): 978-3-8396-0784-8

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2014
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis" (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung" in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl Thomas Bauernhansl Engelbert Westkämper

Heuristisches Suchverfahren zur Objektlageerkennung aus Punktewolken für industrielle Zuführsysteme

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Matthias Palzkill
aus Berlin

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl
Mitberichter:	Juniorprof. Dr.-Ing. Andreas Pott
	Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
Tag der mündlichen Prüfung:	17.07.2014

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und
Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2014

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) der Fraunhofer Gesellschaft in Stuttgart.

Mein großer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Alexander Verl für die Übernahme des Hauptberichts, seiner Unterstützung für diese Arbeit und die Förderung meiner Tätigkeit. Bei Herrn Jun.-Prof. Andreas Pott bedanke ich mich für die Übernahme des Mitberichts sowie für die wertvollen Diskussionen und Beiträge. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Jörg Krüger für die Übernahme des Mitberichts.

Ich danke allen meinen Kollegen für die gute Zusammenarbeit. Für die konstruktiven Diskussionen und die großartige Arbeitsatmosphäre bedanke ich mich bei Herrn Dr. Thomas Ledermann, Herrn Felix Spenrath, Herrn Hendrik Mütherich, Herrn Dr. Alexander Spiller und Herrn Werner Kraus. Ich danke den vielen weiteren Unterstützern am Institut, insbesondere Frau Heide Kreuzburg für die organisatorische Unterstützung des Promotionsprozesses und Frau Luzia Schuhmacher für das sorgfältige Fehlerlesen der schriftlichen Ausarbeitung.

Ohne das Mitwirken der beteiligten Systemintegratoren und Endanwender bei den industriellen Realisierungen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dr. Alois Mundt und der Firma Liebherr für die erfolgreiche und konstruktive Zusammenarbeit.

Mein tiefer Dank gilt meiner geliebten Frau Anna für ihre Bereitschaft mich bei diesem Prozess zu unterstützen und mir liebevoll mit Rat und Tat zur Seite zu stehen. Schließlich bedanke ich mich bei meiner Familie, die mich jederzeit uneingeschränkt gefördert hat.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein heuristisches Verfahren zur Objektlageerkennung für automatisierte Zuführsysteme vorgestellt, das erfolgreich im industriellen Einsatz an zehn automatisierten Zuführsystemen erprobt werden konnte.

Zur Erfassung der Szene, einem mit chaotisch gelagerten Werkstücken gefüllten Ladungsträger, kann ein beliebiges Sensorsystem zur Tiefenmessung genutzt werden, aus der eine Punktewolke erhalten wird. Die Objektlageerkennung wird dann als kombinatorisches Optimierungsproblem betrachtet und hierfür eine Konstruktionsheuristik angewendet. Für diese heuristische Baumsuche wird aus dem kontinuierlichen Suchraum zunächst eine endliche Menge an möglichen Werkstücklagen gebildet.

Für die Verwendung eines Entscheidungsbaums werden die Elemente der Suchmenge in zwei Komponenten aufgespaltet. Die erste Komponente beschreibt einen interessanten Punkt innerhalb des Suchraums, der sich auf der Werkstückoberfläche befindet. Die zweite Komponente beschreibt eine mögliche Werkstücklage relativ zu einem interessanten Punkt. Die hierdurch erhaltenen Teilsuchmengen weisen eine signifikant geringere Komplexität gegenüber der ursprünglichen Suchmenge auf, da die interessanten Punkte eine Zwangsbedingung an die relativen Werkstücklagen stellen können und hierüber deren Bewegungsfreiheit einschränken.

Als Suchstrategie der Baumsuche wird eine Bestensuche verwendet. Die Bestensuche zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine heuristische Schätzung zu jedem Baumknoten abgeben kann, wie weit die Entfernung des Baumknotens von einer Lösung ist und stets denjenigen Weg weiterverfolgt, der am kürzesten erscheint.

Die abschließende Evaluierung der Werkstücklagen erfolgt durch eine sechsdimensionale Hough-Abstimmung, die auch als Generalisierte Hough-Transformation bezeichnet wird. Die verwendeten Merkmale für die Hough-Abstimmung sind Sensormesswerte, die relativ zu einem interessanten Punkt betrachtet werden. Für jede Konstellation eines Sensormesswerts zu einem interessanten Punkt kann eine wahrscheinlichkeitsbasierte Aussage über mögliche zugehörige Werkstücklagen getroffen werden. Durch die Superpositionierung aller wahrscheinlichkeitsbasierten Aussagen können Lösungskandidaten gebildet werden, die anhand eines statistischen Tests einer Gütebewertung unterzogen werden. Mit Hilfe der erhaltenen Prüfgröße wird unter Berücksichtigung einer geforderten Signifikanz über die Annahme einer Werkstücklage entschieden.

Abstract

In this dissertation, a heuristic method for object pose detection for automated feeding systems is presented, which was successfully tested in industrial applications. Testing of the procedure is done on the basis of extensive data from industrial applications, which were obtained at ten automated feeding systems, with three families of parts and a total of 15 types of workpieces.

To detect the scene, typically a carrier filled randomly with workpieces, any sensor system can be used for depth measurement from which a point cloud is obtained. The object pose detection then is considered as a combinatorial optimization problem, for which a construction heuristic is applied. For this heuristic tree search, a finite set of possible workpiece poses is initially derived from the continuous search space.

In order to use a decision tree, the elements of the search set are split into two components. The first component describes an interesting point in the search space, which is part of the workpiece surface. The second component describes possible workpiece poses relative to an interesting point. The partial search quantities obtained thereby have a significantly lower complexity compared to the original search set, since the interesting points can provide a constraint on the relative workpiece poses, thus restricting its freedom of movement.

The applied tree search strategy is best-first search. Best-first search explores the search tree by always expanding the most promising nodes first. These nodes are chosen according to a heuristic evaluation score, representing the estimated distance from the node to a solution.

Final evaluation of the workpiece poses is provided by a six-dimensional Hough voting procedure, which is also known as Generalized Hough Transform. The features used for Hough voting are sensor measurements considered relatively to an interesting point. For all possible constellations of a sensor measurement relative to an interesting point, a probabilistic statement about possible workpiece poses can be made. Through the superposition of all probability statements, solution candidates can be formed, which are subjected to a statistical test based on a quality rating. The obtained quality rating along with a given level of significance is used in order to decide about the acceptance of a workpiece pose. The method is able to locate three to four workpieces on average within 0.5 and 3 seconds, using a standard desktop computer.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung **III**

Abstract **IV**

Inhaltsverzeichnis **V**

Abbildungsverzeichnis **VIII**

Tabellenverzeichnis **XI**

Liste der verwendeten Formelzeichen **XIII**

1 Einleitung 1

1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Problemstellung 3
1.3 Literaturübersicht 6
1.4 Ziel und Inhalt der Arbeit 11
1.5 Anmerkungen zur Schreibweise 13

2 Grundlagen 15

2.1 Zuführsysteme 15
2.1.1 Manuelle Zuführung 16
2.1.2 Mechanisierte Zuführung 17
2.1.3 Semi-automatisierte Zuführung 18
2.1.4 Automatisierte Zuführung 19
2.2 Industrieroboter 21
2.2.1 Serielle Industrieroboter 22
2.2.2 Parallelkinematiken 23
2.2.3 Greifsystem des Roboters 23
2.3 Generierung von 3D-Sensordaten 25
2.3.1 Berührungslose 3D-Entfernungsmessverfahren 26
2.3.2 Kinematiken zur Bewegung von Entfernungsmesssystemen 28
2.4 Werkstückdefinition 29
2.4.1 Referenzaufnahmen 29
2.4.2 Regelgeometrische Grundformen 30

2.4.3 Flächenmodell 30
2.5 Interessante Punkte 31
2.6 Hough-Transformation 33
2.7 Heuristische Suchverfahren 34
2.7.1 Optimierungsverfahren 34
2.7.2 Baumstrukturen 35
2.7.3 Informierte und uninformierte Baumsuchverfahren 36

3 Suchraum der Objektlageerkennung 38

3.1 Bildung einer Suchmenge 38
3.1.1 Suchbereich 38
3.1.2 Koordinatensysteme 42
3.1.3 Parametrisierung von Werkstücklagen 43
3.1.4 Diskretisierung von Werkstücklagen 49
3.1.5 Beschränkung 55
3.1.6 Metrik und Nachbarschaft 56
3.1.7 Komplexitätsbetrachtung 58
3.2 Strukturierung der Suchmenge 61
3.2.1 Betrachtung der Oberflächensichtbarkeit 61
3.2.2 Beschreibung der Werkstücklage über interessante Punkte 65
3.2.3 Notwendige Eigenschaften interessanter Punkte 67
3.2.4 Lokale Extremwerte als interessante Punkte 69
3.2.5 Eignung lokaler Extremwerte als interessante Punkte 72
3.2.6 Repräsentierung durch Entscheidungsbaum 73
3.2.7 Kaskadierung von Entscheidungsbäumen 75
3.3 Filterung der Suchmenge 78
3.4 Ergebnisse 80
3.4.1 Diskretisierungsschrittweite 80
3.4.2 Berechnungsdauer der Sichtbarkeit 83
3.4.3 Interessante Punkte in Sensormesswerten 84

4 Suchstrategie der Objektlageerkennung 87

4.1 Bestensuche 87
4.1.1 Ablaufübersicht 88
4.1.2 Evaluierungsfunktion 89
4.2 Vorrangwarteschlange 90

4.2.1 Operatoren 91
4.2.2 Unter-Vorrangwarteschlangen 92
4.2.3 Vorsortierung 94
4.2.4 Sortierverfahren 96
4.3 Evaluierung interessanter Punkte 97
4.4 Evaluierung relativer Werkstücklagen 99
4.4.1 Akkumulatorraum 100
4.4.2 Stimmabgaben über Sensormesswerte 101
4.4.3 Abstimmungsdatenbank 102
4.4.4 Abstimmungsergebnis 104
4.4.5 Annahme- und Ablehnungsbereich 107
4.4.6 Evaluierungsfunktion 109
4.5 Erprobung im industriellen Einsatz 112
4.5.1 Einlernen neuer Werkstücke 112
4.5.2 Entnahmeplanung 114
4.5.3 Ablaufsteuerung 116
4.6 Ergebnisse 118
4.6.1 Evaluierung interessanter Punkte 118
4.6.2 Evaluierung relativer Werkstücklagen 119
4.6.3 Sortiervorgänge 122
4.6.4 Anzahl expandierter Baumknoten 124
4.6.5 Anzahl gefundener Werkstücke 124
4.6.6 Dauer der Lageerkennung 125
4.7 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse 127
5 Zusammenfassung und Ausblick 129
Literaturverzeichnis 132

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Am Markt verfügbare automatisierte Zuführsysteme 2
Abbildung 1-2 Geometrien von Werkstücken 4
Abbildung 1-3 Geforderte Taktzeiten 5
Abbildung 1-4 Verteilung der Anlieferungszustände 5
Abbildung 1-5 Komponenten eines Verfahrens zur Objektlageerkennung 10

Abbildung 2-1 Qualitative Darstellung der Veränderung des Ordnungszustands 16
Abbildung 2-2 Materialfluss zwischen zwei Fertigungsschritten 16
Abbildung 2-3 Gewicht von Werkstücken zur Handhabung mit Zuführsystemen 18
Abbildung 2-4 Systemaufbau eines automatisierten Zuführsystems mit Roboter 20
Abbildung 2-5 Hersteller von Industrierobotern 22
Abbildung 2-6 Serielle Industrieroboter 22
Abbildung 2-7 Parallelkinematiken 23
Abbildung 2-8 Mechanische Greifsysteme mit Zusatzachsen 24
Abbildung 2-9 3D-Sensoren 25
Abbildung 2-10 Typische 3D-Entfernungsmessverfahren 26
Abbildung 2-11 Kinematiken zur Bewegung von Entfernungsmesssystemen 28
Abbildung 2-12 Montage der Sensorik 29
Abbildung 2-13 Regelgeometrische Grundformen 30
Abbildung 2-14 Flächenmodelle verwendeter Werkstücke 31
Abbildung 2-15 Interessante Punkte 32
Abbildung 2-16 Standard Hough-Transformation 33
Abbildung 2-17 Entscheidungsbaum mit binären Entscheidungsvariablen 36

Abbildung 3-1 Arten von Ladungsträgern 39
Abbildung 3-2 Automatische Ladungsträgerzuführung 41
Abbildung 3-3 Relevante Koordinatensysteme 43
Abbildung 3-4 Veranschaulichung der xyz-Drehkonvention 45
Abbildung 3-5 Rotation über Achswinkel 47
Abbildung 3-6 Minimal umgebendes Rechteck eines Werkstücks. 48
Abbildung 3-7 Strukturiertes gleichmäßiges Gitter 49
Abbildung 3-8 Verteilung von Rotationen auf einer Kugeloberfläche 51

Abbildung 3-9 Reguläre Parkettierung einer Sichtkugel 51
Abbildung 3-10 Unterschiedliche Anzahl an Punkten auf einer Kugel 52
Abbildung 3-11 Unterschiedliche Verteilungen von Punkten 54
Abbildung 3-12 Ladungsträger in der Industrie 55
Abbildung 3-13 Vereinfachter Zusammenhang zwischen Gitter- und Winkelschrittweite 58
Abbildung 3-14 Resultierende Größen der Suchmenge 60
Abbildung 3-15 Rasterisierung eines Dreiecks 62
Abbildung 3-16 Beschreibung der Werkstücklage über einen interessanten Punkt 66
Abbildung 3-17 Berechnung eines interessanten Punkts 71
Abbildung 3-18 Interessante Punkte und resultierende relative Werkstücklagen 71
Abbildung 3-19 Veränderung der durchschnittlichen Anzahl interessanter Punkte 73
Abbildung 3-20 Entscheidungsbaum für die Objektlageerkennung 74
Abbildung 3-21 Kaskadierung von zwei Entscheidungsbäumen 77
Abbildung 3-22 Identische Sichtbarkeiten von Werkstücken 78
Abbildung 3-23 Darstellung verschiedener Rotationsmengen 80
Abbildung 3-24 Abschätzung der Gitterschrittweite 81
Abbildung 3-25 Gitterschrittweite 81
Abbildung 3-26 Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung 82
Abbildung 3-27 Vergleich der Laufzeiten verschiedener Renderfunktionen 84
Abbildung 3-28 Anzahl an interessanten Punkten in einer Punktewolke 85
Abbildung 3-29 Anzahl an interessanten Punkten im Ladungsträger 85
Abbildung 3-30 Anzahl an interessanten Punkten auf einem Förderband 86

Abbildung 4-1 Regelablauf der Bestensuche 88
Abbildung 4-2 Operatoren der Vorrangwarteschlange 94
Abbildung 4-3 Vorzugslagen zylindrischer Körper 95
Abbildung 4-4 Häufigkeit der Vorzugsorientierung 96
Abbildung 4-5 Interessante Punkte in einem Ladungsträger 99
Abbildung 4-6 Akkumulatorraum vor Beginn einer Hough-Abstimmung 101
Abbildung 4-7 Hough-Abstimmung 103
Abbildung 4-8 Abstimmungsdatenbank eines Kettenglieds 104
Abbildung 4-9 Messgenauigkeit des Linienscanners 106
Abbildung 4-10 Erwartungswert des Abstimmungsergebnisses 107
Abbildung 4-11 Veränderung des Abstimmungsergebnisses 110
Abbildung 4-12 Geplantes Teilespektrum eines automatisierten Zuführsystems 113
Abbildung 4-13 Regelablauf für die Entnahmeplanung 116

Abbildung 4-14 Stationäre und robotergeführte Varianten des Sensormesssystems 117
Abbildung 4-15 Ablaufsteuerung 118
Abbildung 4-16 Evaluierungswerte interessanter Punkte.....119
Abbildung 4-17 Größe der Abstimmungsdatenbank 120
Abbildung 4-18 Häufigkeitsverteilung der Abstimmungsergebnisse.....121
Abbildung 4-19 Ergebnisse der Prüfgröße 121
Abbildung 4-20 Laufzeitverhalten der Sortierverfahren 123
Abbildung 4-21 Vergleich der Leistungsfähigkeit 123
Abbildung 4-22 Maximale Anzahl expandierter Baumknoten.....124
Abbildung 4-23 Anzahl gefundener Werkstücke 125
Abbildung 4-24 Suchdauer der Objektlageerkennung.....126
Abbildung 4-25 Dauer der Ladungsträger-Lageerkennung.....127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1 Orientierungs- und Positionierungsgrad von Körpern.....6
Tabelle 1-2 Konventionen.....14

Tabelle 4-1 Parameter zum Einlernen neuer Werkstücke.....114

Liste der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer Aided Design
CUDA	Compute Unified Device Architecture
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
MSER	Maximally Stable Extremal Regions
MSVs	Maximally Stable Volumes
MIPS	Millionen Instruktionen pro Sekunde
OpenGL	Open Graphics Library
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
STL	Standard Triangulation Language
SURF	Speeded Up Robust Features
VRML	Virtual Reality Modeling Language
VTK	Visualization Toolkit

Variablen

Symbol	Beschreibung
A	Akkumulatorraum
a	Element der Vorrangwarteschlange
α	Signifikanzniveau
β	Winkelauflösung des Sensorsystems
d	Vertikaler Messabstand des Sensorsystems
d_r	Rotationsmetrik
d_t	Translationsmetrik

d_T	Objektlagenmetrik
e_x, e_y, e_z	Einheitsvektoren
F	Dichtefunktion der Normalverteilung
f_{Hough}	Abstimmungsdatenbank
f_R	Umrechnungsfunktion des Drehvektors in eine Rotationsmatrix
$f_{Raster,W}$	Rasterisierungsfunktion eines Werkstücks
$f_{Render,W}$	Renderfunktion eines Werkstücks
h_I	Evaluierungsfunktion für interessante Punkte
h_W	Evaluierungsfunktion für Werkstücklagen relativ zu interessanten Punkten
i, j, k	Komponenten einer diskreten Position
k_d	Gewichtungsfaktor zwischen Rotations- und Translationsmetrik
k_{Hough}	Abstimmungsergebnis einer relativen Werkstücklage
l_S	Maximale Messentfernung des Sensorsystems
L_W	Werkstücklänge bzw. längste Seite des minimal umgebenden Rechtecks
L_x, L_y, L_z	Kantenlängen eines quaderförmigen Ladungsträger-Innenraums
λ	Argument der Normalverteilungsfunktion
$\mathcal{M}$	Menge homogener Koordinatentransformationen
$M_{\Delta t}$	Umrechnungsmatrix der Gitterpunkte in einen Ortsvektor
μ_{Hough}	Theoretischer Erwartungswert des Abstimmungsergebnisses
$\tilde{\mu}_{Hough}$	Verwendeter Erwartungswert des Abstimmungsergebnisses
$\Delta\mu$	Erwartungswertkorrektur
N_d	Größe der Nachbarschaft einer diskreten Werkstücklage
N_I	Anzahl interessanter Punkte
N_i, N_j, N_k	Anzahl der Gitterpunkte entsprechender Komponenten
N_K	Anzahl der Ausprägungen eines Oberflächenmerkmals
N_r	Anzahl diskreter Orientierungen
N_T	Suchraumgröße
N_u	Anzahl von Punkten auf einer Kugeloberfläche
N_v	Anzahl der Drehung um die Blickrichtung
N_W	Anzahl relativer Werkstücklagen
$n_{Stimmen}$	Anzahl der Stimmen für eine relative Werkstücklage
O	Komplexität
R	Rotationsmatrix
r	Rotation über Achswinkel mit Drehvektor und Drehwinkel
$\mathcal{r}$	Diskrete Rotation

$\|r\|$	Drehwinkel des Drehvektors
Δr	Winkelschrittweite
r_x, r_y, r_z	Komponenten des Drehvektors
σ	Standardabweichung
T	Homogene Koordinatentransformation
t	Ortsvektor eines Koordinatensystems
$\dot{t}$	Diskreter Ortsvektor bzw. Gitterpunkt
Δt	Kantenlängen des Gitters bzw. Gitterschrittweite
t_x, t_y, t_z	Komponenten des Ortsvektors
u, v	Komponenten einer diskreten Orientierung
V_L	Volumen des Ladungsträger-Innenraums
x	Allgemeiner Ortsvektor
ξ	Integrationsvariable
z_{Hough}	Prüfgröße beim Einstichproben-Gauß-Test
Δz	Höchstabstand zur Berechnung lokaler Maxima

Indizes

Symbol	Beschreibung
G	Koordinatensystem des Greifers
R	Koordinatensystem des Roboters
S	Koordinatensystem des Sensors
I	Koordinatensystem eines interessanten Punkts
L	Koordinatensystem des Ladungsträgers
P	Koordinatensystem eines Messpunkts bzw. Voxels
W	Koordinatensystem des Werkstücks

1 Einleitung

In diesem Kapitel erfolgt die Einleitung in das Themenfeld der industriellen Objektlageerkennung. In Abschnitt 1.1 wird die Ausgangssituation im produzierenden Gewerbe hinsichtlich automatisierter Zuführsysteme dargelegt. Abschnitt 1.2 zeigt die Notwendigkeit eines Verfahrens zur Objektlageerkennung und deren Eigenschaften auf. Die Einordnung der Objektlageerkennung innerhalb der Bildverarbeitung und eine Übersicht aktueller Ansätze wird in Abschnitt 1.3 behandelt. In Abschnitt 1.4 werden die Ziele und der Aufbau der Arbeit formuliert. In Abschnitt 1.5 folgt eine Zusammenfassung der Konventionen für die Schreibweise.

1.1 Ausgangssituation

Industrielle Betriebe sind fortwährend bestrebt, ihre Kosten zu senken. Begründet wird dies unter anderem mit einem starken Wettbewerb, der nicht zuletzt durch die Globalisierung verstärkt wird. Aufgrund niedriger Logistikkosten konkurrieren Standorte nun weltweit miteinander. In der Folge kommt es zur Verlagerung von Produktionsstandorten in die aufstrebenden Märkte [Ebert2012]. Hierdurch steigt der Druck zur Lohnkostensenkung und Erhöhung der Produktivität und Effizienz [Schröder2008] aller Marktteilnehmer. Gleichzeitig gibt es sowohl vom Gesetzgeber als auch von den Unternehmen selbst Bestrebungen zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen. Insbesondere in der Fertigung von schweren und unhandlichen Werkstücken ist diese Entwicklung zu erkennen [Herbertza2005]. Hinzu kommen die steigende Variantenvielfalt und die daraus resultierende Verringerung der Losgrößen [Westkämper2009], was zu einer Flexibilisierung der Produktion führen muss.

Die Folgen dieser Veränderungsprozesse führten zu einem Wachstum bei der Automatisierung in allen Branchen [Klempert2012], sodass viele Fertigungsstätten bereits aus einer Aneinanderreihung automatisierter Fertigungsschritte bestehen. Diese Fertigungsschritte sind jedoch überwiegend über manuelle oder mechanisierte Schnittstellen verknüpft: Am Ende einer jeden Schnittstelle müssen Werkstücke dem nachfolgenden Fertigungsschritt zugeführt werden, wofür eine Zuführeinrichtung benötigt wird.

Die Einteilung der Fertigungsverfahren erfolgt nach DIN 8580 in Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Ändern von Stoffeigenschaften. Mit Ausnahme des Urformens, bei dem keine Werkstücke zugeführt werden, da der Zusammenhalt eines Körpers erst geschaffen

wird [Westkämper2012], ist der Einsatz von Zuführsystemen für alle anderen Fertigungsschritte möglich und meist auch nötig. Aus diesem Sachverhalt kann die Relevanz von Zuführsystemen unterstrichen werden.

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Typen von Zuführsystemen. Die vorherrschende manuelle Zuführung gilt als flexibel, aber teuer und die ebenfalls weit verbreitete mechanisierte Zuführung als unflexibel bezüglich Änderungen der Werkstücke [Leonard2007, Balslev2002]. Schwachstellenanalysen haben das hieraus resultierende Manko des niedrigen Automatisierungsgrads der internen Transport- und Fördertechnik identifiziert [Jodin2012]. Der daraus entstehende Innovationsdruck erhöht den Automatisierungsgrad in der Industrie, wodurch neue Anwendungsfelder für Robotersysteme erschlossen werden.

Als Synonym für automatisierte Zuführsysteme mit Robotern wird oft der *Griff-in-die-Kiste* (engl.: Random Bin Picking) verwendet und steht damit als Oberbegriff für diese Art der Handhabung ungeordneter Werkstücke [Balslev2002, Ikeuchi1983]. Bisher sind lediglich vereinzelt Speziallösungen für solche automatisierten Zuführsysteme in der industriellen Praxis zu finden [Verl2009]. In Abbildung 1-1 sind am Markt verfügbare Zuführsysteme und ihre Leistungsfähigkeit qualitativ dargestellt.

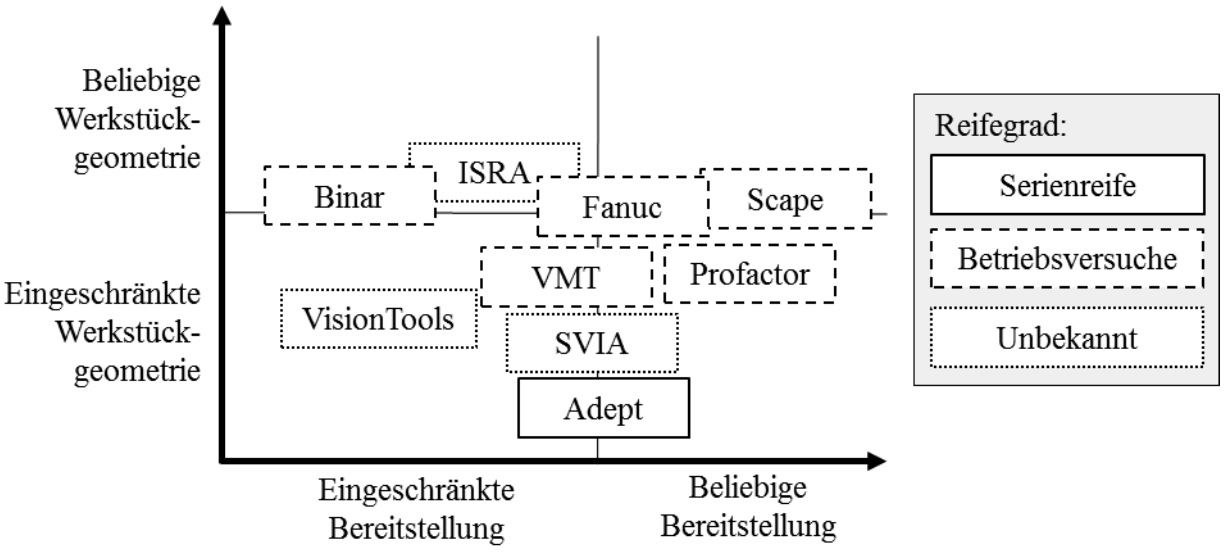

Abbildung 1-1 Am Markt verfügbare automatisierte Zuführsysteme nach eigener Recherche ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

Automatisierte Zuführsysteme mit beliebiger Werkstückgeometrie sowie beliebiger Bereitstellungsform sind praktisch nicht im Einsatz, sodass die aufgeführten Lösungen gemäß der Darstellung als nicht universell einsetzbar angesehen werden können. Hinsichtlich des Reifegrades der Zuführsysteme ergab die Recherche, dass die aktuelle Entwicklung vor allem auf der Stufe der Betriebsversuche angesiedelt ist. Lediglich bei einem Anbieter ist die Serienreife gegeben, hier allerdings auf einem stark eingeschränkten Anwendungsfeld.

Die Einschätzung, automatisierte Zuführsysteme mit Robotern würden zu einem Arbeitsplatzabbau in den eingesetzten Ländern führen, ist nur zum Teil gerechtfertigt, da viele Fertigungsstandorte vor der Entscheidung stehen, entweder ihre gesamte Produktion in Niedriglohnländer zu verlagern oder durch eine Teilautomatisierung einen Teil der Belegschaft zu erhalten.

1.2 Problemstellung

Die Schwierigkeit bei den in dieser Arbeit betrachteten Zuführsystemen ist, dass die Lage der zu handhabenden Werkstücke zunächst nicht bekannt und somit eine automatisierte Handhabung behindert ist. Die Lage eines Werkstücks setzt sich aus Orientierung und Position zusammen, wobei durch die Orientierung die drei rotatorischen und durch die Position die drei translatorischen Freiheitsgrade bestimmt werden [VDI1990]. Nach der herkömmlichen Unterscheidung aus Anwendersicht gehört die Problemstellung zur Problemklasse 1 [Wolter1985] von Robotersystemen zur Werkstückentnahme, wonach im Wesentlichen die Geometrie des Zielobjekts bekannt und die Lage der Zielobjekte unbekannt ist.

Die Aufgabe besteht demnach darin, die Werkstücke aus einem Ladungsträger heraus in eine möglichst exakt definierte Lage an einer Übergabeposition für weitere Fertigungsschritte zu platzieren. Die hierfür eingesetzte Handhabungseinrichtung soll durch einen Industrieroboter realisiert werden. Die Aufgabe eines Bildverarbeitungssystems ist dann die Lokalisierung der Werkstücke innerhalb der bereitgestellten Ladungsträger. Hierfür muss auf Grundlage berührungsloser Messverfahren die Szene sensorisch erfasst und entsprechend interpretiert werden. Um einen wirtschaftlichen Einsatz derartiger automatisierter Zuführsysteme zu gewährleisten, müssen eine Reihe von Randbedingungen eingehalten werden. Insbesondere an die Bildverarbeitung ergeben sich hieraus Anforderungen, welche die Problemstellung verdeutlichen.

Die **Geometrie** der zu handhabenden Werkstücke ist bei automatisierten Zuführsystemen bekannt. Ein großer Anteil der in der Industrie vorkommenden Werkstücke kann durch regelgeometrische Elemente beschrieben werden [Stotz2011] oder stellt rotationssymmetrische Werkstü-

cke dar [Hirschvogel2006]. Rotationssymmetrische Werkstücke besitzen gegenüber nicht-rotationssymmetrischen Werkstücken einen zu bestimmenden Freiheitsgrad weniger, wodurch sich die Erkennungskomplexität reduziert. Aus Abbildung 1-2 wird allerdings erkenntlich, dass der überwiegende Anteil der Werkstücke nur durch Freiformflächen ausgedrückt werden kann. Um das Anwendungsfeld komplett erschließen zu können, muss das Bildverarbeitungsverfahren also beliebige Geometrien handhaben können.

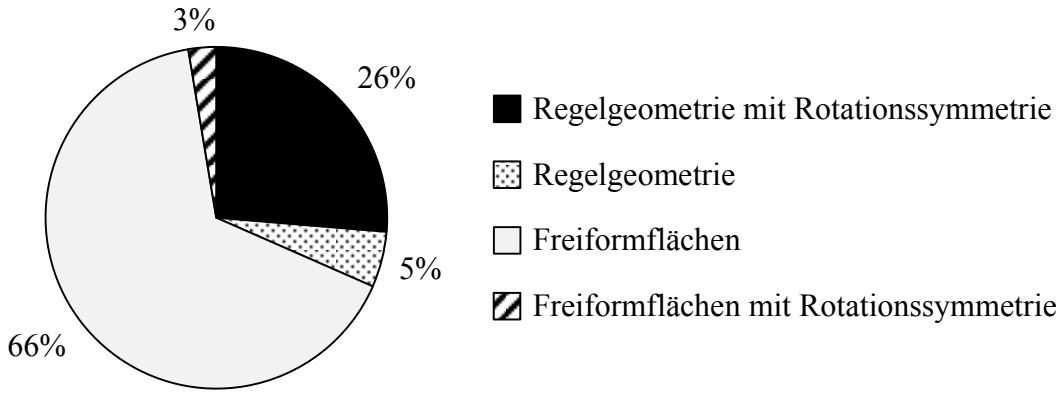

Abbildung 1-2 Geometrien von Werkstücken zur Handhabung mit automatisierten Zuführsystemen. Eigene Erhebung basierend auf 38 Kundenanfragen im Zeitraum von Anfang 2010 bis Mitte 2012. Bei den Werkstücken handelt es sich durchweg um starre Metallkörper (z.B. Tiefziehteile, Guss- und Schmiedeteile). Vereinzelte Anfragen zu biegeschlaffen Teilen wurden nicht berücksichtigt.

Die **Taktzeit** der Anlage gibt die anvisierte Dauer eines Entnahmezyklus an. Wird die Taktzeit einer Anlage überschritten, so kommt es bei einer starren Verkettung der Fertigungsschritte unweigerlich zum Ausbremsen vorgelagerter und nachfolgender Anlagen. Auch durch eine elastische Verkettung über Bereitstellungspuffer kann eine Taktzeitüberschreitung nur kurzzeitig kompensiert werden [Arnold2003]. Aus Abbildung 1-3 kann entnommen werden, dass bei etwa der Hälfte aller Anlagen der Takt zwischen 10 und 20 Sekunden liegen soll. Von diesem Wert müssen die Entnahmedauer, die Scandauer und Zeit für die restliche Entnahmeplanung abgezogen werden und so ergibt sich für die erlaubte Rechenzeit der Bildverarbeitung, obgleich stark anwendungsbezogen, ein wesentlich geringerer Wert. Für eine typische Anwendung sollte die Dauer der Bildverarbeitung weniger als 2 bis 3 Sekunden betragen. Da pro Greifzyklus mindestens eine zugängliche Werkstücklage detektiert sein muss, sollte die Bildverarbeitung möglichst viele Werkstücke innerhalb dieser verfügbaren Zeitdauer lokalisieren.

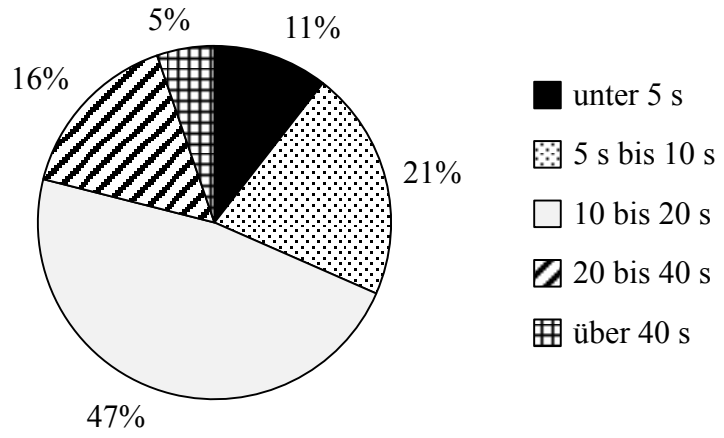

Abbildung 1-3 Geforderte Taktzeiten für automatisierte Zuführsysteme. Eigene Erhebung basierend auf 38 Kundenanfragen im Zeitraum von Anfang 2010 bis Mitte 2012.

Der **Anlieferungszustand** kann chaotisch oder semi-chaotisch erfolgen. Bei der chaotischen Bereitstellung muss angenommen werden, dass die Werkstücke in allen möglichen Lagen ohne Ordnung vorliegen. Die semi-chaotische Bereitstellung impliziert eine erheblich gestörte Grundordnung, bei der die Werkstücke einen Bewegungsspielraum besitzen und ihre Auslenkung unter Umständen rotatorisch begrenzt ist. Dies ist der Fall, wenn die Teile grob im Ladungsträger gestapelt wurden oder Zwischenlagen im Ladungsträger zum Einsatz kommen. Trotz dieser Einschränkungen ist auch für den dargestellten Anteil der semi-chaotischen Anlieferung kein Freiheitsgrad der Werkstücke bekannt. Aus Abbildung 1-4 geht hervor, dass die überwiegend vorherrschende Anlieferung chaotisch ist und durch das Bildverarbeitungssystem aufgelöst werden muss.

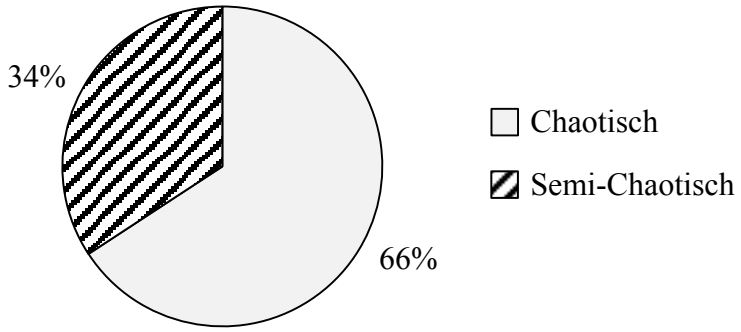

Abbildung 1-4 Verteilung der Anlieferungszustände von Werkstücken in Ladungsträgern. Eigene Erhebung basierend auf 38 Kundenanfragen im Zeitraum von Anfang 2010 bis Mitte 2012.

Der Ordnungszustand der Zielobjekte gemäß des beschriebenen Anlieferungszustands kann daher im Wesentlichen mit den Kennzahlen Orientierungsgrad (OG) 0 und Positionierungsgrad (PG) 0 beschrieben werden (siehe Tabelle 1-1), da die Werkstücke mit vollständig unbekannten Freiheitsgraden meist als Schüttgut in Ladungsträgern liegen.

Orientierungsgrad (OG)		Positionierungsgrad (PG)	
OG	Erklärung	PG	Erklärung
3	Orientierung des Körpers in allen Rotationsachsen bestimmt	3	Ursprung des körpereigenen Koordinatensystems befindet sich an einem bestimmten Punkt
2	Orientierung des Körpers ist in zwei Rotationsachsen bestimmt	2	Ursprung des körpereigenen Koordinatensystems ist beliebig auf einer Kurve, z.B. Gerade oder Kreisbahn angeordnet
1	Orientierung des Körpers ist in einer Rotationsachse bestimmt	1	Körper ist beliebig auf einer Fläche, z.B. Ebene oder Zylinder angeordnet
0	Orientierung des Körpers ist in allen Rotationsachsen unbestimmt	0	Körper ist beliebig im Raum angeordnet

Tabelle 1-1 Orientierungs- und Positionierungsgrad von Körpern nach Hesse [2006].

Die Aufgabenstellung einer Objektlageerkennung besteht somit in der Bestimmung von Objektposition und -orientierung beliebiger Geometrien innerhalb eines sechsdimensionalen Suchraumes. Zentrale Herausforderungen der Objektlageerkennung sind die Gestaltung des Suchraumes, der die tatsächlich vorliegenden Objekte hinreichend genau abbildet, und die Suchstrategie, die korrekte Objektlagen zuverlässig identifiziert.

1.3 Literaturübersicht

Die Bildverarbeitung kann in verschiedene Teilgebiete gegliedert werden, die sich in ihren Aufgabenstellungen und Anwendungsfeldern unterscheiden. Da in der Literatur diese Begrifflichkeiten nicht immer eindeutig gehandhabt werden, soll die folgende Terminologie dieser Arbeit zu Grunde liegen:

- Die *Objektdetektion* stellt eine Mustererkennung dar, bei der die Eingangsdaten in zwei Klassen segmentiert werden [Yang2006]: in mögliche Objekte und einen nicht näher spe-

zifizierten Hintergrund. Bei der Objektdetektion muss nicht notwendigerweise bekannt sein, um welches Objekt es sich handelt. Auch die Objektlage bleibt unbestimmt.

- Die *Objekterkennung* bezeichnet die Identifikation eines Objekts in den Eingangsdaten. Meist steht eine Vielzahl verschiedener Objektklassen zur Auswahl und das Ziel besteht in einer hohen Erkennungsrate bezüglich der in den Eingangsdaten abgebildeten Objekte [Frome2012]. In vielen Fällen ist vor der Objekterkennung eine Objektdetektion hilfreich, um die Erkennung von Objektklassen nur auf berechnete Segmente zu konzentrieren.
- Die *Objektlageerkennung* (auch Objektlokalisierung) bezeichnet die Bestimmung von Position (Translation) und Orientierung (Rotation) eines Objekts in den Eingangsdaten [Wöhler2009]. Das zu lokalisierende Objekt ist der Objektlageerkennung bekannt, entweder durch eine vorgeschaltete Objekterkennung oder durch entsprechendes Vorwissen. Bezogen auf die Eingangsdaten wird zwischen 3D-3D- und 2D-3D-Objektlageerkennung unterschieden. Im ersten Fall werden die Eingangsdaten von einem Abstandssensor gewonnen. Im zweiten Fall stammen sie von einem Flächenkamerabild [Wöhler2009].

Bei automatisierten Zuführsystemen kann davon ausgegangen werden, dass die Information über den im Ladungsträger befindlichen Werkstücktyp im linearen und nichtlinearen Materialfluss [Arnold2003] erhalten bleibt und somit zu jeder Zeit bekannt ist. Daher steht das Anwendungsfeld der Objektlageerkennung im Vordergrund und soll im Rahmen der Arbeit näher betrachtet werden.

Aufbau der Objektlageerkennungsverfahren

Zur Einordnung bestehender Verfahren zur Objektlageerkennung sollen drei charakterisierende Komponenten bzw. Bausteine hervorgehoben werden: die Objektbeschreibung, die Hypothesenbildung und der Hypothesentest. Die letzten beiden Komponenten bilden gemeinsam ein zweistufiges, allgemeines und ansatzunabhängiges Konzept und bedingen die Ausführung der Objektbeschreibung.

Die **Objektbeschreibung** definiert, in welcher Form Geometrieinformationen des Objekts für die Suche hinterlegt werden. Hierbei kann zwischen objekt- und beobachterzentrierten Ansätzen unterschieden werden:

- Bei *objektzentrierten Ansätzen* wird das Objekt in einem körpereigenen Bezugssystem abgebildet [Bicego2005]. Üblich ist auch die Bezeichnung *modellbasierter Ansatz*, da ein dreidimensionales Objektmodell mittels Primitiver erstellt wird [Anil2000]. Modellprimi-

tive können Merkmale wie Kanten oder Flächen sein, weshalb auch der Begriff der merkmalsbasierten Ansätze verwendet wird [Safronov2009].

- Bei *beobachterzentrierten Ansätzen* wird das Objekt relativ zu einem Beobachter beschrieben [Bicego2005]. Das Objekt wird dabei durch eine Vielzahl verschiedener Ansichten abgebildet, weshalb auch die Bezeichnung als *ansichtenbasierte Verfahren* verwendet wird [Ettelt2001, Bennamoun2002]. Um zuverlässigere Informationen gewinnen zu können, wird das Objekt von verschiedenen Positionen aus beobachtet [Tonko1997]. Auf eine Ansichtenplanung kann verzichtet werden, wenn angenommen wird, dass alle betrachteten Objektlagen eindeutig anhand jeweils einer Ansicht klassifizierbar sind [Fuchs2008].

Die **Hypothesenbildung** legt das Vorgehen zur Bestimmung eines Objektlagenkandidaten fest und kann überwiegend als aufsteigender Verstehensprozess gedeutet werden. Die hier skizzierte Klassifizierung soll anhand ihres Ansatzes der Suchaufwandreduktion erfolgen:

- Bei der *kombinatorischen Optimierung* wird von einer diskreten Lösungsmenge ausgegangen. Hierbei können die Ansätze im Wesentlichen anhand der verwendeten Suchbaumreduktion unterschieden werden [Baxanski2011]. Hervorgehoben werden soll das als Pose-Clustering [Olson1997] oder auch Generalisierte Hough-Transformation [Stockmann1987] bezeichnete Verfahren. Die Charakterisierung erfolgt durch eine parallele Akkumulation auf niedriger Ebene befindlicher Hinweise, gefolgt von einem Clustering-Vorgang, der diejenigen Hypothesen auswählt, welche die größte Unterstützung aus der Menge von Hinweisen aufweisen [Stockmann1987]. Die Suche ist weiterhin dadurch gekennzeichnet, dass alle möglichen Transformationen zwischen dem Suchobjekt und dem Bildraum diskretisiert werden [Veltkamp2001, Ballard1981]. Ursprünglich wurde die Hough-Transformation zur Erkennung von Linien in Binärbildern entwickelt und sukzessive auf die 2D-Bildverarbeitung und beliebige Formen erweitert [Ballard1981]. Während Pose-Clustering in der 2D-Bildverarbeitung weite Verbreitung gefunden hat [Strzodka2003, Opelt2004, Forsyth2002], gibt es auch im 3D-Bereich Anwendungsbeispiele [Rodgers2006, Hillenbrand2002]. Tiefendaten besitzen allerdings andere Eigenschaften als Farb- oder Grauwertbilder, sodass die entwickelten Merkmale nicht unbedingt übertragbar in den 3D-Bereich sind.
- Bei der *kontinuierlichen Optimierung* werden die kontinuierlichen Werte der Lösungsvariablen iterativ optimiert. Hierzu können neben naturanalogen Optimierungsverfahren, wie evolutionären Algorithmen [Stotz2011] oder schwarmintelligenten Algorithmen [Ledermann2011], auch hierarchisch iterative Methoden [Safronov2009] eingesetzt werden.

Der **Hypothesentest** beschreibt das Vorgehen zum Abgleich einer Objektlage mit den Messwerten hinsichtlich einer Gütebestimmung. Ist die Güte oberhalb bzw. unterhalb eines festgelegten Schwellwerts, so gilt die Objektlage entweder als erkannt oder wird verworfen. Der Hypothesentest kann insbesondere bei komplexen verrauschten Szenen ein Problem darstellen, da die erhaltenen Hypothesen zu ungenauen Vorhersagen führen können [Jurie1999]. Der vorzunehmende Vergleich zum Test der Hypothesen kann gegenüber der Hypothesenbildung als absteigender Verstehensprozess begriffen werden und über folgende Ansätze erfolgen:

- Bei einem *Histogrammvergleich* wird die Häufigkeitsverteilung metrisch skalierter Objektmerkmale betrachtet. Die Merkmale dabei sind in Klassen bzw. in Eimern (engl.: bin) eingeteilt. Der Vergleich kann dann Eimer-für-Eimer, Eimer-übergreifend oder durch die Messung der Unähnlichkeiten erfolgen [Siggelkow2002]. Für die Verwendung von Histogrammen eignen sich lokale Merkmale [Hetzel2001] wie beispielsweise Normalenvektoren [Ledermann2011].
- Bei einem *Schablonenvergleich* werden die Messwerte mit einer Maske des Objekts abgeglichen. Der Vergleich kann unter anderem durch eine modifizierte Kreuzkorrelationsfunktion [Gavrilla1994] gestaltet werden. Die Maske kann über das gesamte Objekt oder nur einen Objektteil erstellt werden [Ge2008].
- Dem *Streuwertvergleich* liegt eine Streuwerttabelle von Objektmerkmalen zu Grunde. Eine Streuwerttabelle kann insbesondere bei großen Datenmengen einen geringen Speicherplatzbedarf erzielen [Wolfson1997], weist aber unter Umständen eine vergleichsweise hohe Zugriffszeit auf Elemente auf.
- Bei einem *Abstandsvergleich* werden die Abstände zwischen zwei Punktewolken bestimmt. Der Gesamtabstand berechnet sich aus den einzelnen Abständen der Punkte. Die Auswahl der zu vergleichenden Punkte erfolgt entweder vollständig [Besl1992], zufällig [Masuda1996] oder nach bestimmten Kriterien [Weik1997]. Der Abstandsvergleich kann alternativ auch zwischen einer Punktewolke und einer Oberfläche durchgeführt werden [Ahn2004].

Die identifizierten Komponenten mit ihren jeweiligen Ansätzen werden in Abbildung 1-5 zur Übersicht dargestellt.

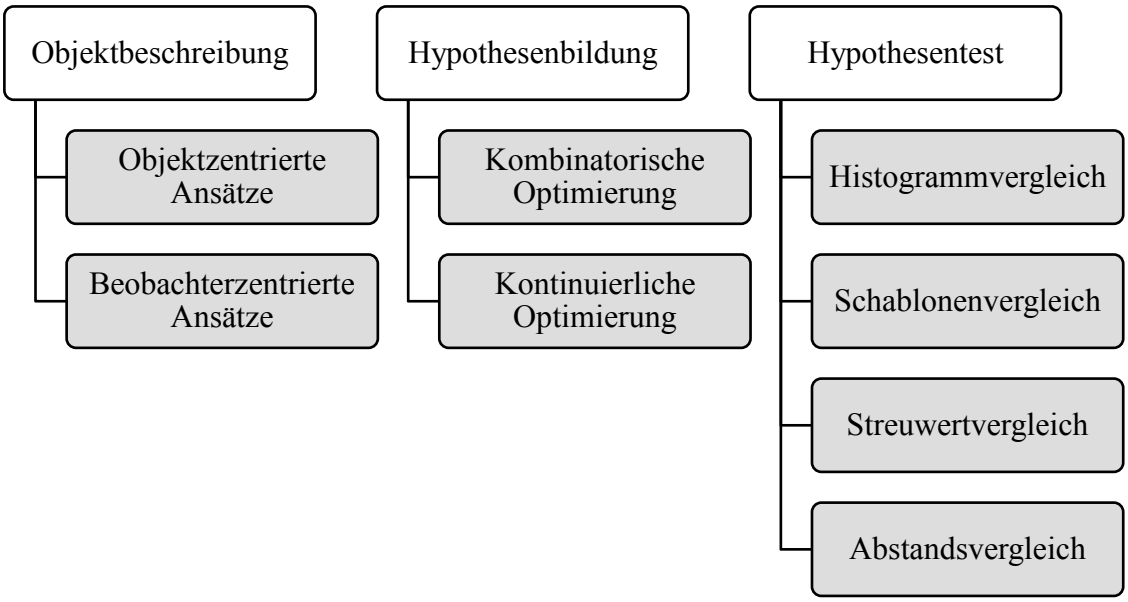

Abbildung 1-5 Komponenten eines Verfahrens zur Objektlageerkennung mit entsprechenden Ansätzen nach eigener Darstellung.

Betrachtung der Ansätze zur Objektlageerkennung

Die in der Problemstellung im vorhergehenden Abschnitt aufgezeigten erforderlichen Eigenschaften der Zuführsysteme lassen sich nicht notwendigerweise auf alle Verfahren zur Objektlageerkennung übertragen. In dieser Arbeit sollen Anwendungsfälle der öffentlichen oder privaten Verwendung ausgeschlossen werden, in denen andere Randbedingungen herrschen, wie unbekannte Geometrien oder biegeschlaffe Objekte. Hervorzuheben ist hier beispielsweise ein Verfahren von Fischer [2012] zur Erkennung von vereinzelten Konsumgütern oder Haushaltsgegenständen. Betrachtet werden sollen daher nur Verfahren zur Objektlageerkennung vorzugsweise aus Ladungsträgern oder ähnlichen Anordnungen.

Die überwiegende Anzahl der Verfahren basiert auf Tiefeninformationen, wobei die Summe einer Vielzahl von Tiefenmessungen als Punktewolke bezeichnet wird und keine oder höchstens ergänzende Farbinformationen nutzt. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Geometrie eines Objekts aus diesen Tiefendaten, im Vergleich zu Farb- und Grauwertaufnahmen, einfacher und genauer bestimmt werden kann [Verl2009].

Böhnke [2010] und Safronov [2009] analysieren, dass es noch keine universell einsetzbaren Verfahren zur Objektlageerkennung für industrielle Zuführsysteme gibt, sondern vielmehr eine Reihe von anwendungsspezifischen Speziallösungen. Stotz [2011] und Oh [2009] fokussieren sich in ihren Arbeiten auf die Lageerkennung einzelner geometrischen Primitiven, während Moeslund

[2007], Katsoulas [2004], Rahardja [1996] Ansätze zur Erkennung beliebiger Geometrien aufzeigen. Ledermann [2011] optimiert seinen Ansatz hinsichtlich von Werkstücksymmetrien. Bei vielen Verfahren kann durch die Parallelisierung von Berechnungen das Laufzeitverhalten verbessert werden [Skotheim2010]. Eine Auflistung von Verfahren, welche als funktionsfähige Demonstratoren umgesetzt wurden, kann Kaiser [2009] entnommen werden.

1.4 Ziel und Inhalt der Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Objektlageerkennung für automatisierte Zuführsysteme mit Robotern unter Berücksichtigung industrieller Randbedingungen vorgestellt und untersucht. Hierfür wird eine sechsdimensionale Hough-Abstimmung zur Evaluierung von Objektlagen eingesetzt. Zur Anwendung der Hough-Abstimmung wird der Suchraum durch die Einführung einer heuristischen Baumsuche möglichst stark reduziert. So kann der verbleibende Untersuchraum als Akkumulatorraum verwendet werden, um eine endliche Anzahl diskreter Lösungskandidaten zu überprüfen.

Im Sinne des vorgestellten Aufbaus von Objektlageerkennungsverfahren gliedert sich das Verfahren dieser Arbeit wie folgt:

Hypothesenbildung – Die Hypothesenbildung erfolgt durch kombinatorische Optimierung einer heuristischen Baumsuche. Bei dem hierfür verwendeten Suchbaum handelt es sich um einen Entscheidungsbaum, in dem die Werkstücklagen komponentenweise vorliegen. Um die Komponenten der Werkstücklage dann möglichst zielgerichtet zusammenzusetzen, wird als heuristische Baumsuche die Bestensuche angewendet.

Hypothesentest – Die Bestensuche generiert Lösungskandidaten, die abschließend mit Hilfe einer sechsdimensionalen Hough-Abstimmung bewertet werden können. Hierfür soll für jeden Messwert in den Eingangsdaten eine Stimmabgabe durchführt werden. Bezogen auf die vorgenommene Unterteilung des Hypothesentests, kann die Hough-Abstimmung am ehesten als dreidimensionaler Schablonenvergleich aufgefasst werden, da alle Messwerte der Werkstückoberfläche zur Gütebestimmung herangezogen werden.

Objektbeschreibung – Die Objektbeschreibung des Suchverfahrens ist im Wesentlichen beobachterzentriert, da der Abstimmungsprozess auf verschiedenen Werkstückansichten basiert. Die Werkstückansichten können unter Umständen aber auch fortlaufend von einem dreidimensionalen Werkstückmodell gewonnen werden, wodurch sich die Abgrenzung etwas relativiert.

Die Untersuchung des Verfahrens zur Objektlageerkennung umfasst drei Werkstückfamilien mit mehreren Untervarianten. Die Evaluierung des Verfahrens soll im industriellen Einsatz erfolgen. In diesem Zusammenhang wird die Leistungsfähigkeit von insgesamt zehn tatsächlich realisierten, automatisierten Zuführsystemen im Dreischichtbetrieb betrachtet. Die Zieleigenschaften des Verfahrens sollen nicht nur die Leistungsfähigkeit während des Einsatzes, sondern auch die Inbetriebnahme umfassen. Für die Inbetriebnahme sind Aufwände zur Parametrierung, insbesondere bei Werkstückwechseln, von großer Bedeutung. Weiterhin werden das Spannungsfeld zwischen der Erkennungsgeschwindigkeit, -verlässlichkeit und -rate betrachtet und Wege zur Konfiguration aufgezeigt. Grundlage des Verfahrens sollen durch Tiefenmessung gewonnene Punktewolken darstellen, da diese eine günstige Ausgangssituation für die Objektlagererkennung versprechen. Der Aufbau der Arbeit wird in den folgenden Absätzen näher beschrieben.

Kapitel 2 widmet sich den für diese Arbeit relevanten Grundlagen von Zuführsystemen und der Objektlageerkennung. Zunächst wird ein Überblick über die verschiedenen Arten von Zuführsystemen und hierfür verwendeten Robotern geboten. Hierzu gehören auch die Möglichkeiten zur Szenenerfassung mit berührungslosen 3D-Entfernungsmessverfahren am Markt erhältlicher Sensoren. Anschließend folgt ein Überblick zur Modellbildung der Werkstücke über Werkstückdefinitionen sowie zu relevanten Themen aus der Bildverarbeitung wie interessanten Punkten und der Hough-Transformation. Abschließend wird allgemein auf den Themenkomplex der heuristischen Suchverfahren eingegangen.

In Kapitel 3 wird der Suchraum des vorgestellten Verfahrens definiert. Hierfür werden vereinzelt Teilmodule des Zuführsystems näher betrachtet und entsprechende Anforderungen aufgezeigt. Durch Parametrisierung und Diskretisierung des Lösungsraums wird eine endliche Suchmenge gebildet. Die Suchmenge wird analysiert und in einem Entscheidungsbaum strukturiert, bei dem die Lösungen komponentenweise vorliegen. Hierfür werden die möglichen Werkstücklagen in zwei Komponenten zerlegt, der Lage eines interessanten Punkts und der Werkstücklage relativ zu diesem interessanten Punkt. Interessante Punkte stellen Oberflächenmerkmale dar, für die in dieser Arbeit lokale Extremwerte verwendet werden. Die optionale Erweiterung des Verfahrens durch Kaskadierung mehrerer Suchbäume dient zur potentiellen Verbesserung des Laufzeit- und Speicherverhaltens der Suche.

In Kapitel 4 wird die Suchstrategie dargelegt. Der Suchstrategie obliegt die Aufgabe, den Suchbaum möglichst schnell zu durchlaufen, um eine oder mehrere gültige Werkstücklagen zu erkennen. In einem ersten Schritt werden die interessanten Punkte evaluiert und die aussichtsreichsten Kandidaten weiterverfolgt. Anschließend wird eine Hough-Abstimmung durchgeführt, bei der die relative Position der Messwerte zu interessanten Punkten für die Stimmabgabe ausschlagge-

bend ist. Hierbei zeigt sich, dass die vorangegangene Strukturierung der Suchmenge äußerst günstige Voraussetzungen für die Anwendung einer sechsdimensionalen Hough-Abstimmung bietet, da nur noch die Werkstücklagen relativ zu interessanten Punkten zur Abstimmung stehen und somit der Akkumulatorraum in seinem Umfang stark eingeschränkt werden kann. Weiterhin werden die notwendige Architektur einer Entnahmeplanung und die Einbettung ins Gesamtsystem vorgestellt.

In Kapitel 5 folgt eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf mögliche Gegenstände weiterer Forschungsarbeiten.

1.5 Anmerkungen zur Schreibweise

Alle verwendeten Formelzeichen wurden auf Seite VII aufgeführt. Bei ihrer ersten Benutzung erfolgt eine Erläuterung. Allgemeine Konventionen sind dem Folgenden zu entnehmen.

Für homogene Koordinatentransformationen zur Beschreibung eines Betrachtungssystems relativ zu einem Bezugssystem wird die folgende Schreibweise verwendet:

$$ {}^{Bezugssystem}_{Betrachtungssystem,Index}T $$

Die Verwendung eines Index ist optional und wird immer dann vorgenommen, wenn mehrere Koordinatensysteme des gleichen Typs betrachtet und unterschieden werden sollen. Falls die adressierten Systeme aus dem Kontext heraus ersichtlich sind, kann eine Kennzeichnung weggelassen werden.

Mengen homogener Transformationen werden mit dem kalligraphischen Großbuchstaben $\mathcal{M}$ bezeichnet. Die Schreibweise dieser Mengen sowie anderer Variablen wie Ortsvektoren oder Rotationsmatrizen erfolgt analog zur Schreibweise der homogenen Koordinatentransformationen.

Eine diskretisierte homogene Koordinatentransformation wird durch Hinzufügen eines Daches gekennzeichnet. Diskretisierte Koordinatentransformationen können durch ganzzahlige Indizes eindeutig beschrieben werden. Die Indizes werden in Skriptschrift ausgedrückt und stellen eine diskrete Koordinatentransformation dar.

Eine exemplarische Darstellung dieser Festlegungen kann Tabelle 1-2 entnommen werden.

Bezeichnung	Kontinuierliche Darstellung	Diskrete Darstellung	Indizierte Darstellung
Homogene Koordinatentransformation	T	$\hat{T}$	$\mathcal{T}$
Position	t	$\hat{t}$	$\mathcal{t}$
Orientierung	r	$\hat{r}$	$\mathcal{r}$

Tabelle 1-2 Konventionen zur Unterscheidung verschiedener Darstellungen typischer Variablen.

Das Verfahren zur Objektlageerkennung dient in dieser Arbeit zur Lokalisierung von Werkstücken, weshalb an vielen Stellen der Begriff Werkstück dem Begriff Objekt vorgezogen wird.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird der für diese Arbeit relevante Stand der Technik vorgestellt. So werden verschiedene Arten von Zuführsystemen in Abschnitt 2.1 aufgeführt. Abschnitt 2.2 liefert einen kurzen Überblick zu gängigen Industrierobotern. Möglichkeiten zur 3D-Datenerfassung mit am Markt erhältlichen Sensorsystemen werden in Abschnitt 2.3 beschrieben. Die Modellbildung der Werkstücke über eine Werkstückdefinition wird in Abschnitt 2.4 aufgeführt. Die relevanten Themen aus der Bildverarbeitung, wie interessante Punkte und die Hough-Transformation, folgen in Abschnitt 2.5 und 2.6. Abschließend wird in Abschnitt 2.7 allgemein auf heuristische Suchverfahren eingegangen.

2.1 Zuführsysteme

Industrielle Zuführsysteme stellen einen wichtigen Schlüsselfaktor bei der Automatisierung der Schnittstellen zwischen zwei Fertigungsschritten dar. Generell sollte ein einmal erreichter Ordnungszustand von Werkstücken nicht mehr aufgegeben werden [Warnecke1986], trotzdem ist es ein weit verbreitetes Vorgehen, die Werkstücke nach einem Fertigungsschritt mehr oder weniger chaotisch in einem Ladungsträger zwischenzulagern. Die Ladungsträger werden dann zum nächsten Fertigungsschritt transportiert. Für kürzere Strecken innerhalb eines Betriebs wird der Transport typischerweise zumindest in Teilen von Gabelhubwagen und zunehmend auch von Routenzügen [Köber2012] durchgeführt. Bei längerer Entfernung kommt für den Transport der Güterverkehr zum Einsatz. Sowohl bei der Lagerung als auch beim Transport können die Werkstücke ihren Ordnungszustand teilweise oder vollständig verlieren und werden dem Zuführsystem dann chaotisch angeliefert. Durch die Zuführung und teilweise auch durch die angegliederte Bereitstellung wird der Ordnungszustand der Werkstücke schließlich wiederhergestellt.

Eine Alternative zum Einsatz von Kisten als Ladungsträger sind Werkstückträgersysteme, bei denen der Ordnungszustand über den Materialfluss hinweg annähernd konstant hoch bleibt. Aufgrund ihrer Inflexibilität und der schlechteren Volumenausnutzung ist ihr Einsatz allerdings außerhalb von Großserien oft unwirtschaftlich, weshalb Werkstückträgersysteme hier keine weitere Betrachtung finden sollen.

Eine Übersicht zur Veränderung des Ordnungszustands zwischen zwei Fertigungsschritten kann Abbildung 2-1 entnommen werden.

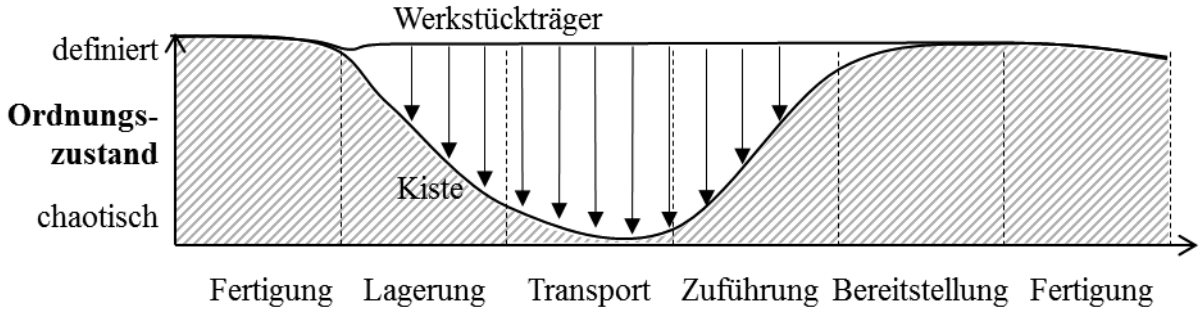

Abbildung 2-1 Qualitative Darstellung der Veränderung des Ordnungszustands von Werkstücken zwischen zwei Fertigungsschritten. Gegenübergestellt ist die Veränderung des Ordnungszustands beim Einsatz von Werkstückträgern und Kisten.

Die Zuführsysteme können in vier Kategorien eingeteilt werden (siehe Abbildung 2-2), welche in den folgenden Abschnitten eine nähere Erläuterung finden.

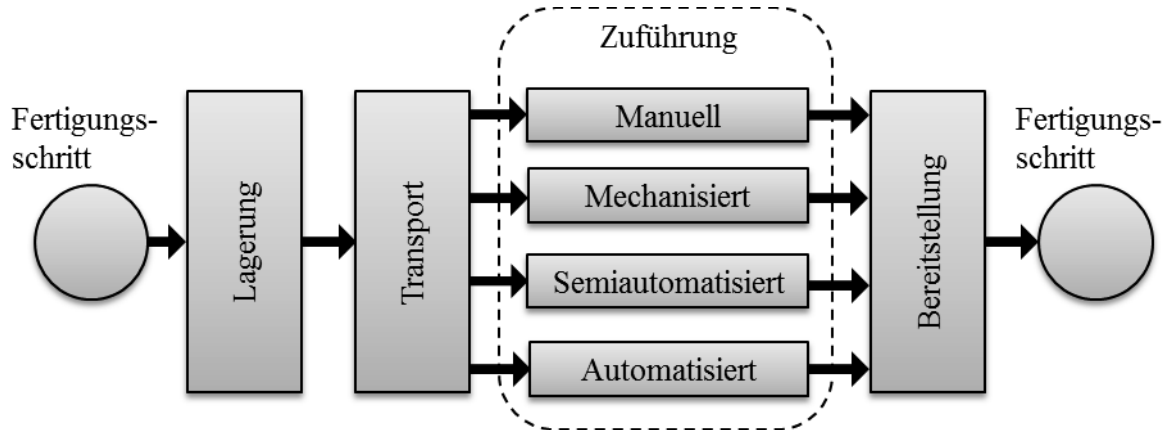

Abbildung 2-2 Materialfluss zwischen zwei Fertigungsschritten mit verschiedenen Arten von Zuführsystemen.

2.1.1 Manuelle Zuführung

Die Zuführung zu den Fertigungsschritten erfolgt heutzutage nach wie vor überwiegend manuell. Die als Schüttgut angelieferten Werkstücke werden von einem Arbeiter in der Regel mit den Händen in eine definierte Position gebracht. Die Positionierung erfolgt entweder direkt auf der Zielposition, beispielsweise einer Werkzeugform einer Bearbeitungsmaschine, oder zunächst auf einem Bereitstellungspuffer (auch Übergabespeicher). Ein Bereitstellungspuffer ermöglicht dann die Entkopplung der Zuführung vom Arbeitstakt der Maschinen, wodurch mehrere Maschinen gleichzeitig bestückt und die Arbeitszeiten flexibler eingeteilt werden können. Nach Abschluss eines Fertigungsschritts verlieren die Werkstücke oft erneut ihren Ordnungszustand und werden wieder in Ladungsträgern zwischen gelagert.

Durch die manuelle Zuführung können einerseits Störungen und Fehler frühzeitig erkannt werden, andererseits besteht durch menschliches Versagen eine zusätzliche Störquelle. Sieht man von Niedriglohnländern ab, stellen außerdem die dabei entstehenden Personalkosten einen nicht unerheblichen Anteil an den Stückkosten dar. Darüber hinaus ist die Arbeit zur manuellen Zuführung monoton und unter Umständen körperlich belastend. Durch zunehmend verschärfte Arbeitsschutzbestimmungen in der Europäischen Union wird es zukünftig erschwert, unergonomische Tätigkeiten von Menschen durchführen zu lassen, was den bereits beschriebenen Automatisierungsdruck in der Intralogistik zusätzlich erhöht.

2.1.2 Mechanisierte Zuführung

Die mechanisierte Vereinzelung und Zuführung von Werkstücken arbeitet zwar autonom, wird aber in diesem Zusammenhang nicht als automatisiertes Zuführsystem betrachtet. Bei der mechanisierten Zuführung werden die Werkstücke aus einem Werkstück- bzw. Bauteilbunker über ein Fördersystem, meist über Führungsschienen, geleitet. Die Werkstücke durchlaufen eine mechanische Sortiervorrichtung, welche die Werkstücke in eine definierte Lage bringt oder nur diejenigen Werkstücke einer definierten Lage durchlässt. Für diesen zweiten Fall folgt, dass die Förderleistung sehr hoch gegenüber dem Anlagetakt sein muss, da der größte Teil der geförderten Werkstücke zurück in den Werkstückbunker fällt. Nach Durchlaufen der Sortiervorrichtung weisen alle Werkstücke eine definierte Position und Orientierung auf.

Beispiele für mechanisierte Zuführsysteme sind Vibrationswendelförderer (Rütteltöpfe) und Stufenförderer (Plattenhubförderer). Diese Systeme zeichnen sich oft dadurch aus, dass Taktzeiten von weit unter 2 Sekunden erreichbar sind, welche durch eine manuelle Zuführung dauerhaft kaum zu erzielen sind. Dies trifft insbesondere für verhältnismäßig kleine Werkstücke bzw. Bauteile wie Schrauben, Stifte und Muttern zu. Das Nachfüllen des Werkstückbunkers gestaltet sich darüber hinaus als leicht, da die Teile einfach hineingeschüttet werden können. Bei Werkstücken mit einer Größe von mehreren Dezimetern steigt allerdings der Platzbedarf einer Zuführung und durch die permanent in Bewegung gehaltenen Werkstücke ist der auftretende Verschleiß an der Zuführungseinrichtung nicht unerheblich.

In diesem Zusammenhang ist das Werkstückgewicht ein ebenfalls wichtiger Einflussfaktor. Gerade in Vibrationswendelförderern entsteht bei einem Werkstückgewicht von mehreren Kilogramm eine bedeutende Lärmbelastung. Nach eigener Erhebung (siehe Abbildung 2-3) sollen fast 90% der Anlagen Werkstücke handhaben, die ein Gewicht von einem Kilogramm überschreiten. Hierdurch entfällt die Einsatzmöglichkeit von mechanisierten Zuführsystemen, da in der Regel eine Geräuschbelastung von maximal 75-78 Dezibel gestattet ist.

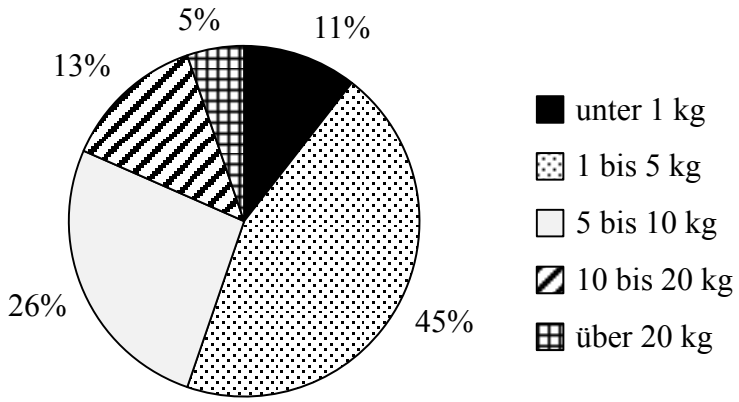

Abbildung 2-3 Gewicht von Werkstücken zur Handhabung mit Zuführsystemen. Eigene Erhebung basierend auf 38 Kundenanfragen im Zeitraum von Anfang 2010 bis Mitte 2012.

Ein grundsätzlicher Nachteil bei mechanisierten Zuführsystemen besteht in der geringen Flexibilität gegenüber Werkstückänderungen. In den meisten Fällen müssen dann größere Anpassungen am Führungs- und Sortiersystem getroffen werden. Verlässliche Aussagen über die Prozesssicherheit können erst nach erfolgter Umstellung getätigt werden.

2.1.3 Semi-automatisierte Zuführung

Einen Zwischenschritt zur vollautomatisierten Zuführung stellt die semi-automatisierte Zuführung dar. Hierbei werden die als Schüttgut vorliegenden Werkstücke manuell entnommen und dann vorpositioniert. Zur Vorpositionierung dienen Sonderladungsträger, beispielweise können die Werkstücke auf Stangen aufgereiht oder auf werkstückträger-ähnlichen Ablagen eingelegt werden. Derartig vorpositionierte Werkstücke besitzen weniger Freiheitsgrade als im Schüttgut. Die notwendige Lokalisierung kann somit oft durch 2D-Erkennung durchgeführt werden. In der Regel reichen die Erkennung der Höhenlage und die Bestimmung eines rotatorischen Freiheitsgrades zur vollständigen Lokalisierung aus.

Die semi-automatisierte Zuführung besitzt den Vorteil, dass die manuelle Entnahme nicht in unmittelbarer Nähe zur Maschine durchgeführt werden muss. Vielmehr kann es sogar möglich sein, von einer zentralen Position aus mit einer Arbeitskraft mehrere Maschinen zu versorgen. Es bleibt allerdings bei den körperlichen Belastungen des Werkers durch die manuelle Entnahme und den anderen aufgeführten Nachteilen (siehe Abschnitt 2.1.1). Weiterhin ist im Vergleich zur manuellen oder mechanisierten Zuführung der zusammengerechnete Platzbedarf oft höher und die Materialflusskette komplexer.

2.1.4 Automatisierte Zuführung

Bei den auch als *Griff-in-die-Kiste* bezeichneten Systemen erfolgt die Zuführung mit Werkstücken vollautomatisch ohne manuelle Unterstützung. Die Vorteile von vollautomatisierten Zuführsystemen sind vielseitig. Sie ermöglichen die Einsparungen von Personalkosten, haben eine geringere Lärmemission und können flexibel auf verschiedene Werkstücke umgerüstet werden. Gemäß einer Klassifikation nach Generationen, die den Fokus auf die Entnahmestrategie legt, gehören automatisierte Zuführsysteme zur vierten Generation von Robotersystemen, bei der die Objektidentifikation mittels aktiver Wahrnehmung vorgenommen wird [Müller2001]. Die theoretische Möglichkeit für ein blindes Greifen der Handhabungskinematik soll in diesem Zusammenhang nicht näher betrachtet werden, denn in der Regel ist die Gefahr für Beschädigungen der Handhabungskinematik oder der Werkstücke zu hoch.

Es befinden sich aktuell wenige komplett automatisierte Zuführsysteme auf Basis von Industrieroboter oder vergleichbaren Handhabungskinematiken im Einsatz. Meistens können die bereits in der Produktion befindlichen Anlagen ausschließlich Werkstücke mit regelgeometrischen oder rotationssymmetrischen Grundformen handhaben. Automatisierte Zuführsysteme, bei denen Freiform-Werkstücke mit beliebigem Ordnungszustand verwendet werden können, existieren nicht oder sind seltene Einzelfälle. Ursache hierfür können die begrenzten Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten von klein- und mittelständischen Unternehmen sein, die sich zurzeit überwiegend auf dem Markt der automatisierten Zuführsysteme befinden.

Einen Sonderfall des Griff-in-die-Kiste stellt der Griff-vom-Band dar: Hierbei handelt es sich aus Sicht der Objektlageerkennung um keine grundlegend verschiedene Aufgabenstellung, sofern die Werkstücke gehäuft und nicht flach oder vereinzelt auf dem Förderband vorliegen. Lediglich für die Handhabungskinematik stellt der Griff-vom-Band eine geringfügige Vereinfachung gegenüber dem Griff-in-die-Kiste dar, da die Zugänglichkeit für einen Roboter nicht durch die Seitenwände eines Ladungsträgers erschwert wird.

Komponenten automatisierter Zuführsysteme

Es wurden sechs Teilsysteme identifiziert, mit denen ein automatisierter Zuführprozess mit Robotern im Allgemeinen schematisch dargestellt werden kann (siehe Abbildung 2-4).

- Den Systemeingang bildet die **Werkstückbereitstellung**, zu der der Ladungsträger und die Ladungsträgerzuführung gehören.

- Der Systemausgang soll als die **Werkstückübergabe** definiert sein. Die Werkstückübergabe beinhaltet eine Werkstückaufnahme und in der Regel einen Werkstückpuffer, der Schwankungen im Anlagentakt ausgleichen kann.
- Die Handhabungseinrichtung wird durch einen **Industrieroboter** mit Endeffektor, einem **Greifsystem**, dargestellt.
- Das **Sensorsystem** dient zum Erfassen der Szene bzw. des Ladungsträgerinhalts.
- Die **Entnahmeplanung** stellt dem Roboter alle notwendigen Verfahrbewegungen von einem Übergabepunkt, in der Regel oberhalb des Ladungsträgers, hin zu einem Werkstück und zurück zum Übergabepunkt zur Verfügung.
- Die **Ablaufsteuerung** koordiniert die einzelnen Komponenten des Zuführsystems. Über eine Schnittstelle zu einer übergeordneten Fertigungssteuerung oder einem angeschlossenen Bedienplatz kann ein externer Zugriff auf die Anlage vorgenommen werden. Auftretende Störungen des Zuführsystems sollen in Form von Fehlermeldungen über die Ablaufsteuerung kommuniziert werden.

Die notwendigen Hardwarekomponenten und deren Anschaffungskosten sind grundsätzlich für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit eine wichtige Kenngröße und somit eine bedeutsame Entscheidungsgröße bei der Entwicklung einer Objektlageerkennung. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Hersteller und tagesabhängiger Preise wird jedoch darauf verzichtet, die Kosten explizit für jede Komponente zu erwähnen und hierauf näher einzugehen.

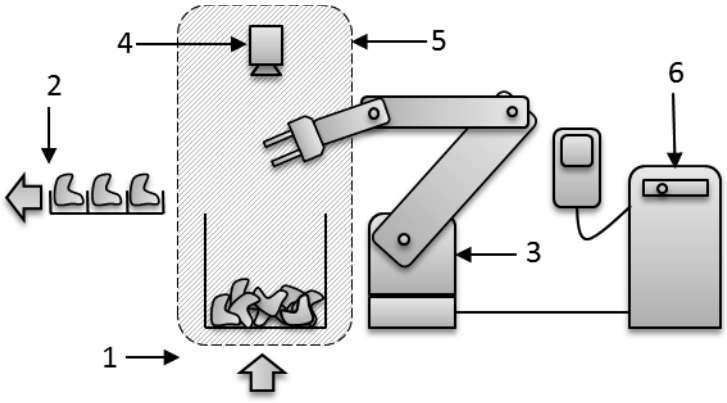

Abbildung 2-4 Systemaufbau eines automatisierten Zuführsystems mit Roboter. Aufgeführt sind die Werkstückbereitstellung (1), die Werkstückübergabe (2), der Industrieroboter mit Greifsystem (3), die Sensorik (4), die Entnahmeplanung (5) und die Ablaufsteuerung (6).

2.2 Industrieroboter

Für die betrachteten Handhabungskinematiken kommen im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Roboter in Betracht. Nach ISO 8373 ist ein Roboter ein programmierbarer Manipulator mit drei oder mehr Achsen für industrielle Anwendungen. Im Bereich der automatisierten Zuführsysteme besteht die Aufgabe des Roboters in der Bewegung der Werkstücke mithilfe eines Greifsystems aus der Kiste zum Bereitstellungspuffer. Bei der Auswahl eines hierfür geeigneten Roboters ist zu berücksichtigen, dass sich alle anzufahrenden Stationen innerhalb des Arbeitsraums befinden. Die Bestimmung dieser Wegpunkte ist nicht trivial, da nur die Verfahrbewegungen zum Ablegen eingelernt sind und alle Verfahrbewegungen innerhalb der Kiste vor jeder Entnahme neu berechnet werden.

Des Weiteren ist die Greifgenauigkeit in hohem Maße von der Positioniergenauigkeit der Handhabungskinematik abhängig. Sowohl die Absolutgenauigkeit als auch die Wiederholgenauigkeit sind hierbei von entscheidender Wichtigkeit für den reibungslosen Greifprozess. Um auch schwer zugängliche Positionen innerhalb des Ladungsträgers erreichen zu können, sollte die Handhabungskinematik zudem möglichst viele Freiheitsgrade besitzen. Um die Zugänglichkeit zu beliebigen Werkstücken beliebiger Lage zu gewährleisten, werden mindestens sechs Freiheitsgrade benötigt. Die Handhabungskinematik muss in jeder Raumdimension verfahrbar sein und um jede vorhandene Achse eine rotatorische Drehung ermöglichen [Czichos2006]. In der Praxis zeigt sich allerdings, dass häufig sogar mehr Freiheitsgrade erforderlich sind, da sich die Handhabungskinematik um Störkonturen, wie Werkstücke, Ladungsträger oder Anlagenbestandteile, herum bewegen muss. Die notwendige Flexibilität durch zusätzliche Freiheitsgrade kann alternativ oder ergänzend auch durch das Greifsystem ermöglicht werden, wobei insbesondere dann dessen Kompaktheit und Baugröße wichtige Eigenschaften darstellen.

Um auch taktzeitkritische Aufgabenstellungen lösen zu können, sind die Verfahrgeschwindigkeit und -beschleunigung ebenfalls wichtige Kenngrößen bei der Auswahl eines geeigneten Roboters. Da das Werkstückspektrum sich im Gewicht stark unterscheiden kann, muss ferner eine entsprechende Traglast gewährleistet werden. Die effektive Traglast reduziert sich durch das Gewicht des Greifsystems und durch das des Sensorsystems, sofern dieses am Roboter montiert wird.

Eine Darstellung über die verbreitetsten Hersteller, deren Roboter für automatisierte Zuführsysteme angewendet werden können, findet sich in Abbildung 2-5. Es ist erkennbar, dass Automatisierer eine Vielzahl verschiedener Hersteller im Portfolio aufweisen. Eine mögliche Begründung hierfür ist, dass unabhängig von der tatsächlichen anwendungsspezifischen Eignung eines Robo-

ters, von Auftraggeberseite unter Umständen die Verwendung eines bestimmten Roboterherstellers vorgegeben wird, um die notwendigen Wartungs- und Serviceleistungen zu erleichtern.

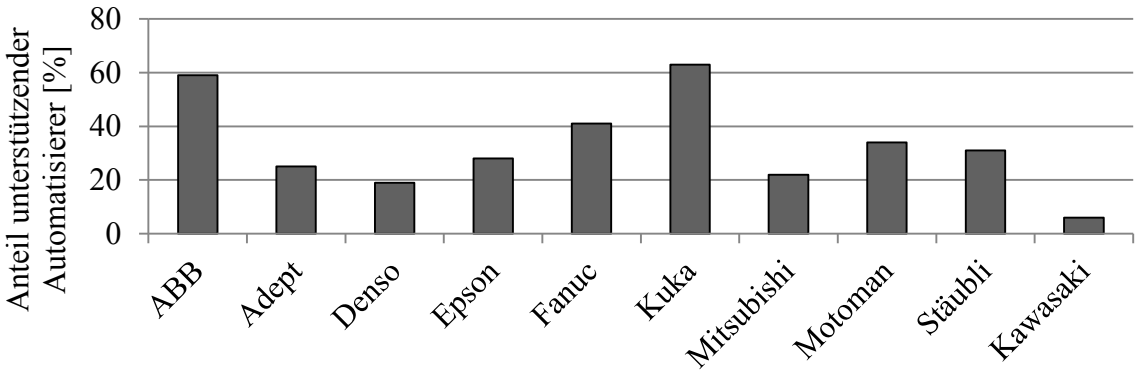

Abbildung 2-5 Hersteller von Industrierobotern und ihr Anteil bei Automatisierern bzw. Systemintegratoren, welche deren Fabrikate unterstützen. Eigene Darstellung nach Hofmann [2011].

2.2.1 Serielle Industrieroboter

Serielle Industrieroboter verfügen typischerweise über vier bis sechs Bewegungsachsen, die von jeweils einem Aktuator rotatorisch oder translatorisch bewegt werden können. Sie gehören zu den am häufigsten eingesetzten Handhabungskinematiken für automatisierte Zuführsysteme [Hofmann2011], wobei Sechs-Achs-Roboter die stärkste Verbreitung haben. Die Wiederholgenauigkeit von Industrierobotern liegt zwischen 0,05 mm und 0,2 mm [Wenz2008]. Die Absolutgenauigkeit wird von vielen Herstellern nicht angegeben, ist aber deutlich schlechter als die Wiederholgenauigkeit. Obgleich die Dynamik dieser Kinematiken durch den seriellen Aufbau limitiert ist [Pott2007], gibt es nur wenige Industrieroboter, welche als sicher eingestuft werden, sodass auf eine trennende Schutzeinrichtung in der Regel nicht verzichtet werden kann.

Abbildung 2-6 Serielle Industrieroboter. Von links nach rechts: Knickarmroboter mit sechs Achsen, SCARA-Roboter mit vier Achsen, Portalroboter mit vier Achsen.

Neben den typischen Sechs- bzw. Vier-Achs-Robotern kommen auch häufig kartesische Kinematiken wie Portale und Linearachsen zum Einsatz. Exemplare serieller Industrieroboter können der Abbildung 2-6 entnommen werden.

2.2.2 Parallelkinematiken

Bei einem parallelen Roboter ist der Endeffektor mit mehr als einer kinematischen Kette verbunden. Diese Parallelkinematiken zeichnen sich durch sehr hohe Verfahrgeschwindigkeiten und -beschleunigungen aus. In *Pick-and-Place* Anwendungen können hiermit Taktzeiten von weit unter einer Sekunde erreicht werden. Die eingeschränkten Drehwinkelbereiche des Endeffektors erschweren allerdings einen Einsatz für automatisierte Zuführsysteme. Hinzu kommt eine erhöhte Kollisionsgefahr der kinematischen Ketten mit den Seitenwänden des Ladungsträgers. Zusätzlich übersteigt bei Stabkinematiken das Volumen des Ladungsträgers oft die im Vergleich zu seriellen Kinematiken geringe Arbeitsraumgröße. Beispiele paralleler Kinematiken können der Abbildung 2-7 entnommen werden.

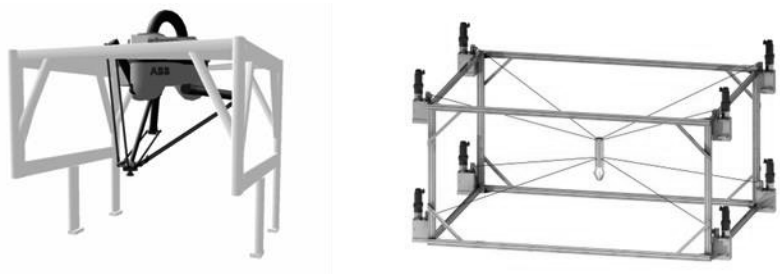

Abbildung 2-7 Parallelkinematiken. Stabkinematik (links) und Seilroboter (rechts).

2.2.3 Greifsystem des Roboters

Das Greifsystem stellt den Endeffektor der verwendeten Roboter im automatisierten Zuführprozess dar. Die Auswahl des Greifsystems richtet sich nach der Geometrie und Materialeigenschaft des Werkstücks, der Übergabesituation und dem folgenden Fertigungsschritt. Prinzipiell kann zwischen formschlüssigen, kraftschlüssigen und stoffschlüssigen Greifprinzipien unterschieden werden [Hesse2011], wobei letztere für automatisierte Zuführsysteme kaum von Interesse sind. Die Kraftschlüsse können durch Reib-, Unterdruck- und Magnetkräfte realisiert werden. Der Formschluss kommt durch Formelemente und Oberflächenverhakungen zustande. Die dabei auftretende Haltekraft muss ausreichen, um einerseits das Werkstück aus dem Schüttgut herauszuziehen und andererseits bei maximaler Verfahrgeschwindigkeit des Roboters das Werkstück lagegenau zu handhaben.

Häufig bei automatisierten Zuführsystemen vorzufindende Greifsysteme sind die mechanischen Greifer und die Flächengreifer. Zu den mechanischen Greifern zählen die Zwei- oder Drei-Fingergreifer, die eine hohe Haltekraft erzeugen und eine Zentrierung der Werkstücke beim Greifen vornehmen können. Die Flächengreifer, hauptsächlich Magnet- und Sauggreifer, eignen sich für ebene oder leicht gekrümmte Werkstückoberflächen, bieten eine hohe Flexibilität in Bezug auf mögliche Greifpunkte, bergen aber die Gefahr von Genauigkeitseinbußen des Griffs bei hohen Beschleunigungskräften während des Transports. Prinzipiell ebenfalls verwendbare Universalgreifer wie die Universalgreiferhand von Schunk [Siciliano2009] befinden sich noch im Entwicklungsstadium.

Da es bei der Entnahme der Werkstücke aus der Kiste auch zu Kollisionen kommen kann, sollte das Greifsystem eine entsprechende Robustheit aufweisen, um im Dauerbetrieb zu bestehen. Ferner muss berücksichtigt werden, dass das Gewicht des Greifsystems die effektive Traglast der Handhabungskinematiken reduziert. Außerdem muss die Baugröße entsprechend kompakt ausgelegt sein, um möglichst viele Punkte im Ladungsträger anfahren zu können. Selbst bei geringer Baugröße empfiehlt sich die Verwendung von Zusatzachsen im Greifsystem (siehe Abbildung 2-8). Hierdurch können auch schwer erreichbare Werkstücke gegriffen werden.

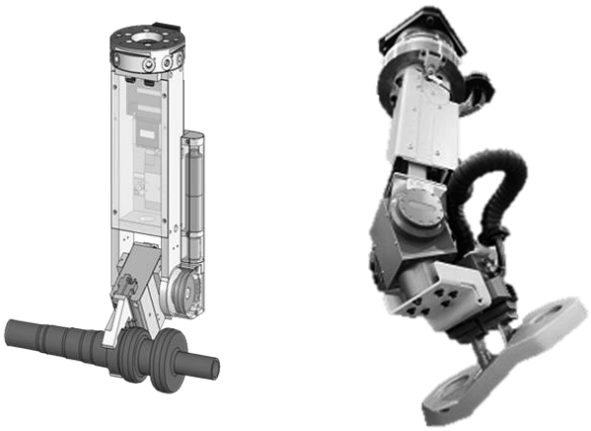

Abbildung 2-8 Mechanische Greifsysteme mit Zusatzachsen. Links: Zeichnung eines Zwei-Fingergreifers für Getriebewellen mit einer zusätzlichen Achse, dessen Entwicklung am Fraunhofer IPA erfolgte. Rechts: Zwei-Fingergreifer für Kettenglieder mit zwei Zusatzachsen [Liebherr2012].

Durch die entstehenden Ungenauigkeiten bei der Werkstücklokalisierung, der Positioniergenauigkeit des Roboters und der Hand-Auge-Kalibrierung muss die Greifgenauigkeit möglichst große Abweichungen tolerieren können. Zur Vermeidung von Leerlaufzeiten sollte eine Greiferfolgskontrolle über eine entsprechende Sensorik am Greifer realisiert werden.

2.3 Generierung von 3D-Sensordaten

Zur Erfassung des Ladungsträgerinhalts sollen durch optische Sensoren gewonnene Tiefeninformationen verwendet werden. Die Auswahl einer geeigneten Sensorik richtet sich nach folgenden Kriterien:

- Das *Messvolumen* ist abhängig von der Größe des Ladungsträgers und sollte nach Möglichkeit ausreichen, um den vollständigen Innenraum mit einer Aufnahme zu erfassen.
- Die *Auflösung* muss ausreichen, um die Werkstücke hinlänglich genau abzubilden. Die Herstellerangaben unterscheiden zwischen lateraler Auflösung und Höhenauflösung, welche sich beide für die bei der Erkennung sichtbaren Werkstückstrukturen eignen müssen. Die laterale Auflösung bezieht sich auf die Bildebene, während die Höhenauflösung orthogonal zur Bildebene verstanden wird.
- Da in Fertigungs- und Produktionsumgebungen unterschiedlichste Verhältnisse herrschen, muss auch *Robustheit* gegenüber extremen Temperaturen und Störeinflüssen, wie Fremdlicht oder Reflexionen, gewährleistet sein.
- Je nach Montagekonzept spielen schließlich auch die *Bauform, -größe* und das *Gewicht* eine wichtige Rolle, insbesondere wenn der Sensor am Roboter oder einer externen Kinematik angebracht werden soll.

Die Abbildung 2-9 zeigt am Markt verfügbare 3D-Sensoren für verschiedene Entfernungsmessverfahren. Für jedes der im folgenden Abschnitt vorgestellten Messprinzipien wurde exemplarisch ein Gerät aufgeführt. Die größten Schwierigkeiten der betrachteten Systeme treten bei der Erfassung stark absorbierender, spiegelnder oder durchsichtiger Materialien auf [Ledermann2011].

Abbildung 2-9 3D-Sensoren. Von links nach rechts: Lichtlaufzeitmesssensor mit Pulslaufzeitmessung Mesa SwissRanger SR4000, aktiver Lasertriangulationssensor Leuze LPS36, Lichtlaufzeitmesssensor mit Phasenmessung Sick LMS400, Stereoskopischer Triangulationssensor Point Grey Digiclops.

2.3.1 Berührungslose 3D-Entfernungsmessverfahren

Im Folgenden werden die für automatisierte Zuführsysteme verbreitetsten Verfahren zur Generierung von Tiefeninformationen einschließlich ihrer Vor- und Nachteile vorgestellt. Abbildung 2-10 kann eine Übersicht der Verfahren und ihrer Verbreitung unter automatisierten Zuführsystemen entnommen werden.

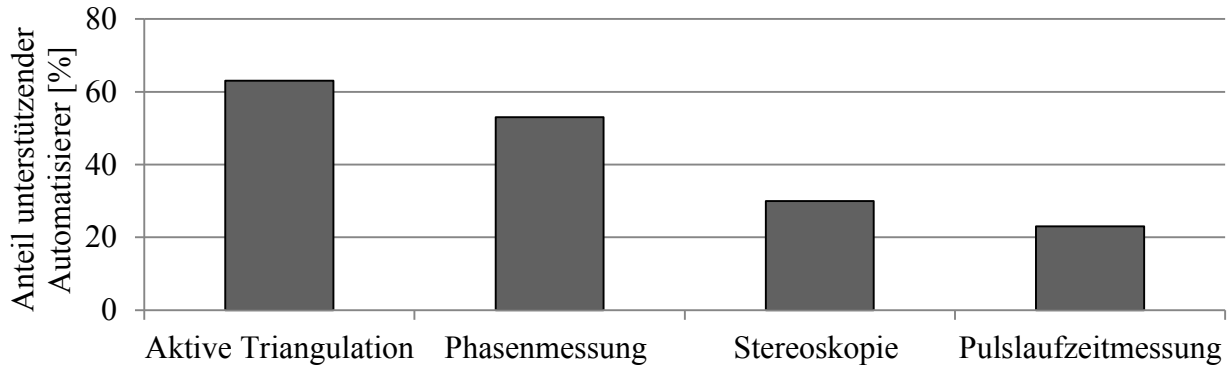

Abbildung 2-10 Typische 3D-Entfernungsmessverfahren und ihr Anteil bei Automatisierern bzw. Systemintegratoren, welche diese Technologien unterstützen. Eigene Darstellung nach Hofmann [2011].

Die Phasenmessung und die Pulslaufzeitmessung werden gemeinsam zur Lichtlaufzeitmessung gezählt. Zu den triangulationsbasierten Tiefenmessungen gehören die aktive Triangulation und die Stereoskopie. Die aufgeführten Verfahren eignen sich unterschiedlich gut für spezifische Anwendungsfälle, wobei die Werkstückgröße und Oberflächenbeschaffenheit, aber auch äußere Einflüsse wie Fremdlicht, Rost und Verschmutzungen zu berücksichtigen sind.

Lichtlaufzeitmessung

Das Grundprinzip der Lichtlaufzeitmessung ist die Messung der Zeitdifferenz zwischen dem Emittieren und Empfangen eines Lichtimpulses. Durch die koaxiale Anordnung der Beleuchtungs- und Aufnahmeeinheit ist das abschattungsfreie Erfassen der Szene möglich. Die Lichtlaufzeitmessung unterteilt sich in die *Phasenmessung* und die *Pulslaufzeitmessung*.

Bei der Pulslaufzeitmessung berechnet sich der gemessene Abstand über die Zeit, welche das Licht zum Messobjekt hin und zurück benötigt. Die Pulslaufzeitmessung eignet sich aufgrund der hohen optischen Leistung eines Laserimpulses zur Vermessung größerer Entfernungen.

Bei der Phasenmessung wird der Abstand über die Phasenverschiebung eines modulierten Laserstrahls bestimmt. Die Lichtquelle wird hierbei nicht gepulst, sondern permanent betrieben. Auf-

grund der geringen Intensität des reflektierten Lichtes eignet sich das Verfahren der periodischen Modulation für eher geringere Entfernungen bis zu 10 Metern [Bauer2007]. Ein Spezialfall der periodischen Modulation ist die Interferometrie, hier kann der begrenzte Tiefenbereich von einer halben Wellenlänge durch Mehrwellenlängen-Interferometrie vergrößert werden [Jähne2005].

Triangulationsbasierte Tiefenmessung

Optische Triangulationssensoren werden in automatisierten Zuführsystemen am häufigsten eingesetzt [Hofmann2011] und weisen meist eine höhere Messgenauigkeit sowie ein geringeres Messvolumen gegenüber den Sensoren mit Lichtlaufzeitmessung auf. Die triangulationsbasierte Tiefenmessung beinhaltet Verfahren mit *aktiver Triangulation* und *Stereoskopie*.

Die Anordnung bei der aktiven Triangulation besteht aus einer Kamera und einer Lichtquelle. Die Tiefenrekonstruktion kann über die Identifizierung der Beleuchtungsrichtung der Pixel vorgenommen werden [Jähne2005]. Ein grundsätzliches Problem der Triangulationsverfahren stellen die auftretenden Abschattungen dar. Dies gilt auch für das passive Verfahren der Stereoskopie.

Die Stereoskopie verwendet Stereobilder, um räumliche Informationen zu erhalten und stellt einen Spezialfall der optischen Triangulation dar. Ein Stereobildverarbeitungssystem besteht aus zwei, typischerweise identischen, Flächenkameras, welche partiell dieselbe Szene aufnehmen [Dal2012]. Es ist grundsätzlich immer möglich, einen solchen Aufbau unter Verwendung der epipolaren Geometrie zueinander auszurichten und zu kalibrieren [Szeliski2012]. Werden zwei korrespondierende Bildpunkte in den Kameraaufnahmen ausgemacht, so kann hieraus eine Tiefeninformation gewonnen werden. Durch die Verwendung von Flächenkameras sind die am Markt verfügbaren Systeme vergleichsweise günstig und in der Lage, sehr schnell Tiefeninformationen zu generieren.

Ein grundsätzliches Problem der Stereobildverarbeitung stellt allerdings das Korrespondenzproblem insbesondere bei homogenen Oberflächen dar [Vincze2008]. Auch Fremdlichteinflüsse und Abschattungen können die Qualität der gewonnenen Tiefeninformationen reduzieren. Weitere Ansätze der triangulationsbasierten Tiefenmessung, wie der Tiefenmessung über Fokussierung, Streifenlichtprojektion und konfokaler Mikroskopie finden weniger Anwendung und werden daher hier nicht näher betrachtet.

2.3.2 Kinematiken zur Bewegung von Entfernungsmesssystemen

Viele optische Entfernungsmesssysteme, mit Ausnahmen der Pulslaufzeitmess- und Stereobildverarbeitungssysteme, sind Linienprofilsensoren, d.h. sie erfassen die Umgebung entlang einer Ebene und erzeugen somit keine direkte Volumeninformation. Um das gesamte Volumen des Ladungsträgerinhalts aufnehmen zu können, müssen Linienprofilsensoren mit einer Kinematik während des Messvorgangs entlang einer Trajektorie bewegt werden. Die anschließend notwendige Bildregistrierung bezeichnet den Prozess, die an verschiedenen Messpositionen aufgenommenen Tiefeninformationen in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren [Bauer2007].

Die Linienprofilsensoren können entlang einer geraden Strecke mit einem Linearmodul oder kreisförmig mit einer Schwenkeinheit bewegt werden. Abbildung 2-11 zeigt exemplarisch zwei hierfür verwendbare Industriekomponenten. Es bleibt zu berücksichtigen, dass je nach Trajektorie des Sensors verschiedene Abschattungen in der Szene bzw. in der resultierenden Punktewolke entstehen.

Abbildung 2-11 Kinematiken zur Bewegung von Entfernungsmesssystemen. Links eine Schwenkeinheit der Firma Schunk und rechts ein Linearmodul mit Rexroth Antriebssystem.

Alternativ besteht die Möglichkeit, den verwendeten Sensor am Roboter zu montieren und beliebige Verfahrbewegungen ausführen zu lassen. Die Montage am Roboter verhindert allerdings die Nebenläufigkeit der Sensormessung, die eine Reduktion der möglichen Taktzeit erlauben würde. Einen Vorteil der robotergeführten Sensorik dagegen stellt die Möglichkeit dar, Entnahmen aus verschiedenen Ladungsträgern mit nur einer Sensorik durchführen zu können und somit den nutzbaren Arbeitsraum des Roboters zu vergrößern. Abbildung 2-12 zeigt eine Übersicht zur Häufigkeit der robotergeführten Sensorik im Vergleich zur stationären Verwendung. Eine Kombination aus beiden Möglichkeiten ist ebenfalls vorzufinden.

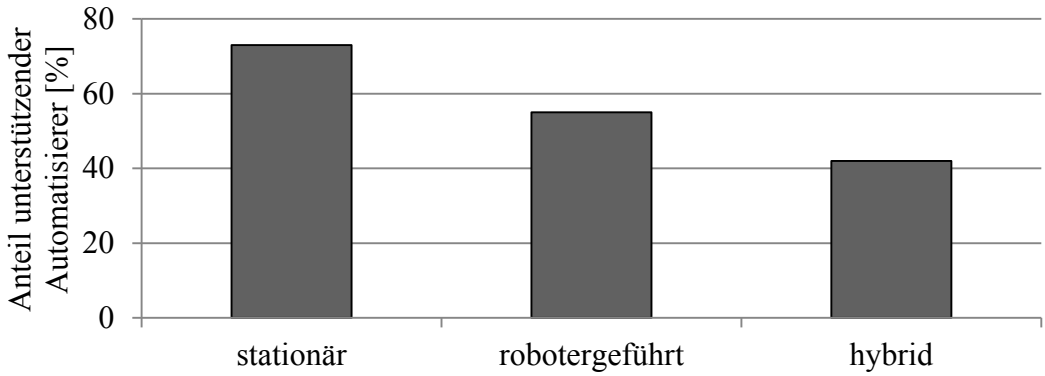

Abbildung 2-12 Montage der Sensorik und ihr Anteil bei Automatisierern bzw. Systemintegratoren, welche diese Möglichkeiten unterstützen. Eigene Darstellung nach Hofmann [2011].

2.4 Werkstückdefinition

Eine Voraussetzung zur Durchführung einer Objektlageerkennung ist die Definition des Werkstücks. Die Werkstückdefinition dient zur Beschreibung der für die Objektlageerkennung relevanten Werkstückgeometrie. Weitere Werkstückeigenschaften wie Farbinformationen oder Materialeigenschaften können mit den betrachteten Sensormesssystemen in der Regel nicht erfasst werden, weshalb sie in der Werkstückdefinition nicht berücksichtigt werden müssen. Zur Werkstückdefinition bieten sich verschiedene Möglichkeiten, von denen drei im Folgenden näher betrachtet werden.

2.4.1 Referenzaufnahmen

Liegen von Werkstücken keine technischen Dokumentationen vor, können Werkstücke über Referenzaufnahmen definiert werden. Dies kann der Fall sein, wenn der Erstellungsaufwand oder die Wartung technischer Dokumentationen insbesondere bei einem großen Teilespektrum nicht möglich sind. Zur Erstellung von Referenzaufnahmen wird ein Muster-Werkstück benötigt, welches mit einem Sensorsystem eingemessen wird. Das Werkstück wird in einer bekannten Lage exakt ausgerichtet und dann vom Sensorsystem erfasst. Zur lagegenauen Einstellung des Werkstücks empfiehlt sich die Verwendung einer Drehvorrichtung. Der Vorgang wiederholt sich für alle zur vollständigen Beschreibung erforderlichen Orientierungen und Positionen des Werkstücks. Abhängig von der Werkstückgeometrie müssen unter Umständen sehr viele Aufnahmen erzeugt werden, weshalb dieses Verfahren oft nicht praktikabel ist und daher nicht näher betrachtet werden soll.

2.4.2 Regelgeometrische Grundformen

Wenn das Werkstück aus regelgeometrischen Elementen zusammengesetzt ist oder für die Erkennung ausschließlich einfache Grundformen wie Zylinder, Ebenen und Löcher ausreichen, kann die Werkstückdefinition über eine analytische Beschreibung erfolgen (siehe Abbildung 2-13). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass sich die geometrischen Grundformen nicht auf beliebige Werkstückgeometrien anwenden lassen, da diese nicht zwangsläufig mit vertretbarem Aufwand analytisch beschrieben werden können. Der Vorteil dieser Werkstückdefinition besteht in dem sehr geringen Speicherplatzverbrauch gegenüber Referenzaufnahmen, da die komplette Geometrie in der Praxis mit weniger als 20 Elementen [Stotz2011] und deren relativer Anordnung zueinander beschrieben werden kann.

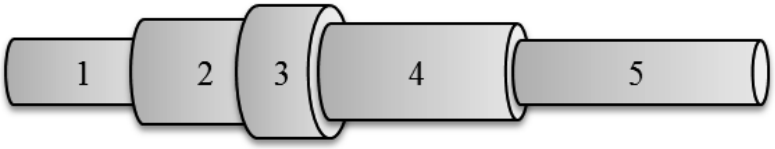

Abbildung 2-13 Regelgeometrische Grundformen zur Definition eines Getriebewellenrohlings. Zu jedem der fünf nummerierten Zylinder müssen lediglich die Höhe, der Durchmesser und die Verschiebung auf der Rotationsachse zur vollständigen Geometriebeschreibung hinterlegt werden.

2.4.3 Flächenmodell

Das digitale Flächenmodell enthält alle Informationen zur Werkstückgeometrie und -größe relativ zu einem Bezugskoordinatensystem und liegt typischerweise in Form eines CAD-Modells vor. Zur Vermeidung von Kompatibilitätsproblemen empfiehlt sich die Verwendung eines verbreiteten Austauschformats, wie dem STL- oder VRML-Format. Mit beiden Standards kann die dreidimensionale Werkstückoberfläche anhand von Dreiecken beschrieben werden. Jedes dieser Dreiecke (auch Facette) wird durch drei Eckpunkte und eine Oberflächennormale beschrieben. Per Definition sind alle dem Betrachter bzw. dem Sensor abgewandten Dreiecksflächen nicht sichtbar. Unter Berücksichtigung der Sensorauflösung können auf diese Weise auch Freiformflächen mit hinreichender Genauigkeit approximiert werden.

Die Werkstückdefinition mit Hilfe eines Flächenmodells hat gegenüber Referenzaufnahmen und regelgeometrischen Grundformen insofern keine Nachteile, als dass sich hierdurch in der Praxis keine Einschränkungen hinsichtlich der darstellbaren Geometrien ergeben. Die Datenspeicherung ist wie bei den regelgeometrischen Grundformen sehr effizient möglich. Grundsätzlich können Referenzaufnahmen und regelgeometrische Grundformen auch in Flächenmodelle über-

führt werden, weshalb in dieser Arbeit ausschließlich die Werkstückdefinition über Flächenmodelle weitere Betrachtung findet.

Abbildung 2-14 Flächenmodelle verwendeter Werkstücke. Von links nach rechts: Kettenglied, Lenkradskelett und Kontaktblech.

2.5 Interessante Punkte

Als interessante Punkte werden in der Bildverarbeitung markante Stellen in den Eingangsdaten bezeichnet, welche sich innerhalb ihrer lokalen Nachbarschaft hervorheben und Informationen über mindestens eine Kenngröße beinhalten. Interessante Punkte können als Merkmale verstanden werden und dienen der nachgelagerten Interpretation von Eingangsdaten. Wahrnehmungstheorien lassen die Annahmen zu, dass auch der Mensch seine Aufmerksamkeit bei der visuellen Erkennung verstärkt auf interessante Punkte legt [Lindberg1994]. Interessante Punkte sind seit langer Zeit ein häufig genutztes Konzept zur 2D-Bildverarbeitung, deren Prinzipien in der Regel auf die 3D-Bildverarbeitung übertragen werden können [Lowe2004, Viksten2008].

In der Fachliteratur finden sich verschiedene Interest-Operatoren zur Extraktion von interessanten Punkten. In zahlreichen Fällen erfolgt für die Bestimmung von interessanten Punkten eine mehrfache Skalierung der Eingangsdaten, wobei nach jeder Skalierung der Interest-Operator auf den Eingangsdaten erneut ausgeführt wird. Anschließend werden entweder alle gefundenen interessanten Punkte verwendet oder nur diejenigen interessanten Punkte, welche in allen Skalierungsebenen aufgetreten sind [Castellani2008].

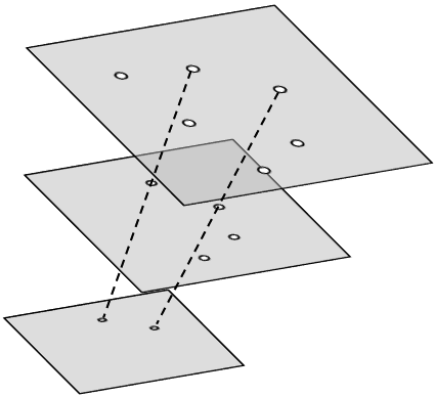

Abbildung 2-15 Interessante Punkte in verschiedenen Skalierungsebenen. Interessante Punkte sind mit einem weißen Punkt gekennzeichnet. Die gestrichelten Linien zeigen interessante Punkte, welche in jeder Ebene erkannt wurden.

Ein häufig verwendeter und mehrfach weiterentwickelter Ansatz ist der **Interest-Operator** von Moravec [1977] bzw. Harris [1997] zur Erkennung von Kanten und Ecken. Dieser findet Extremalstellen in den Eingangsdaten basierend auf einem Strukturtensor, der über eine Gradientfunktion erhalten wird [Aanaes2012]. Ein ähnlicher Interest-Operator kann auch durch Verwendung der Hesse-Matrix, einem Analogon zur zweiten Ableitung einer Funktion, anstelle des Strukturtensors erhalten werden [Yu2011]. Glomb [2009] stellt allerdings fest, dass aufgrund der arbiträren Topologie der Tiefenmessungen die Bestimmung der Gradienten uneindeutig ist.

Eine weitere Methode zur Kantendektion ist die **Gaußsche Differenzbildung** (engl.: Difference of Gaussians), welche im Rahmen der SIFT-Merkmale [Lowe2004] angewendet wird und auf den dreidimensionalen Anwendungsfall von Flitton [2010] übertragen wurde. Die Berechnung erfolgt über die Subtraktion zweier verschieden skalierter und mit der Gauß-Funktion geglätteter Volumen [Yu2011] und dient auch zur Approximation des Marr-Hildreth-Operators [Marr1980]. Durch die alternative Verwendung von Mittelwertfiltern bei den SURF-Merkmalen [Bay2008], welche ebenfalls auf drei Dimensionen erweitert wurde [Knopp2010], kann dieser Ansatz weiter variiert werden.

Abschließend sei noch der Ansatz der maximal stabilen Volumen (MSVs) von Donoser [2006] genannt, welcher eine Erweiterung auf den dreidimensionalen Anwendungsfall der maximal stabilen Extremalregionen (MSER) von Matas [2002] darstellt. Hierbei wird Stabilität durch eine homogene Intensitätsverteilung innerhalb eines Volumens und eine ausgeprägte Abgrenzung der Intensitätsverteilung gegenüber dem Rand des Volumens definiert. Vorausgesetzt wird allerdings das Vorhandensein von Intensitätswerten. Die Eingangsdaten werden iterativ mit verändertem Schwellwert in ein Binärbild überführt, in welchem eine Bestimmung zusammenhängender

Gebiete stattfindet. Diejenigen Gebiete, die die geringsten Änderungen unter verschiedenen Schwellwerten aufzeigen, werden als maximal stabil gekennzeichnet.

2.6 Hough-Transformation

Die **Standard Hough-Transformation** lässt sich auf eine Patentschrift von Hough [1962] zurückführen und wurde ursprünglich zur Erkennung von analytischen Kurven, wie Geraden, in zweidimensionalen Bildern entwickelt [Hart2009]. Die Grundidee besteht in der Bildung eines Akkumulatorraums, in dem die Parameter der Kurven als Punkte dargestellt werden können. Während eines Abstimmungsprozesses werden auf lokaler Ebene Richtungsinformationen verwendet, um Hypothesen von Kurvenparametern zu bilden und diese im Akkumulatorraum zu vermerken. Dies führt dazu, dass alle kollinearen Geradenstücke in den Eingangsdaten auf einen Punkt im Akkumulatorraum fallen. Lokale Maxima im Akkumulatorraum entsprechen dann den wahrscheinlichsten Geraden in den Eingangsdaten (siehe Abbildung 2-16). Neben dem Abstimmungsprozess ist auch die Komplexität des Akkumulatorraums ein wichtiger Aspekt bei der Anwendung der Standard Hough-Transformation, insbesondere beim Auffinden lokaler Maxima. Je größer der Akkumulatorraum ist, desto aufwändiger ist das Finden eines lokalen Maximums, insbesondere bei einer großen statistischen Streuung der Hypothesen von Kurvenparametern.

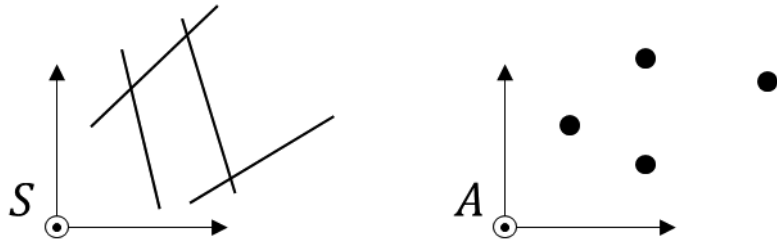

Abbildung 2-16 Standard Hough-Transformation zur Erkennung von Geraden in den Sensordaten S, die im Akkumulatorraum A als Punkte hervortreten.

Die **Generalisierte Hough-Transformation** stellt eine Erweiterung der Standard Hough-Transformation dar, mit dem Ziel auch beliebige Formen erkennen zu können [Ballard1981]. Der Zusammenhang zwischen lokalen Merkmalen in den Eingangsdaten und den daraus resultierenden Hypothesen im Akkumulatorraum wird hierbei nicht analytisch, sondern über eine Tabelle gebildet. In dieser Abstimmungstabelle sind für alle Merkmale entsprechende Punkte im Akkumulatorraum vermerkt, die bei einem Vorkommen des Merkmals erhöht werden. Ein Merkmal in den Eingangsdaten erhöht demnach die bedingte Wahrscheinlichkeit einer oder mehrerer Objektlagen. Durch eine Auswertung des Akkumulatorraums nach erfolgter Abstimmung möglichst vieler Merkmale, können dann Rückschlüsse auf entsprechende Objektlagen gezogen werden.

Zentrales Problem der Generalisierten Hough-Transformation bei der Implementierung bleiben die Gestaltung und Auswertung des in der Regel hochdimensionalen Akkumulatorraums bzw. der Abstimmungstabelle und die Abbildung aller Zusammenhänge zwischen Merkmalen in den Sensordaten und daraus resultierenden Objektlagenhypothesen im Akkumulatorraum, insbesondere für beliebige Objektgeometrien.

In der Fachliteratur werden Verfahren, die Prinzipien der Hough-Transformation nutzen, auch als abstimmungsbasierte Verfahren bezeichnet, weshalb im Folgenden der Begriff Hough-Abstimmung für die Generalisierte Hough-Transformation verwendet werden soll.

2.7 Heuristische Suchverfahren

Ein Suchverfahren beschreibt einen Algorithmus, der innerhalb eines Suchraums nach Elementen mit bestimmten Eigenschaften sucht. Der Teilbereich der heuristischen Suchverfahren beschreibt dabei Techniken, die die durchschnittliche Leistung von solchen Problemlösungsverfahren verbessern [Rothlauf2011]. Eine Verbesserung muss allerdings nicht notwendigerweise in jedem Fall eintreten.

2.7.1 Optimierungsverfahren

Optimierungsverfahren werden gemäß der Einteilung von Objektlageerkennungsverfahren in Abschnitt 1.3 zur Hypothesenbildung verwendet. Optimierungsverfahren können in zwei verschiedene Typen unterschieden werden: Kombinatorische und kontinuierliche Optimierung. Bei kombinatorischen Optimierungsverfahren bestehen die Entscheidungsvariablen aus diskreten Mengen und der Fokus liegt auf dem Auffinden einer optimalen oder suboptimalen Lösung. Bei der kontinuierlichen Optimierung hingegen werden die kontinuierlichen Werte der Entscheidungsvariablen iterativ optimiert.

Beim allgemeinen Planungsvorgang zur Lösung eines Optimierungsproblems können folgende vier Schritte hervorgehoben werden: Zunächst wird das Problem erkannt und im Anschluss definiert. Die Lösung des Problems wird dann als Tupel von Variablen ausgedrückt, welche Entscheidungsvariablen genannt werden. Diese Entscheidungsvariablen werden anschließend im Rahmen der Konstruktion des Suchmodells festgelegt. Der Suchraum folgt dann implizit aus der Festlegung der Entscheidungsvariablen. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist die Metrik zur Bestimmung von Ähnlichkeiten zwischen zwei Suchraumelementen, worüber Nachbarschaftsbeziehungen der Elemente abgeleitet werden.

Zur Lösung des Modells kommen Suchalgorithmen zum Einsatz, wobei sich eine Lösung durch einen minimalen bzw. maximalen Evaluationswert auszeichnet. Der Evaluationswert wird durch den Hypothesentest abgebildet, welcher in seiner Ausführungsform keiner notwendigen Abhängigkeit zur Hypothesenbildung unterliegt. Für die Hypothesenbildung gilt, je höher die Leistungsfähigkeit eines Algorithmus sein soll, desto stärker sollte die problemspezifische Adaption ausfallen [Rothlauf2011].

Ein Sonderfall der kombinatorischen Optimierung stellen konstruktive Suchverfahren dar. Konstruktive Suchverfahren bauen eine Lösung, bestehend aus mehreren Entscheidungsvariablen, schrittweise auf. In jedem Lösungsschritt wird demnach eine Entscheidungsvariable der Gesamtlösung hinzugefügt. Diese Konstruktionsheuristiken stoppen, sobald eine vollständige Lösung gefunden wurde. Dieses Verhalten unterscheidet sich grundsätzlich von den Verbesserungsheuristiken, welche mit einer vollständigen Lösung beginnen und diese zu verbessern versuchen.

2.7.2 Baumstrukturen

Sofern der Suchraum endlich ist, kann er in Form eines Graphen dargestellt werden. Der Graph besteht aus über Kanten verbundenen Knoten, wobei jeder Knoten eine potentielle Lösung bzw. einen Lösungskandidaten repräsentiert. Die Kanten zwischen den Knoten stellen die Beziehungen der Knoten untereinander dar. Der dazugehörige Abstand zweier Knoten wird über die ganzzahlige Hamming-Distanz angeben, wobei die direkte Verbindung über eine Kante mit einem Abstand von Eins gekennzeichnet ist. Formalisiert besteht ein Graph aus einer Menge möglicher Lösungen und einer Menge verbindender Kanten zwischen den Knoten.

Bei einem verbundenen Graphen kann jeder Knoten von einem beliebigen Knoten aus erreicht werden. Gibt es für jede Verbindung zwischen zwei Knoten genau eine Möglichkeit, spricht man von einem Baum. Ein Baum enthält also keine Kreise und auf n Knoten entfallen exakt n-1 Kanten. Zu jedem Baum wird eine Wurzel definiert, die den Anfangsknoten bezeichnet. Die direkt mit der Wurzel verbundenen Knoten entsprechen der ersten Ebene des Baums. Anders ausgedrückt, ist ein Baum ein gerichteter kreisfreier Graph mit genau einer Wurzel.

Die Wurzel ist der Ursprung des Baums und kennzeichnet in der Regel den Startpunkt der Suche. Durch den Eingangsgrad bzw. Ausgangsgrad eines Baumknotens wird die Anzahl an Verbindungen mit höheren bzw. niedrigeren Ebenen angegeben. Da die Wurzel keine Verbindungen mit höheren Ebenen besitzt, hat sie einen Eingangsgrad von Null. Die Enden des Baums werden als Blätter bezeichnet und haben somit den Ausgangsgrad Null.

Eine besondere Form der Baumstruktur sind Entscheidungsbäume. Entscheidungsbäume bilden eine Untergruppe der Bäume und werden dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Entscheidungsvariablen einer Lösung iterativ festgelegt werden. Entscheidungsbäume eignen sich somit ideal zur Verwendung mit konstruktiven Suchverfahren. Ein Knoten enthält demnach keine komplette Lösung, sondern spezifiziert einen Parameter der Gesamtlösung. Bei der Wurzel sind alle Entscheidungsvariablen noch undefiniert und werden dann sukzessive in jeder Baumebene zur Lösung hinzugefügt [Rothlauf2011].

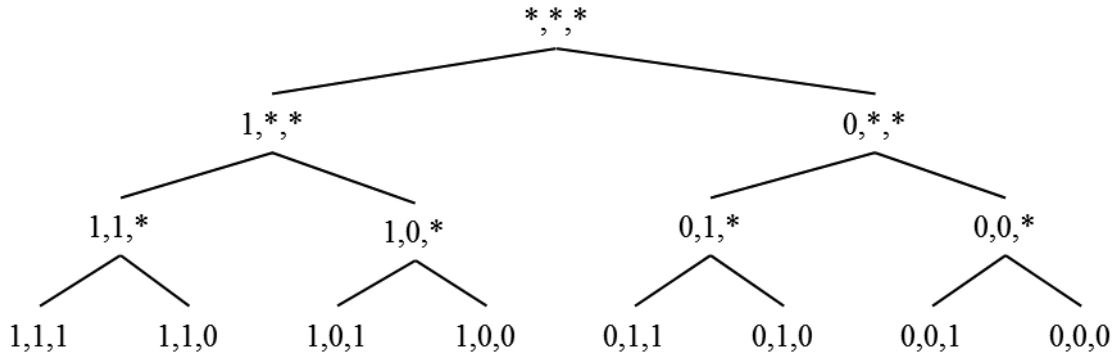

Abbildung 2-17 Entscheidungsbaum mit binären Entscheidungsvariablen. Eigene Darstellung nach Rothlauf [2011]. Die Entscheidungsvariablen können Werte von Null oder Eins annehmen. Noch nicht zugewiesene Variablen sind mit einem Asterisk gekennzeichnet. Ganz oben befindet sich die Baumwurzel.

2.7.3 Informierte und uninformierte Baumsuchverfahren

Die Strategien zur Durchsuchung eines Baums lassen sich grundsätzlich durch die Reihenfolge unterscheiden, in der die Baumknoten durchsucht werden. In allen Fällen kann die Suche als beendet gelten, wenn ein oder mehrere Knoten die gesuchte Lösung aufweisen. Die Baumsuche kann in informierte und uninformierte Verfahren unterteilt werden [Rothlauf2011]. Baumsuchverfahren werden immer dann als uninformiert bezeichnet, wenn kein problemspezifisches Wissen zur Lösungsfindung verwendet wird. Im Umkehrschluss gelten für informierte Suchverfahren, dass problemspezifisches Vorwissen vorhanden ist und ausgenutzt wird.

Uninformierte Suchverfahren

Verbreitete uninformierte Suchverfahren sind die Tiefensuche, Breitensuche und uniforme Kostensuche:

- Die *Tiefensuche* expandiert immer denjenigen Knoten, der sich in der untersten Ebene der bereits expandierten Knoten befindet. Bei einer Baumtiefe d und einer durchschnittli-

chen Anzahl von expandierten Knoten b ergibt sich eine Zeit- und Platzkomplexität von $O(b^d)$.

- Die *Breitensuche* expandiert zuerst alle Knoten einer Baumebene, bevor die darunterliegenden Ebenen betrachtet werden. Die Zeitkomplexität ist ebenfalls $O(b^d)$, während die Platzkomplexität lediglich $O(bd)$ beträgt. Bei einem Entscheidungsbaum, dessen Lösung erst in der untersten Ebene gefunden werden kann, ist eine Breitensuche insofern nicht effizient, da stets der komplette Baum expandiert werden müsste.
- Die *uniforme Kostensuche* weist jedem Knoten einen Kostenwert zu und expandiert die Knoten entlang dem Weg der minimalen Kosten. Die Kosten werden hier oft den Kanten zugeordnet und die Kosten eines Knotens entsprechen dann den summierten Kosten für den Weg vom Knoten zur Wurzel. Die Zeit- und Platzkomplexitäten der uniformen Kostensuche entsprechen denen der Tiefensuche.

Informierte Suchverfahren

Informierte Suchverfahren verwenden eine Evaluierungsfunktion h, welche die Baumsuche steuert. Diese Evaluierungsfunktion nutzt hierbei problemspezifisches Wissen, um die anfallenden Kosten zwischen einem Knoten und dem Zielknoten zu messen oder zu schätzen. Zwei Beispiele für informierte Suchverfahren stellen die Bestensuche und die A* Suche dar.

Die Bestensuche expandiert immer denjenigen Knoten, der die niedrigste Bewertung durch die Evaluierungsfunktion erhalten hat. Die Knoten werden hierfür in einer Vorrangwarteschlange entsprechend ihrer Bewertung sortiert. Per Definition soll eine Bewertung durch die Evaluierungsfunktion von Null den Zielzustand kennzeichnen. Wird durch die Bestensuche immer die minimale Distanz zum Ziel geschätzt, spricht man auch von einer gierigen Suche [Rothlauf2011]. Die Zeit- und Platzkomplexität der Bestensuche hängt von der Exaktheit der Evaluierungsfunktion ab. Im besten Fall wird eine Lösung nach genau d Schritten gefunden.

Die A* Suche kombiniert die Bestensuche und die uniforme Kostensuche. Die Kosten eines Knotens setzen sich hierbei aus der Summe einer Evaluierungsfunktion und der uniformen Kosten des Knotens zusammen [Rothlauf2011].

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Bestensuche verwendet, für die im folgenden Kapitel der Suchbaum bzw. Entscheidungsbaum gebildet werden soll.

3 Suchraum der Objektlageerkennung

In diesem Kapitel erfolgt die Einführung des Suchraums der Objektlageerkennung, der durch einen Entscheidungsbaum repräsentiert wird. In Abschnitt 3.1 wird der zunächst unendlich große Suchraum zu einer endlichen Suchmenge vereinfacht. In Abschnitt 3.2 werden die Elemente der Suchmenge in einem Entscheidungsbaum strukturiert. Durch eine systematische Auswahl von Elementen kann die Suchmenge in Abschnitt 3.3 zusätzlich reduziert werden. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 3.4 diskutiert.

3.1 Bildung einer Suchmenge

Voraussetzung für die Formulierung der Objektlageerkennung als kombinatorisches Optimierungsproblem ist das Vorhandensein einer endlichen Suchmenge, die alle Werkstücklagen in einem festgelegten Bezugssystem beschreibt. Einführend soll in Abschnitt 3.1.1 zunächst der Suchbereich näher betrachtet werden, der die Festlegung der relevanten Bezugssysteme in Abschnitt 3.1.2 vorbereitet. Anschließend wird die mathematische Beschreibung einer Lage in Abschnitt 3.1.3 definiert. Die zunächst kontinuierliche Darstellung des Suchraums muss schließlich diskretisiert und beschränkt werden, um eine endliche Lösungsmenge zu erhalten (vgl. Abschnitt 3.1.4 und 3.1.5). Die abschließende Betrachtung der Metrik und Nachbarschaftsbeziehungen einzelner Elemente der Lösungsmenge sowie die resultierende Komplexität dienen zur Vorbereitung der Strukturierung in einem Entscheidungsbaum (vgl. Abschnitt 3.1.6 und 3.1.7).

3.1.1 Suchbereich

Der Suchbereich soll ganz allgemein das Gebiet innerhalb des automatisierten Zuführsystems beschreiben, in dem die Objektlageerkennung durchgeführt wird. Nach Möglichkeit sollten sich im Suchbereich nur die zu lokalisierenden Werkstücke und keine etwaigen Störkonturen befinden. Daher wird im Folgenden die Werkstückbereitstellung näher betrachtet und diskutiert, mit dem Ziel, einen möglichst kleinen und mathematisch leicht beschreibbaren Suchbereich mit bekannter Position und Orientierung zu identifizieren.

Die Werkstückbereitstellung beschreibt die Art der Anlieferung der Werkstücke. Für dieses Teilsystem des automatisierten Zuführsystems müssen die Randbedingungen der Produktionsabläufe berücksichtigt werden, da die verwendeten Ladungsträger durch die in der Regel bereits bestehenden (intra-)logistischen Prozesse vorgegeben sind. In Fertigungsanlagen befinden sich oft

zigtausende von Ladungsträgern im Umlauf, deren Austausch oder das Umfüllen in andere Ladungsträger hohe Zusatzkosten nach sich ziehen würden.

Ladungsträger

Die Form des Suchbereiches soll durch den verwendeten Ladungsträger bestimmt werden. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Ladungsträger die sich sowohl in ihrer Größe als auch Geometrie stark unterscheiden. Aus Abbildung 3-1 geht hervor, dass die meisten Werkstücke in Metallbehältern gelagert werden, obgleich der Ladungsträgertyp stark variieren kann. Das Spektrum reicht von Gitterboxen, Paletten mit Holzaufsatzrahmen bis zu Kleinladungsträgern. Auch gibt es große Unterschiede in Größe und Ausführungsformen zwischen den einzelnen Ladungsträgertypen. Der Suchbereich der Objektlageerkennung muss demnach flexibel auf verschiedene Bereitstellungssituationen anpassbar sein.

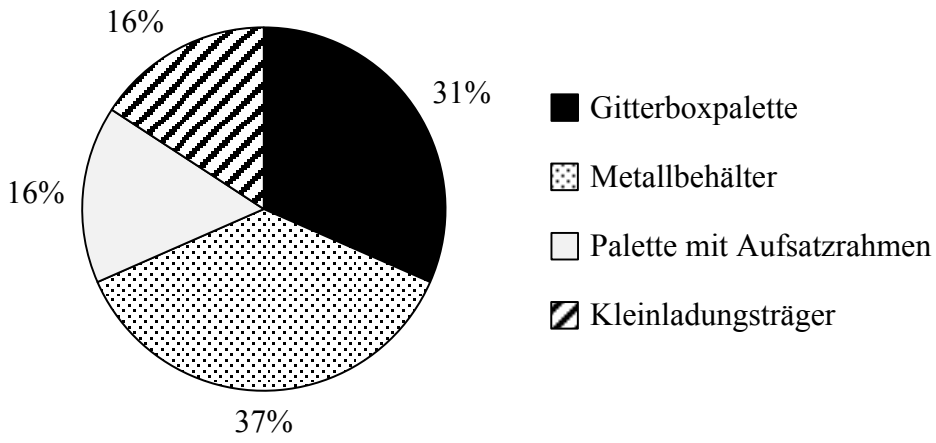

Abbildung 3-1 Arten von Ladungsträgern, in denen die Werkstücke bereitgestellt werden. Eigene Erhebung basierend auf 38 Kundenanfragen im Zeitraum von Anfang 2010 bis Mitte 2012.

Auch wenn ein automatisches Zuführsystem mit allen beliebigen Ladungsträgern umgehen können sollte, so soll doch angenommen werden können, dass die Beschreibung des Ladungsträgers mit einem einfachen Flächenmodell bzw. das Innenvolumen des Ladungsträgers mit einem Quader hinreichend genau approximiert werden kann und somit die Forderung nach einem mathematisch leicht beschreibbaren Suchbereich ermöglicht wird. Für diese Annahme empfehlen sich einige Eigenschaften des Ladungsträgers, die im Folgenden kurz aufgeführt werden. Sich hieraus ergebenden Vorteile, die über die Objektlageerkennung hinaus bestehen, werden ebenfalls kurz erwähnt:

- Für die Beschaffenheit des Innenraums empfehlen sich glatte Ausführungsformen. Gitterförmige Seitenwände oder Böden können zu einem Hineinrutschen der Werkstücke führen, sodass sich die Werkstücke mit dem Ladungsträger verhaken und zu einem komplexeren Suchbereich führen. Bei verhakten Werkstücken besteht weiterhin die Gefahr, dass diese aufgrund ihrer schlechteren Sichtbarkeit nicht erkannt werden. Ferner kann die Entnahme verhakter Werkstücke zu Beschädigungen am Greifsystem, den Werkstücken selbst oder dem Ladungsträger führen.
- Die Seitenwände des Ladungsträgers sollten möglichst niedrig sein, damit in der gesamten Tiefe des Suchbereichs Messwerte für die Objektlageerkennung vorliegen können. Angenommen wird hierbei, dass sich der Sensor bei der Szenenerfassung oberhalb des Ladungsträgers befindet, um Beschädigungen an der Sensorik zu vermeiden und dass der Sensor außerdem einen vergleichsweise geringen, maximalen Messabstand aufweist. Ein weiterer Vorteil niedriger Seitenwände besteht darüber hinaus in der verbesserten Zugänglichkeit für den Roboter. Hohe Seitenwände dagegen erfordern einen kompakten Endeffektor mit vielen Freiheitsgraden und erhöhen damit die Kosten und Komplexität des Greifsystems.
- Die Seitenwände des Ladungsträgers sollten weitestgehend unbeschädigt sein, damit auch hier eine klare Abgrenzung des Suchbereichs vorgenommen werden kann. Deformationen und wellige Seitenwände erschweren die Szenenerfassung durch die Sensorik. Durch mögliche Wandabschattungen wird das Sensorsichtfeld eingeschränkt und die Erkennung aller Werkstücke im Ladungsträger erschwert.

Ladungsträgerzuführung

Die Position und Orientierung des Suchbereiches ist abhängig von der Positioniergenauigkeit des Ladungsträgers. Maßgeblich hierfür ist die Ladungsträgerzuführung, die darüber hinaus auch die Taktzeitenkopplung des intralogistischen Transportprozesses bestimmt.

Es wurden zwei Typen von Ladungsträgerzuführungen identifiziert: die manuelle und die automatische Zuführung. Diese werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Position und Orientierung des Suchbereichs sowie anderer Teilsysteme der automatisierten Zuführungen näher beschrieben:

- Im einfachsten, nicht taktzeitentkoppelten Fall wird der Ladungsträger manuell ausgetauscht. Ein Werker entnimmt auf ein Signal der Zellensteuerung hin den geleerten Ladungsträger und ersetzt ihn durch einen vollen. Je nach Ladungsträgergröße und -gewicht kann dies per Hand oder über einen (Gabel-)Hubwagen geschehen. Um in der Praxis eine

hohe Positioniergenauigkeit gewährleisten zu können, empfiehlt sich die Verwendung mechanischer Führungen oder zentrierender Aufnahmen, wie mechanischen Endanschlägen. Es wird die Annahme getroffen, dass hierdurch eine Positioniergenauigkeit von wenigen Zentimetern bzw. Grad erreicht werden kann. Etwaige Aufnahmen können auch eine leichte Schrägstellung des Ladungsträgers bewirken, sodass in manchen Fällen die Zugänglichkeit gegenüber der Handhabungskinematik verbessert wird. Bei dieser manuellen Zuführung kann es zu Stillstandszeiten kommen, da nicht davon auszugehen ist, dass der Werker zu jeder Zeit unmittelbar auf die Aufforderung der Zellsteuerung zum Ladungsträgerwechsel reagieren kann.

- Automatische Ladungsträgerwechselsysteme mit angeschlossenem Vorratslager können beispielsweise durch auf dem Hallenboden verlaufende taktbare Förderbänder oder durch Palettiersysteme realisiert werden (siehe Abbildung 3-2). Die Positioniergenauigkeit der Ladungsträger ist durch automatische Ladungsträgerwechselsysteme im Allgemeinen höher als bei den manuellen Varianten, was auch bei der Auslegung des notwendigen Arbeitsraums des Roboters vorteilhaft ist. Es ist ferner anzumerken, dass durch den Einsatz fahrerloser Transportsysteme (FTS) ein automatisches Nachfüllen der Ladungsträgerwechselsysteme durchführbar wäre und in der Folge praktisch die gesamte Intralogistik automatisiert werden könnte.

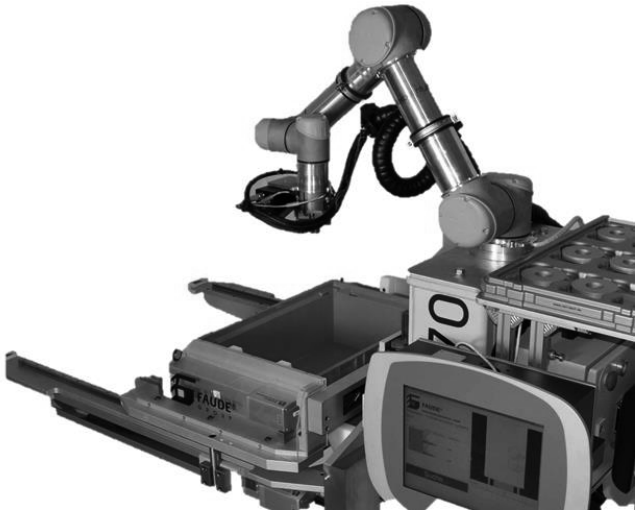

Abbildung 3-2 Automatische Ladungsträgerzuführung durch ein Handhabungssystem für Kleinladungsträger der Firma Faude Automatisierungstechnik GmbH. Zur Entnahme von Kontaktblechen wurde im Rahmen dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit der Firma Faude eine ähnliche Applikation mit Universal Roboter und Leuze Lichtschnittsensor realisiert.

In Bezug auf den Suchbereich der Objektlageerkennung kann festgehalten werden, dass es möglich ist, die Ladungsträger mit einer verhältnismäßig hohen Positioniergenauigkeit an einem bekannten Ort bereitzustellen und somit den Suchbereich präzise zu verorten. Falls die Positioniergenauigkeit, insbesondere bei der manuellen Zuführung, nicht ausreichend sein sollte, kann eine Ladungsträger-Lageerkennung durchgeführt werden, wozu sich in Abschnitt 4.6.6 nähere Informationen finden lassen. In der Folge sind Position, Orientierung und Form des Suchbereiches zu Beginn der Werkstück-Lageerkennung bekannt.

3.1.2 Koordinatensysteme

Im Folgenden soll eine Übersicht über die relevanten Koordinatensysteme für die Objektlageerkennung im Rahmen eines automatisierten Zuführsystems gegeben werden. Die Übersicht soll dazu dienen, die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen besser in den Gesamtkontext einordnen zu können.

Das **Roboterkoordinatensystem** R ist mit dem Roboter fest verbunden. Es wird vom Hersteller meist in der Nähe des Bodenflansches des Roboters definiert und ist unabhängig von der Bewegung des Roboters. Das Roboterkoordinatensystem R kann als Ursprungskoordinatensystem aufgefasst werden, mit dem die anderen Koordinatensysteme direkt oder indirekt referenziert sind.

Das **Greiferkoordinatensystem** G ist direkt mit dem Roboter verbunden. Die Lage des Greiferkoordinatensystems ist dem Roboter zu jedem Zeitpunkt während des regulären Betriebes bekannt. Typische Robotersteuerungen unterstützen die Möglichkeit zum Einmessen des Greiferkoordinatensystems über eine Messspitze, welche hierfür am Greifer angebracht wird.

Im **Sensorkoordinatensystem** S werden die Sensordaten erfasst. Der Ursprung befindet sich meist im Inneren des Sensorgeräts auf dem Messgrößen-Aufnehmer. Die Bestimmung der Transformation vom Sensor- zum Greiferkoordinatensystem wird durch eine Hand-Auge-Kalibrierung vorgenommen. Weit verbreitet ist die Kalibrierung über einen Referenzkörper, der einerseits vom Sensor erfasst und andererseits vom Greifer eingemessen werden kann.

Das **Ladungsträgerkoordinatensystem** L soll sich per Definition in der unteren Ecke des Ladungsträgers befinden, sodass alle Positionen im Innenraum des Ladungsträgers positive Komponenten ausweisen. Die Lage des Ladungsträgers variiert innerhalb einer bekannten Positioniergenauigkeit. Zum Ausführungszeitpunkt der Werkstück-Lageerkennung ist die Transformation vom Sensor zum Ladungsträger bekannt. Weitere Informationen hierzu können Abschnitt 4.6.6 entnommen werden.

Das **Koordinatensystem eines interessanten Punkts** *I* stellt ein intermediäres Koordinatensystem zur Beschreibung einer Werkstücklage dar. Diese Koordinatensysteme sollen charakteristische Punkte innerhalb des Ladungsträgers beschreiben, die sich auf den Werkstückoberflächen befinden. Je nach Definition des interessanten Punkts kann eine unterschiedliche Anzahl von interessanten Punkten im Ladungsträger ausgemacht werden. Eine detaillierte Einführung dieses Konzeptes folgt in Abschnitt 3.2.2.

Das **Werkstückkoordinatensystem** *W* stellt das körpereigene Koordinatensystem des Werkstücks dar, welches am Ende der Objektlageerkennung im Roboterkoordinatensystem bzw. Ursprungskoordinatensystem bekannt sein muss. Die Beschreibung der Werkstückgeometrie über das Werkstückkoordinatensystem soll anhand eines Flächenmodells erfolgen.

Abbildung 3-3 zeigt die einzelnen Koordinatensysteme und deren direkte Beziehungen zueinander.

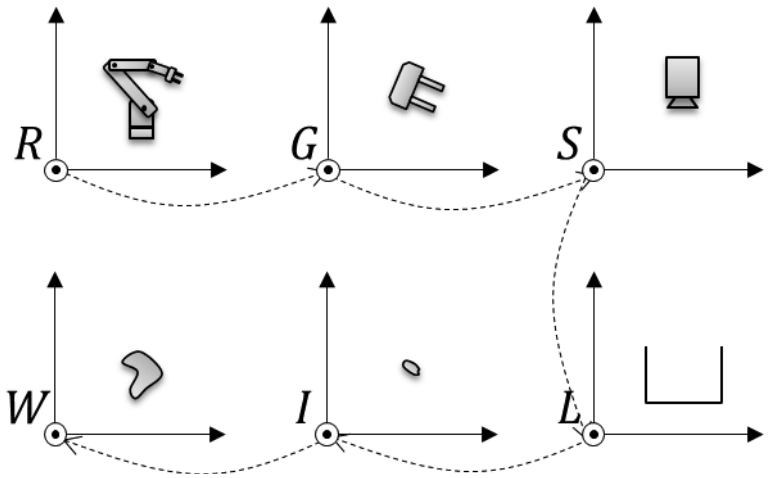

Abbildung 3-3 Relevante Koordinatensysteme für die Werkstück-Lageerkennung. Die gestrichelten Verbindungen kennzeichnen die direkten Beziehungen zwischen den Koordinatensystemen. Zu Beginn der Werkstück-Lageerkennung sind das Werkstückkoordinatensystem *W* und das Koordinatensystem des interessanten Punkts *I* unbekannt.

3.1.3 Parametrisierung von Werkstücklagen

In diesem Abschnitt soll die Parametrisierung der Werkstücklagen beschrieben werden, die deren formale Beschreibung ermöglicht und damit der Bildung einer Suchmenge dient. Das Werkstück wird als ein formstabiler, starrer Körper im kartesischen Raum aufgefasst. Es besitzt gemäß der Mechanik starrer Körper drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade, welche durch seine Lage bestimmt werden. Mathematisch wird die Lage eines Körpers durch die Euklidische

Bewegungsgruppe $SE(3)$ beschrieben, die sich zusammensetzt aus dem Produkt von $\mathbb{R}^3$ und $SO(3)$, den Positions- und Orientierungsparametern.

Die Lage (auch: Pose) eines Werkstücks bzw. eines Werkstückkoordinatensystems W soll im Folgenden auf das Ladungsträgerkoordinatensystem L bezogen und durch eine entsprechende Transformationsmatrix ${}^{L}_{W}T$ ausgedrückt werden. Die Transformationsmatrix beschreibt einen Basiswechsel zwischen dem körpereigenen Koordinatensystem W und einem neuen Koordinatensystem L. Für einen beliebigen Punkt x im Koordinatensystem W folgt daher

$$ {}^{L}x = {}^{L}_{W}T\left({}^{W}x\right) \tag{3.1} $$

für die Umrechnung in ein neues Koordinatensystem L. Die Transformationsmatrix ${}^{L}_{W}T$ besteht aus zwei Komponenten, der Rotation ${}^{L}_{W}R$ und der Translation ${}^{L}_{W}t$. Es gilt

$$ {}^{L}_{W}T = \begin{pmatrix} {}^{L}_{W}R & {}^{L}_{W}t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} . \tag{3.2} $$

Für die Berechnung folgt somit

$$ \begin{aligned} {}^{L}x &= \begin{pmatrix} {}^{L}_{W}R & {}^{L}_{W}t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^{W}x \\ 1 \end{pmatrix} \\ {}^{L}x &= {}^{L}_{W}R\,{}^{W}x + {}^{L}_{W}t \ . \end{aligned} \tag{3.3} $$

In dieser Arbeit wird für den Begriff *Position* auch alternativ der Begriff Translation bzw. für *Orientierung* auch Rotation oder Drehung verwendet. Die mathematischen Möglichkeiten zur Beschreibung von Position und Orientierung starrer Körper im Raum werden nun im Folgenden genauer aufgeführt.

3.1.3.1 Orientierungsbeschreibung

Die Orientierung eines Werkstücks bzw. Objekts im Raum wird durch den $SO(3)$, der speziellen orthogonalen Gruppe der Rotationsmatrizen ${}^{L}_{W}R$, beschrieben, welche aus den drei Einheitsvektoren e_x, e_y und e_z des gedrehten Koordinatensystems im Bezugsystem zusammengesetzt sind. Für die Komponenten der Rotationsmatrix gilt

$$ {}^{L}_{W}R = \left(e_x, e_y, e_z\right) = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3x3} \ . \tag{3.4} $$

Zur Berechnung der inversen Transformation aus einem System L zurück in ein System W folgt aus der Orthogonalität der Rotationsmatrix

$$ {}^{W}_{L}R = ({}^{L}_{W}R)^{-1} = ({}^{L}_{W}R)^{T} \quad . \tag{3.5} $$

Eine Rotationsmatrix ${}^{L}_{W}R$ besitzt wie dargestellt neun Komponenten, die allerdings nicht unabhängig voneinander sind. Prinzipiell bestehen mehrere Möglichkeiten, eine Orientierung über die Angabe von drei Parametern auszudrücken. Für die vektorielle Darstellung einer Orientierung mit drei Komponenten gilt

$$ {}^{L}_{W}r = \left(r_x, r_y, r_z\right) \in \mathbb{R}^3 \quad . \tag{3.6} $$

Im Folgenden sollen drei Konventionen aufgeführt werden, welche die Darstellung über drei Parameter ermöglichen und jeweils situative Vorteile aufweisen.

Rotationswinkel

Die speicherprogrammierbare Steuerung vieler Industrieroboter verwendet häufig eine Darstellung der Orientierung über Rotationswinkel. Diese Variante soll aufgeführt werden, um eine Umrechnung der Orientierung in eine von Industrierobotern interpretierbare Darstellung zu ermöglichen.

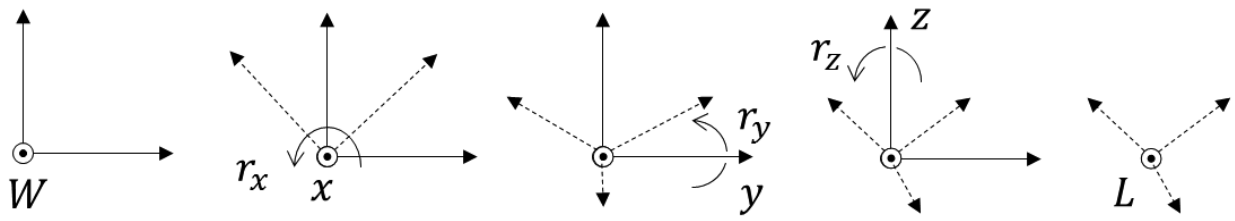

Abbildung 3-4 Veranschaulichung der xyz-Drehkonvention für feste Achsen bei einer Drehung von W nach L. Die Rotation erfolgt erst um die x-Achse, anschließend um die y-Achse und schließlich um die z-Achse.

Die drei Parameter der Orientierung werden in diesem Fall durch drei Rotationswinkel dargestellt, welche jeweils eine Drehung um eine vorher festgelegte Koordinatenachse beschreiben. Diese Rotationswinkel können auf verschiedene Weise interpretiert werden, wobei in der Reihenfolge der Drehungen und der Auswahl der Koordinatenachsen unterschieden wird. Die unterschiedlichen Interpretationen werden Drehwinkelkonventionen genannt und sind primär unterteilt in feste und mitbewegte Koordinatenachsen. Für jede Konvention werden drei Koordinaten-

achsen bestimmt und dann je nach Reihenfolge ihrer Drehung weiter untergliedert. Abbildung 3-4 veranschaulicht exemplarisch das Vorgehen für die xyz-Drehkonvention fester Achsen.

Für die Berechnung der Rotationsmatrix mit der xyz-Drehkonvention für feste Achsen folgt

$$
{}^{L}_{W}R = \begin{bmatrix} c_z\, c_y & c_z\, s_y\, s_x - s_z\, c_x & c_z\, s_y\, c_x + s_z\, s_x \\ s_z\, c_y & s_z\, s_y\, s_x + c_z\, c_x & s_z\, s_y\, c_x - c_z\, s_x \\ -s_y & c_y\, s_x & c_y\, c_x \end{bmatrix} \text{ mit}
$$

$$
c_x = \cos r_x\,, \qquad c_y = \cos r_y\,, \qquad c_z = \cos r_z\,,
$$
$$
s_x = \sin r_x\,, \qquad s_y = \sin r_y \text{ und } s_z = \sin r_z\ .
$$

(3.7)

Bei mitbewegten Achsen wird in der Regel auch von *Eulerwinkeln* gesprochen. Der grundsätzliche Unterschied besteht darin, dass nicht um die ursprünglichen, sondern immer um die nach jeder Drehung neu gebildeten Achsen rotiert wird. Verbreitete Darstellungen für mitbewegte Achsen sind die zyx-Drehkonvention bei der Karel-Programmiersprache von Fanuc oder zyz-Drehkonvention bei der AS-Sprache von Kawasaki.

Insgesamt ergeben sich je zwölf Konventionen für feste und mitbewegte Achsen, woraus sich aufgrund der bestehenden Dualität zwölf einzigartige Parametrierungen ergeben [Craig1989]. Die zyx-Drehkonvention für mitbewegte Achsen entspricht beispielsweise der xyz-Konvention für feste Achsen. Je nach Anwendungsfall kann sich für die Variante entschieden werden, welche bessere Weiterverarbeitungsmöglichkeiten bietet.

Achswinkel

Die Achswinkeldarstellung (engl.: axis angle; auch Drehvektordarstellung) beschreibt die Orientierung über die Drehung an einem Drehvektor um einen Drehwinkel. Eine in dieser Arbeit genutzte Eigenschaft dieser Darstellung ist die mögliche Verwendung des Drehwinkels als Abstandmaß zwischen zwei Rotationen (siehe Abschnitt 3.1.6). Auch die speicherprogrammierbaren Steuerungen einiger Industrieroboter nutzen diese Konvention, beispielsweise bei den Robotern des Herstellers Universal Robots [UR2013].

Die Darstellung erfolgt über drei Parameter, wenn der Drehwinkel über die Länge des Drehvektors ausgedrückt wird. Auf diese Weise kann die in der Literatur ebenfalls verwendete Darstellung mit vier Komponenten, einem dreidimensionalen Drehvektor und einem skalaren Drehwinkel, zusammengefasst werden (siehe Abbildung 3-5).

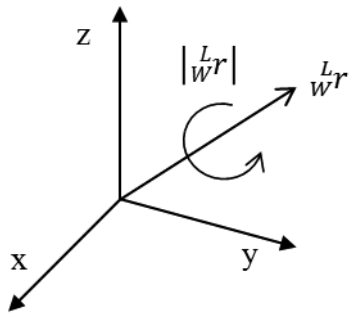

Abbildung 3-5 Rotation über Achswinkel mit Drehvektor ${}^{L}_{W}r$ und Drehwinkel $|{}^{L}_{W}r|$ einer allgemeinen Drehung.

Bei sehr kleinen Drehwinkeln kann die Darstellung über Achswinkel zur numerischen Instabilität führen, da die Länge des Drehvektors gegen Null tendiert. In diesen Fällen empfiehlt sich eine Inkrementierung des Drehwinkels um 2π. Mit Hilfe einer Umrechnungsfunktion ${}^{L}_{W}f_{R}$ folgt aus einem gegebenen Achswinkel ${}^{L}_{W}r$ für die Rotationsmatrix

$$
\begin{aligned}
&{}^{L}_{W}R = {}^{L}_{W}f_{R}({}^{L}_{W}r) \\
&{}^{L}_{W}R = \begin{bmatrix} r_x r_x v_r + c_r & r_x r_y v_r - r_z s_r & r_x r_z v_r + r_y s_r \\ r_x r_y v_r + r_z s_r & r_y r_y v_r + c_r & r_y r_z v_r - r_x s_r \\ r_x r_z v_r - r_y s_r & r_y r_z v_r + r_x s_r & r_z r_z v_r + c_r \end{bmatrix} \text{ mit} \\
&c_r = \cos(|{}^{L}_{W}r|),\ s_r = \frac{\sin(|{}^{L}_{W}r|)}{|{}^{L}_{W}r|} \text{ und } v_r = \frac{1-\cos(|{}^{L}_{W}r|)}{|{}^{L}_{W}r|^2}\ .
\end{aligned}
\qquad (3.8)
$$

Modifizierte Kugelkoordinaten mit Rollwinkel

Allgemein beschreiben Kugelkoordinaten einen Punkt im Raum über drei Komponenten: zwei Drehwinkel und die Vektorlänge. Zur Beschreibung einer Orientierung soll die Vektorlänge in dieser Arbeit den dritten Drehwinkel kennzeichnen. Dieses Vorgehen besitzt somit Parallelen zur beschriebenen Achswinkeldarstellung. Die so modifizierte Variante der Kugelkoordinaten mit Rollwinkel eignet sich in dieser Form für die anschauliche Visualisierung von Orientierungen, weshalb sie in dieser Arbeit zur erleichterten Interpretation von Rotationsmengen Verwendung findet (vgl. Abbildung 3-23). Bei einem auf diese Weise dargestellten Punkt entspricht sein Ortsvektor der Richtung des Einheitsvektors e_x. Der Abstand des Punkts vom Ursprung kennzeichnet schließlich die Drehung der Einheitsvektoren e_y und e_z um den Einheitsvektor e_x.

3.1.3.2 Positionsbeschreibung

Die Position eines starren Körpers im Raum wird durch seinen Positionsvektor ${}^{L}_{W}t$ dargestellt. Der Positionsvektor beschreibt die Position des Ursprungs des körpereigenen Koordinatensystems W aus einem Bezugsystem L. Für die Komponenten des Positionsvektors folgt

$$ {}^{L}_{W}t = (t_x, t_y, t_z) \in \mathbb{R}^3 \quad . \tag{3.9} $$

Für den inversen Positionsvektor ${}^{W}_{L}t$ gilt bei gegebener Rotation ${}^{W}_{L}R$

$$ {}^{W}_{L}t = -{}^{W}_{L}R \; {}^{L}_{W}t \quad . \tag{3.10} $$

Die Festlegung des Ursprungs (auch: Rotationszentrum) im körpereigenen Koordinatensystem kann prinzipiell beliebig erfolgen. In dieser Arbeit soll der Ursprung durch die geometrische Mitte des minimal umgebenden Rechtecks (MUR) gekennzeichnet werden. Das minimal umgebende Rechteck bezeichnet das kleinstmögliche achsenparallele Rechteck, auch als Hüllkörper bezeichnet, welches das Werkstück komplett umschließt (siehe Abbildung 3-6). Konträr zur Implikation des Begriffs Rechteck wird die Bezeichnung auch im $\mathbb{R}^3$ verwendet. Alternativ kann in höheren Dimensionen auch der Begriff Hyperrechteck gewählt werden. Die Berechnung der geometrischen Mitte des minimal umgebenden Rechtecks kann direkt aus dem vorliegenden Flächenmodell erfolgen.

Die beschriebene Festlegung des Ursprungs besitzt datenverarbeitungstechnische Gründe, da beim Rendern eines Werkstücks Pufferspeicher Verwendung finden, deren erforderliche Größe auf diese Weise leichter abgeschätzt werden kann (vgl. Abschnitt 3.2.1).

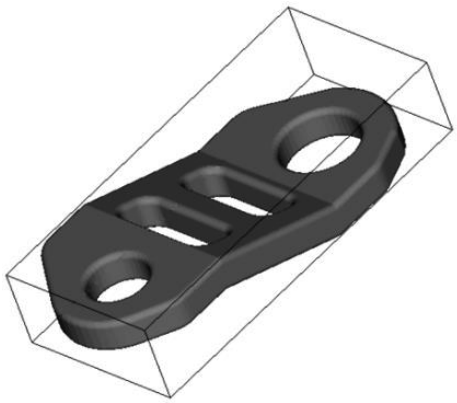

Abbildung 3-6 Minimal umgebendes Rechteck eines Werkstücks.

Das Rotationszentrum kann sich alternativ auch auf den Massenmittelpunkt oder einen definierten Punkt auf der Werkstückoberfläche beziehen. Der Massenmittelpunkt lässt sich in der Regel

jedoch aufgrund fehlender Dichteinformationen in der Werkstückdefinition nicht bestimmen. Auch ein spezieller Punkt auf der Werkstückoberfläche lässt sich nicht zwangsläufig auf beliebige Werkstückgeometrien übertragen. Daher werden beide Darstellungsformen im Weiteren vernachlässigt.

3.1.4 Diskretisierung von Werkstücklagen

Gegenstand dieses Abschnittes ist die Gewinnung einer diskreten Teilmenge aus der kontinuierlichen Suchmenge aller möglichen Werkstücklagen ${}_{W}^{L}T$. Die Diskretisierung ist als Rechenschritt erforderlich, um schließlich eine endliche Anzahl von Lösungskandidaten ${}_{W}^{L}\widehat{\mathcal{M}}$ ermitteln zu können, wie im Abschnitt 3.1.5 beschrieben wird. Die Diskretisierung erfolgt zunächst für den translatorischen und anschließend für den rotatorischen Anteil einer Werkstücklage ${}_{W}^{L}T$. Bei der Diskretisierung soll berücksichtigt werden, dass die hinreichend genaue Beschreibung einer Werkstücklage möglich bleibt. Die Auswahl hierfür geeigneter Schrittweiten wird in Abschnitt 3.4.1 diskutiert.

3.1.4.1 Translationsanteil

Zur Diskretisierung des Translationsanteils soll ein strukturiertes gleichmäßiges Gitter verwendet werden. Ein gleichmäßiges Gitter unterteilt den Raum L in achsenparallele, rechtwinklige Bereiche mit konstanter Kantenlänge entlang einer Achse (siehe Abbildung 3-7). Strukturierte Gitter besitzen gegenüber unstrukturierten Gittern die nützliche Eigenschaft, dass sich benachbarte Zellen mit geringem Rechenaufwand ermitteln lassen und damit das Laufzeitenverhalten eines Suchalgorithmus stark verbessern können.

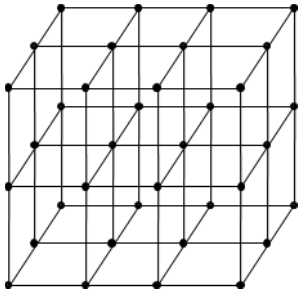

Abbildung 3-7 Strukturiertes gleichmäßiges Gitter zur Diskretisierung des Translationsanteils. Jeder Gitterpunkt kann durch drei Indizes eindeutig beschrieben werden.

Die Gitterpunkte können eindeutig über drei Indizes beschrieben werden. Wird ein Gitterpunkt ${}_{W}^{L}\boldsymbol{t}$ als Translationsanteil einer Werkstücklage W im Ladungsträger L verstanden, so folgt

$$ {}_{W}^{L}\boldsymbol{t} = (i, j, k) \in \mathbb{N}^3 \quad . \tag{3.11} $$

Die Umrechnung zwischen indizierter und diskreter Darstellung erfolgt über

$$\Delta t = \left(\Delta t_i, \Delta t_j, \Delta t_k\right) \in \mathbb{R}^3 \qquad (3.12)$$

mit der Kantenlänge des Gitters, die als Gitterschrittweite Δt bezeichnet wird. Die Gitterschrittweite Δt gibt nach erfolgter Diskretisierung den kleinsten definierten Unterschied an. Eine kleinere Schrittweite entspricht dabei einer höheren Auflösung und führt zu einer höheren Genauigkeit, jedoch auch zu einer höheren Anzahl von Gitterpunkten. Unter Verwendung der Gitterschrittweite kann eine Umrechnungsmatrix

$$M_{\Delta t} = \begin{pmatrix} \Delta t_i & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t_j & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t_k \end{pmatrix} \qquad (3.13)$$

gebildet werden, bei welcher die festgelegten Gitterschrittweiten auf der Diagonale notiert sind. Für die Berechnung von ${}^{L}_{W}\hat{t}$ aus ${}^{L}_{W}t$ folgt somit

$${}^{L}_{W}\hat{t} = M_{\Delta t}\ {}^{L}_{W}t \ . \qquad (3.14)$$

Die Markierung des erhaltenen Ortsvektors ${}^{L}_{W}\hat{t}$ mit einem Dach kennzeichnet die Möglichkeit, diesen in eine indizierte Darstellung zu überführen bzw. aus einer indizierten Darstellung erhalten zu können. Das Additions- und Subtraktionsergebnis zweier mit einem Dach gekennzeichneter Komponenten kann ebenfalls stets in eine indizierte Darstellung überführt werden.

3.1.4.2 Rotationsanteil

Für die Diskretisierung der Orientierung existieren in der Fachliteratur verschiedene Ansätze, welche im Folgenden kurz aufgeführt und bewertet werden:

Feste Winkelschrittweite bei Rotationswinkeln – Wird die Orientierung über Rotationswinkel ausgedrückt, so kann eine Diskretisierung prinzipiell analog zum Translationsanteil erfolgen. Hierbei werden die diskreten Rotationswinkel über eine feste Winkelschrittweite gebildet. Dieses Verfahren besitzt allerdings zwei Nachteile: Zum einen gilt für die endlich große und se $SO(3)$, dass mehrere Kombinationen der Rotationswinkel dieselbe Orientierung beschreiben können und in der Folge Redundanzen entstehen, welche die Suchmenge unnötigerweise vergrößern. Zum anderen führt das Verwenden einer festen Schrittweite, wie in Abbildung 3-8 erkennbar, zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Rotationen [Ledermann2011].

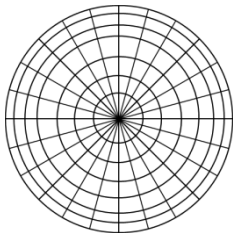

Abbildung 3-8 Verteilung von Rotationen auf einer Kugeloberfläche mit Häufung an den Polstellen.

Reguläre Parkettierung einer Sichtkugel – Für rotationssymmetrische Objekte kann eine Diskretisierung der Orientierung über die reguläre Parkettierung einer Sichtkugel erfolgen. Diese ermöglicht eine homogene Verteilung der Rotationen [Leibe2001]. Die Bildung erfolgt beispielsweise über die sukzessive Unterteilung der Dreiecksflächen eines Oktaeders. Der Mittelpunkt jeder entstehenden Dreiecksfläche entspricht der Blickrichtung des Bezugssystems auf das Objekt [Ledermann2011, Holst2004]. Die hierbei entstehende Geometrie kann Abbildung 3-9 entnommen werden. Für nicht-rotationssymmetrische Objekte muss eine zusätzliche Drehung um die Blickrichtung des Bezugsystems, näherungsweise mit gleicher Schrittweite, für jeden berechneten Punkt ausgeführt werden. Da sich bei jeder Unterteilung der Dreiecksflächen die Anzahl der verwendeten Dreiecke vervierfacht, ist eine beliebige Diskretisierungsschrittweite über diesen Ansatz nicht zu verwirklichen.

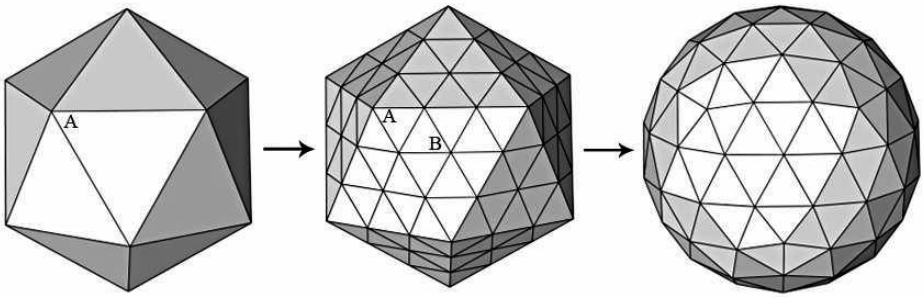

Abbildung 3-9 Reguläre Parkettierung einer Sichtkugel durch Verfeinerung eines platonischen Körpers zu einer Kugel [Stroh2007].

Gleichverteilung von Punkten auf einer Kugeloberfläche – Ähnlich dem obigen Ansatz kann auch durch die gleichmäßige Verteilung von Punkten auf einer Kugeloberfläche die Blickrichtung des Bezugssystems bestimmt werden. Im Vergleich zum vorherigen Mittelpunkt eines Dreieckes stellt in diesem Fall der Ortsvektor eines Punkts auf der Kugeloberfläche die Blickrichtung dar. Somit ergibt sich eine endliche Anzahl von Gitterpunkten n, die jeweils einer Rotation zugeordnet werden können. Für allgemeine, also nicht-rotationssymmetrische, Geometrien wird die

fehlende Drehung um die Ortsvektoren der Gitterpunkte ergänzt. In der Fachliteratur finden sich zahlreiche Verfahren zur Gleichverteilung von Punkten auf Kugeloberflächen.

In dieser Arbeit soll das Fibonacci-Sphären-Modell basierend auf dem Goldenen Schnitt verwendet werden. Die Verteilung ist hierbei nicht notwendigerweise mathematisch exakt gleichverteilt, ermöglicht jedoch eine beliebige Anzahl von Punkten und damit eine frei wählbare Winkelschrittweite Δr [Naylor2002]. Die Winkelschrittweite Δr soll den minimalen Drehwinkel zwischen zwei Punkten kennzeichnen und bildet so das Pendant zur Gitterschrittweite Δt. Abbildung 3-10 zeigt die Verteilung für zwei unterschiedliche Mengen an Punkten. Eine nähere Betrachtung der entstehenden Verteilung basierend auf dem Goldenen Schnitt und damit einhergehende Ungenauigkeiten erfolgen in Abschnitt 3.1.6. Weitere Ansätze zur Verteilung einer beliebigen Anzahl an Punkten auf Sphären basieren beispielsweise auf der Minimierung des Coulomb-Potenzials von Elektronen [Katanforoush2003].

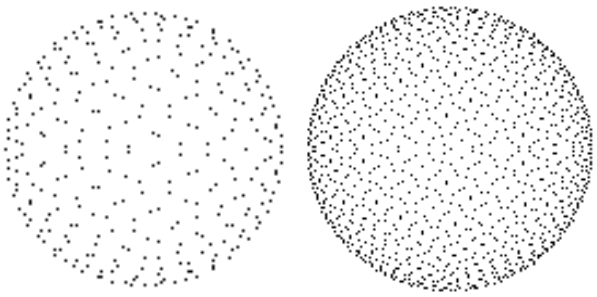

Abbildung 3-10 Unterschiedliche Anzahl an Punkten auf einer Kugel durch das Fibonacci-Sphären-Modell. Die linke Kugel enthält 324 Punkte und die rechte Kugel 1.296 Punkte.

Diskretisierung über gleichverteilte Punkte auf Kugeloberfläche

Für die weiteren Betrachtungen soll nun von einer annähernd gleichverteilten Punktemenge auf einer Sphäre ausgegangen werden. Diese Punkte stellen bereits eine Diskretisierung zweier Komponenten der Orientierung dar und erhalten den Index u. Mit dem Index u ist es somit möglich, jeden Punkt auf der Kugeloberfläche eindeutig zu beschreiben.

Die fehlende Komponente der Orientierung soll ebenfalls mit der festen Winkelschrittweite Δr diskretisiert werden, was zu einer Gleichverteilung um diese Drehachse führt. Die hierdurch entstehenden Drehungen sollen mit v indiziert werden. Über die Indizes u und v soll somit eine indizierte Orientierung

$$ {}^{L}_{W}r = (u, v) \in \mathbb{N}^2 \qquad (3.15) $$

dargestellt werden können. Für die Indizes u und v folgt bei einer gegebener Winkelschrittweite Δr die Anzahl von Punkten auf der Kugeloberfläche N_u sowie die Anzahl der Drehungen um die dritte Drehachse N_v

$$\begin{aligned} u &= 1 \dots N_u \\ v &= 1 \dots N_v \ . \end{aligned} \tag{3.16}$$

Die Anzahl der Drehungen um die dritte Drehachse N_v soll direkt über die Winkelschrittweite Δr bestimmt werden. Es gilt

$$N_v = \frac{2\pi}{\Delta r} \ . \tag{3.17}$$

Durch Nachrechnen mit der im Abschnitt 3.1.6 vorgestellten Metrik kann gezeigt werden, dass sich für die betrachteten Wertebereiche der Winkelschrittweite Δr die Anzahl von Punkten auf der Kugeloberfläche näherungsweise zu

$$N_u = \left(\frac{\pi}{\Delta r}\right)^2 = \frac{{N_v}^2}{4} \tag{3.18}$$

bestimmen lässt. Zur Konvertierung einer indizierten Orientierung ${}^L_W r$, die über zwei Indizes beschrieben wird, in die diskrete Darstellung eines Achswinkels ${}^L_W \hat{r}$ soll die Umrechnungsfunktion $f_{\Delta r}$ mit

$${}^L_W \hat{r} = f_{\Delta r}({}^L_W r) \tag{3.19}$$

verwendet werden. Die Notation des erhaltenen Achswinkels mit einem Dach erfolgt analog zum Translationsanteil im vorangegangenen Abschnitt. Mit einem Dach gekennzeichnete kel ${}^L_W \hat{r}$ können somit stets in eine indizierte Form überführt werden. Zur Umrechnung der Indizes in Achswinkel ist es allerdings möglich, verschiedene Parametrierungen zu verwenden, welche zu geringfügig unterschiedlichen Ergebnissen führen können (siehe Abbildung 3-11). Nähere Informationen hierzu lassen sich beispielsweise Naylor [2002] entnehmen.

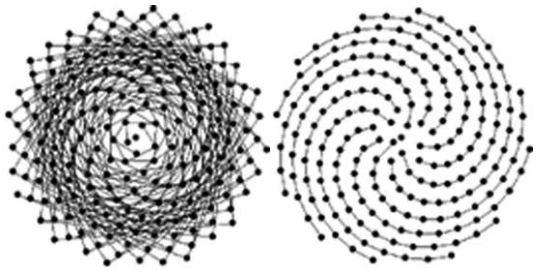

Abbildung 3-11 Unterschiedliche Verteilungen von Punkten durch das Fibonacci-Sphären-Modell, entnommen aus Naylor [2002].

In dieser Arbeit sollen sich die einzelnen Komponenten des Achswinkels mit

$$r_x = \cos\left(\frac{\pi}{3-\sqrt{5}}u\right)\sqrt{1-\left(\frac{2u}{N_u}-1+\frac{1}{N_u}\right)\Delta r\ v}$$

$$r_y = \sin\left(\frac{\pi}{3-\sqrt{5}}u\right)\sqrt{1-\left(\frac{2u}{N_u}-1+\frac{1}{N_u}\right)\Delta r\ v} \qquad (3.20)$$

$$r_z = \left(\frac{2u}{N_u}-1+\frac{1}{N_u}\right)\Delta r\ v$$

berechnen.

3.1.4.3 Zusammenfassung

Nachdem in den beiden vorangegangenen Abschnitten die Diskretisierung der Position und Rotation erfolgt ist, kann nun auch eine Lage diskretisiert werden. Die Beschreibung einer indizierten Lage ${}^{L}_{W}\mathcal{T}$ erfolgt dann über je ein rotatorisches und ein translatorisches Tupel von Indizes

$${}^{L}_{W}\mathcal{T} = ({}^{L}_{W}r, {}^{L}_{W}t) = \big((u,v),(i,j,k)\big)\ . \qquad (3.21)$$

Bei der Überführung der indizierten Darstellung in eine diskrete soll die erhaltene Werkstücklage

$${}^{L}_{W}\hat{T} = ({}^{L}_{W}\hat{r}, {}^{L}_{W}\hat{t}) \qquad (3.22)$$

ebenfalls mit einem Dach gekennzeichnet werden. Eine indizierte Lage kann prinzipiell auch über einen einzigen Index beschrieben werden, sofern die Wertebereiche der Indizes wie im folgenden Abschnitt festgelegt wurden. Die Berechnung erfolgt dann über eine lineare Indizierung, die häufig auch bei Matrizen verwendet wird, bei der alle möglichen Kombinationen von Indizes

durchnummeriert werden. Dieses im Detail nicht näher betrachtete Vorgehen findet sich auch bei der Gestaltung des Akkumulatorraums in Abschnitt 4.4.1.

3.1.5 Beschränkung

Die im vorangegangenen Abschnitt erhaltene diskrete, aber unendliche Menge an Werkstücklagen soll in diesem Abschnitt beschränkt werden, um schließlich die endliche und diskrete Menge ${}^{L}_{W}\widehat{\mathcal{M}}$ zu erhalten. Die Teilmenge der diskreten Werkstückorientierung ist bereits endlich, so dass für die endliche Menge aller möglichen Orientierungen N_r bei einer gegebenen Winkelschrittweite über die Gleichungen (3.17) und (3.18) folgt

$$N_r = N_u \, N_v \quad . \tag{3.23}$$

Wird nun noch das gleichmäßige Gitter zur Diskretisierung des Translationsanteils in seiner Größe beschränkt, so resultiert schließlich eine endliche Suchmenge. Hierfür soll die Anzahl an Kanten entlang einer Achse begrenzt werden. Da als Bezugssystem L der Ladungsträger ausgewählt wurde, kann die Annahme getroffen werden, dass nur diejenigen Positionsvektoren zu berücksichtigen sind, welche sich innerhalb des Ladungsträger-Innenraums V_L befinden. Zur vereinfachten Darstellung wird davon ausgegangen, dass sich dieser Ladungsträger-Innenraum durch einen Quader hinreichend genau beschreiben lässt (vgl. Abschnitt 3.1.1). Typische Kantenlängen des Quaders können Abbildung 3-12 entnommen werden.

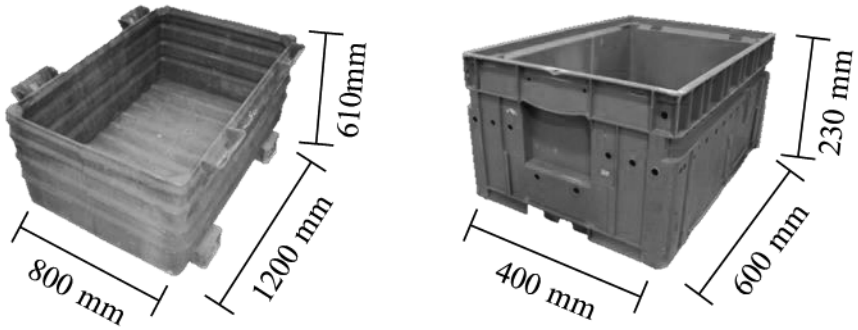

Abbildung 3-12 Ladungsträger in der Industrie. Links eine Metallkiste und rechts ein Kleinladungsträger. Gekennzeichnet sind die ungefähren Kantenlängen des quaderförmigen Ladungsträger-Innenraums.

Mit den gegebenen Kantenlängen $\left(L_x, L_y, L_z\right) \in \mathbb{R}^3$ des Ladungsträger-Innenraums können die translatorischen Indizes i, j und k nun durch

$$\begin{aligned} i &= 1 \ldots N_i \text{ mit } N_i = \frac{L_x}{\Delta L_i} \\ j &= 1 \ldots N_j \text{ mit } N_j = \frac{L_y}{\Delta L_j} \\ k &= 1 \ldots N_k \text{ mit } N_k = \frac{L_z}{\Delta L_k} \end{aligned} \qquad (3.24)$$

beschränkt werden. Bei einer gegebenen Gitterschrittweite ΔL ergibt sich die endliche Menge aller möglichen Positionen

$$N_t = N_i \, N_j \, N_k \quad . \qquad (3.25)$$

Schließlich kann die Größe des diskretisierten Suchraums

$$N_T = N_r \, N_t \qquad (3.26)$$

aus dem Produkt der translatorischen und rotatorischen Teilmengen gebildet werden. Hiermit wurde eine endliche und diskrete Suchmenge ${}^{L}_{W}\widehat{\mathcal{M}}$ erhalten, welche im folgenden Abschnitt hinsichtlich ihrer Nachbarschaftsbeziehungen näher betrachtet wird.

3.1.6 Metrik und Nachbarschaft

Für die im vorangegangenen Abschnitt erhaltene endliche Suchmenge ${}^{L}_{W}\widehat{\mathcal{M}}$ sollen nun die Nachbarschaftsbeziehungen bestimmt werden. Das Festlegen der Nachbarschaftsbeziehungen ist Voraussetzung für die Strukturierung der Suchmenge in einem Entscheidungsbaum und die hierauf aufbauende Suchstrategie, um bei der Expansion von Baumknoten auch die direkte Nachbarschaft eines Baumknotens untersuchen zu können. Die Nachbarschaft einer Lage soll diejenigen Lagen beschreiben, welche den geringsten Abstand bzw. das höchste Maß an Ähnlichkeit zueinander aufweisen. Zur Bestimmung der Größe von Abständen können axiomatisch definierte Metriken verwendet werden, die die Eigenschaften der Definitheit, Symmetrie und der Dreiecksungleichung erfüllen [Alt2002]. Zunächst wird für die Position und anschließend für die Orientierung jeweils eine Metrik vorgeschlagen, die dann geeignet miteinander kombiniert werden. In der Fachliteratur findet sich eine ausführliche Darstellung eines derartigen Vorgehens [vgl. Lenarcic2008].

Translation

Für den Translationsanteil einer Lage wird der hinlänglich bekannte euklidische Abstand d_t gewählt. Dieser berechnet sich über die euklidische Norm zweier Vektoren, also den Ortsvektoren der Koordinatensysteme. Alternativen zur euklidischen Metrik wären bei der Betrachtung von

Gitterpunkten die Manhattan-Metrik [Rothlauf2011] oder auch die Französische Eisenbahnmetrik [Dobrowolski2006], welche jedoch nicht weiter betrachtet werden, da nur der euklidische Abstand die kürzeste Strecke zwischen zwei Punkten im dreidimensionalen Raum bestimmen kann.

Orientierung

Für den Rotationsanteil einer Lage soll der Achswinkel zwischen zwei Orientierungen als Metrik d_r verwendet werden. Für den Achswinkel folgt über die Berechnungsvorschrift der Achswinkelkonvention nach Craig [1989] ein Wert zwischen 0 und π [rad]. Somit folgt für das Abstandsmaß zweier Drehmatrizen bzw. für die Metrik

$$d_r : \mathbb{R}^{3x3} \times \mathbb{R}^{3x3} \rightarrow \mathbb{R} \text{ mit } 0 \leq d_r \leq \pi \ . \qquad (3.27)$$

Alternative Metriken für die Bestimmung des Abstands zwischen zwei Rotationen können beispielsweise mit Hilfe von Quaternionen oder Eulerwinkeln gebildet werden [Huynh2009], welche jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Lage

Abschließend sollen die translatorischen und rotatorischen Metriken zu einer resultierenden Kenngröße, der Metrik d_T für eine Lage, zusammengefasst werden. Aufgrund der unterschiedlichen Maßeinheiten von Translation und Rotation ist es erforderlich, beide Komponenten zu normieren, was durch die Verwendung eines Gewichtungsfaktors möglich ist [Kuffner2004]. Die Bestimmung des Gewichtungsfaktors k_d erfolgt in dieser Arbeit über die Werkstücklänge L_W, wodurch die resultierende Metrik abhängig von der Werkstückgeometrie bzw. dessen Skalierung ist. Dies stellt insofern keine Einschränkung dar, als dass in dieser Arbeit die Abstandsbestimmung nur zwischen Werkstücklagen des gleichen Typs durchgeführt wird.

Zur Bestimmung eines Gewichtungsfaktors wird zunächst angenommen, dass die Sensormesswerte in einer diskretisierten Form vorliegen. Wird ein vom Sensor erfasstes Werkstück gedreht, so ist diese Drehung erst dann wahrnehmbar, wenn mindestens ein Messwert einem anderen Gitterpunkt zugeordnet wird. Die Zuordnung eines Messwerts zu einem anderen Gitterpunkt erfolgt allerdings erst nach der Überschreitung eines Mindestdrehwinkels. Dieser Mindestdrehwinkel stellt einen Anhaltspunkt für die Diskretisierung der Orientierung dar. Abbildung 3-13 veranschaulicht die Konstruktion eines vereinfachten Zusammenhangs zwischen einer rotatorischen und einer translatorischen Diskretisierung.

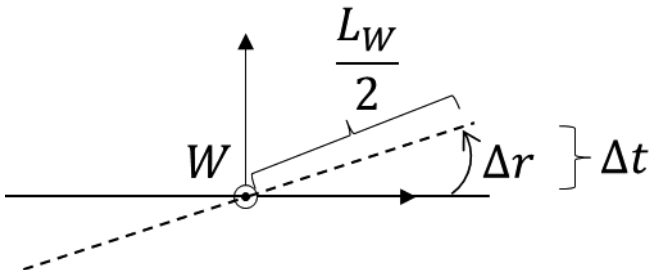

Abbildung 3-13 Vereinfachter Zusammenhang zwischen Gitter- und Winkelschrittweite für die Drehung um eine Achse für ein flaches von der Seite betrachtetes Werkstück mit der Länge L_W.

Bei einer gegebenen Gitterschrittweite Δt und einer als sehr viel größer angenommenen Werkstücklänge L_W, der längsten Seite des minimal umgebenden Rechtecks, kann die Sinusfunktion linearisiert und die minimal wahrnehmbare Drehung eines Werkstücks näherungsweise abgeschätzt werden. Es folgt

$$\sin \Delta r = \frac{2}{L_W} \Delta t \quad \xrightarrow{linearisert} \quad \Delta r \approx \frac{2}{L_W} \Delta t \ . \tag{3.28}$$

Diese Vereinfachung führt zu einem als linear angenommenen Zusammenhang zwischen der Gitterschrittweite Δt und der Winkelschrittweite Δr, der allerdings nur für eine zur Werkstückgröße vergleichsweise feine Diskretisierung gelten kann. Somit folgt für den Gewichtungsfaktor

$$k_d = \frac{\Delta t}{\Delta r} \text{ mit } k_d \approx \frac{L_W}{2} \ . \tag{3.29}$$

Der Gewichtungsfaktor k_d ist so festgelegt worden, dass bei einer Nachbarschaftsgröße N_d genau $\frac{N_d}{2}$ translatorisch und $\frac{N_d}{2}$ rotatorisch verschiedene Lagen umfasst werden. Für die resultierende Metrik d_T folgt dann

$$d_T = d_t + k_d \, d_r \ . \tag{3.30}$$

3.1.7 Komplexitätsbetrachtung

In diesem Abschnitt soll die Komplexität der Suchmenge berechnet werden. Die Komplexität der Suchmenge bezeichnet die Veränderung der Größe des entstehenden Lösungsraums in Abhängigkeit von den gewählten Diskretisierungsschrittweiten. Hierbei wird pauschal angenommen, dass mit steigender Komplexität der Suchmenge ein erhöhter Ressourcenverbrauch und eine länger andauernde Lösungsfindung einhergehen. Eine steigende Komplexität wird daher im Sinne einer effizienten Lösungsfindung als negativer Einfluss betrachtet. Das Ziel besteht somit zu-

nächst darin, die Diskretisierungsparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Suchraumgröße zu untersuchen, wofür diese in den folgenden Rechnungen in Abhängigkeit der Gitter- bzw. Winkelschrittweite ausgedrückt wird.

Für die resultierende Suchraumgröße N_T der endlichen Suchmenge ${}^{L}_{W}\widehat{\mathcal{M}}$ folgt mit den Gleichungen (3.26), (3.23) und (3.25) über die Anzahl der diskreten Orientierungen N_r und der Anzahl an Gitterpunkten N_t

$$N_T = N_r N_t = N_i N_j N_k N_u N_v \quad . \tag{3.31}$$

Mit Hilfe von Gleichung (3.17), (3.18) und (3.24) ergibt sich

$$N_T = \frac{L_x}{\Delta t_i}\frac{L_y}{\Delta t_j}\frac{L_z}{\Delta t_k}\left(\frac{\pi}{\Delta r}\right)^2\frac{2\pi}{\Delta r} \quad . \tag{3.32}$$

Für die Komplexitätsbetrachtung soll die Annahme getroffen werden, dass die Gitterschrittweite Δt für alle Parameter

$$\Delta t = \Delta t_i = \Delta t_j = \Delta t_k \tag{3.33}$$

gleich ist. Der Term vereinfacht sich unter Verwendung von Gleichung (3.29) und (3.33) zu

$$\begin{aligned} N_T &= \frac{2\pi^3 L_x L_y L_z}{\Delta t^3 \Delta r^3} \\ &= \underbrace{2\pi^3 L_x L_y L_z \frac{1}{{k_d}^3}}_{konst.}\ \frac{1}{\Delta r^6} \\ &= \underbrace{2\pi^3 L_x L_y L_z {k_d}^3}_{konst.}\ \frac{1}{\Delta t^6} \quad . \end{aligned} \tag{3.34}$$

Die mit einer geschweiften Klammer gekennzeichneten Terme beinhalten ausschließlich Konstanten, die bei der Komplexitätsbetrachtung vernachlässigt werden sollen. Die Menge der Eingabedaten n wächst demnach umgekehrt proportional zur sechsten Potenz der Winkelschrittweite Δr bzw. der Gitterschrittweite Δt. Für den allgemeinen Fall einer beliebigen Werkstückgeometrie ergibt sich für die Komplexität der Suchmenge ${}^{L}_{W}\widehat{\mathcal{M}}$ somit

$$O(n^6) \quad . \tag{3.35}$$

Für die Translation unabhängig von der Orientierung und umgekehrt, folgt jeweils eine Komplexität von

$$O(n^3) \quad . \tag{3.36}$$

Für einen typischen Anwendungsfall ergibt sich aus der Komplexität von $O(n^6)$ eine enorme Anzahl von Lösungskandidaten (siehe Abbildung 3-14), die zwar in endlicher Zeit und mit endlichem Speicherplatz, jedoch bei heutigen Rechengeschwindigkeiten nicht praktikabel ausgewertet werden können. Mit Blick auf das Mooresche Gesetz, bei dem sich die Rechengeschwindigkeit je nach Quelle alle 12 bis 24 Monate verdoppelt, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass auch in absehbarer Zeit eine komplette Untersuchung des Lösungsraums nicht durchführbar ist. Unter der günstigen, jedoch unrealistischen Annahme, dass ein Prozessor in jedem Takt einen Lösungskandidaten auswerten könnte, ergibt sich bei einer angenommenen handelsüblichen Rechenleistung von 100.000 MIPS eine Suchdauer von etwa 100 Anlagenzyklen (vgl. Abbildung 1-3) für die gesamte Auswertung des Suchraums einer Größe von etwa 10^{14}.

Tatsächlich ist davon auszugehen, dass ein effizienter Suchalgorithmus mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht notwendigerweise alle Elemente der Suchmenge durchlaufen müsste. Trotzdem sind die folgenden Abschnitte zunächst der Fragestellung gewidmet, wie die Suchmenge bzw. die Anzahl der Lösungskandidaten konzeptionell durch Einführung eines interessanten Punkts *I* reduziert werden kann.

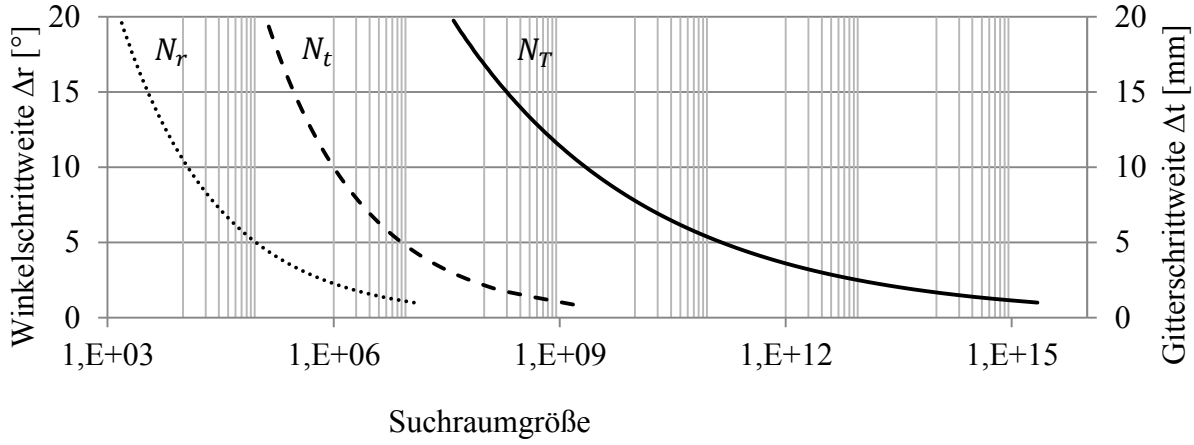

Abbildung 3-14 Resultierende Größen der Suchmenge aller Werkstücklagen N_T, der Rotationmenge N_r und der Translationsmenge N_t in Abhängigkeit der Winkel- bzw. Gitterschrittweite für einen Ladungsträger mit einer Größe von einem Kubikmeter und einem Gewichtungsfaktor k_d gemäß Gleichung (3.29).

3.2 Strukturierung der Suchmenge

Die Strukturierung der Suchmenge dient dem Zweck, die Suchmenge durch eine Baumstruktur repräsentieren zu können und dabei die Suchmengenkomplexität, durch Einführung des bisher nur konzeptionell betrachteten interessanten Punkts, signifikant zu reduzieren. In Abschnitt 3.2.1 wird die für die Einführung eines interessanten Punkts notwendige Betrachtung der sichtbaren Werkstückoberfläche vorgenommen. In Abschnitt 3.2.2 wird aufgezeigt, wie die Zwangsbedingung durch Beschreibung der Werkstücklagen relativ zu interessanten Punkten umgesetzt werden kann, was zu einer Aufspaltung der Werkstücklage in zwei Komponenten führt. Die Anforderungen und Eigenschaften eines interessanten Punkts zur praktischen Einsetzbarkeit werden in Abschnitt 3.2.3 behandelt. Die Einführung der in dieser Arbeit verwendeten interessanten Punkte durch lokale Extremwerte erfolgt dann in Abschnitt 3.2.4, gefolgt von einer Untersuchung lokaler Extremwerte hinsichtlich der geforderten Eigenschaften in Abschnitt 3.2.5. Bei der Repräsentierung der Suchmenge durch einen Entscheidungsbaum in Abschnitt 3.2.6 bilden die interessanten Punkte schließlich die erste Ebene des Suchbaums und die relativen Werkstücklagen die zweite Ebene. Abschließend wird in Abschnitt 3.2.7 eine optionale Möglichkeit zur Kaskadierung von Entscheidungsbäumen aufgezeigt mit dem Ziel, das Laufzeit- und Speicherverhalten der Suchstrategie weiter zu verbessern.

3.2.1 Betrachtung der Oberflächensichtbarkeit

In diesem Abschnitt soll die Sichtbarkeit der Werkstückoberfläche und deren Auswirkungen auf die Suchmenge eruiert werden, da die Gesamtheit eines Werkstücks für einen Betrachter nie vollständig erkennbar bzw. bei jeder Betrachtungsrichtung immer nur ein Teil der Werkstückoberfläche sichtbar ist. Die Relevanz der Sichtbarkeit begründet sich dann dadurch, dass die Lokalisierung eines Werkstücks im Ladungsträger grundsätzlich nur möglich ist, wenn von der Werkstückoberfläche in einer festzulegenden Vollständigkeit Sensormesswerte gewonnen werden können. Die Werkstückoberfläche muss demnach zu einem bestimmten Grad unverdeckt für den Sensor sichtbar sein. Dadurch kann die Sichtbarkeit zu einer konzeptionellen Einschränkung der Suchmenge führen, da nur diejenigen Werkstücklagen berücksichtigt werden müssen, die sich in noch zu definierender Nähe zu erhaltenen Sensormesswerten befinden.

Ziel soll es zunächst sein, die endliche Menge an sichtbaren Punkten ${}^{S}_{P}\widehat{\mathcal{M}}$ einer Werkstückoberfläche in Abhängigkeit von der Werkstückorientierung zu ermitteln, wobei eine Veränderung der Werkstückorientierung auch als Veränderung der Betrachtungsrichtung aufgefasst werden kann. Anschließend werden die sichtbaren Punkte im nächsten Abschnitt in einen Zusammenhang mit den Sensordaten gebracht.

Beschreibung der Werkstückoberfläche über Punktmenge

Die Werkstückgeometrie wird in dieser Arbeit durch ein Flächenmodell, bestehend aus einer Vielzahl von Dreiecken im Werkstückkoordinatensystem W, beschrieben. Zur Überführung dieser Darstellung zunächst in eine endliche Menge an Punkten in einem Bezugssystem S soll eine Rasterisierungsfunktion $f_{Raster,W}$ angewendet werden. Durch die Rasterisierung wird eine endliche und diskrete Menge an Punkten erhalten, die sich innerhalb der Dreiecksfläche befinden, wobei die Gitterschrittweite der verwendeten Gitterschrittweite des Sensorsystems entsprechen soll. Die prinzipielle Funktionsweise einer Rasterisierung soll in Abbildung 3-15 veranschaulicht werden.

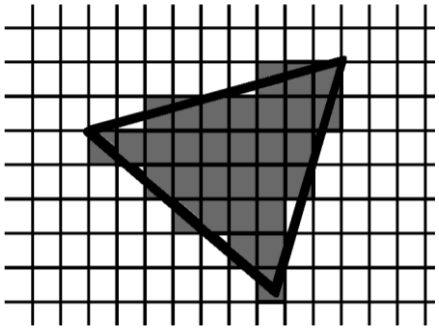

Abbildung 3-15 Rasterisierung eines Dreiecks im zweidimensionalen Fall.

Im Folgenden soll weiterhin angenommen werden, dass jeder erhaltene Punkt ein Punktkoordinatensystem beschreibt, dessen Orientierung für die spätere Bestimmung der Sichtbarkeit benötigt wird. Die Orientierung dieser Koordinatensysteme wird so festgelegt, dass die z-Komponenten parallel zur Oberflächennormale der zugehörigen Dreiecke verlaufen. Der Einfachheit halber werden die Punktkoordinatensysteme jedoch weiterhin als Punkte bezeichnet.

Im betrachteten Anwendungsfall wird die Rasterisierung im dreidimensionalen Raum durchgeführt, wodurch die resultierende endliche Menge von Punkten als eine Menge von Voxeln mit zusätzlichen Orientierungsinformationen betrachtet werden kann.

Sichtbare Werkstückoberfläche als Punktmenge

Das Ergebnis der Rasterisierungsfunktion $f_{Raster,W}$ enthält noch keine direkten Informationen über die Sichtbarkeit einzelner Punkte. Daher wird eine Renderfunktion $f_{Render,W}$ (auch: Bildsynthesefunktion) eingeführt, die auf die Rasterisierungsfunktion zurückgreift. Diese filtert genau jene Punkte aus der endlichen und diskreten Punktemenge, welche in einer bestimmten Lage ${}^{S}_{W}T$ des Werkstückkoordinatensystems im Sensorkoordinatensystem sichtbar sind.

Für die Sichtbarkeit eines Punkts sollen drei Bedingungen erfüllt sein, wobei davon ausgegangen wird, dass das Flächenmodell geschlossen sein muss, sich also keine Lücken in der Oberfläche befinden:

Zugewandte Oberflächennormale – Wird das Sensorkoordinatensystem S als Betrachter aufgefasst, so ist die erste Bedingung, dass die Oberflächennormale dem Betrachter nicht abgewandt sein darf. Unter der Annahme, dass die Betrachtungsrichtung die z-Achse des Bezugssystems S darstellt, soll gelten

$$\measuredangle\left({}^{S}_{P}e_z, \begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix}\right) > \frac{\pi}{2} \ . \tag{3.37}$$

Vor dem Betrachter befindlich – Die zweite Bedingung ist, dass sich ein sichtbarer Punkt nicht hinter dem Betrachter befinden darf. Der sichtbare Punkt muss sich im durch die xy-Ebene getrennten Halbraum mit positiver z-Komponente befinden

$${}^{S}_{P}\hat{t}_z > 0 \ . \tag{3.38}$$

Keine Abschattung – Die dritte Bedingung beschreibt die Abschattung eines Punkts. Ein Punkt ist immer dann sichtbar, wenn die Gerade eines sichtbaren Punkts zum Ursprung des Bezugssystems von keinem anderen Punkt der Oberfläche geschnitten wird. Hierfür folgt mit Hilfe der Geradengleichung

$${}^{S}_{P,1}\hat{t}\ \lambda \neq {}^{S}_{P,2}\hat{t} \quad \forall \quad {}^{S}_{P,2}\hat{t} \in {}^{S}_{P}\widehat{\mathcal{M}} \setminus \left\{{}^{S}_{P,1}\hat{t}\right\} \quad \wedge \quad \lambda \in \mathbb{R} \quad . \tag{3.39}$$

Die aufgeführten Annahmen beschreiben die Sichtbarkeit eines Werkstücks unter der Beobachtungsart der Zentralprojektion. Die Sichtbarkeit ist hierbei sowohl von der Orientierung als auch von der Position des Werkstücks abhängig, da zu unterschiedlichen Sensorpositionen auch unterschiedliche Tiefendaten derselben Werkstückorientierung erzeugt werden. Für die Renderfunktion $\mathrm{f}_{Render,W}$ folgt somit

$$f_{Render,W}\colon \mathbb{R}^{4\mathrm{x}4} \rightarrow \{\mathbb{R}^{4\mathrm{x}4}\} \ . \tag{3.40}$$

Die endliche Menge von sichtbaren Punkten ${}^{S}_{P}\widehat{\mathcal{M}}$ ist dann definiert als

$${}^{S}_{P}\widehat{\mathcal{M}} = f_{Render,W}\left({}^{S}_{W}\widehat{\mathrm{T}}\right) \ . \tag{3.41}$$

Zur Durchführung der Rasterisierung bzw. zum Rendern stehen sowohl freie als auch kommerzielle Programmbibliotheken zur Verfügung [Schroeder2006, Rost2009, Farber2011]. Weitere Informationen zur Berechnung können den Ergebnissen im Abschnitt 3.4.2 entnommen werden.

Vereinfachte Annahme einer Parallelprojektion

Wird der Abstand des Betrachters gegenüber der Werkstückgröße als sehr viel größer angenommen, kann die Zentralprojektion in eine Parallelprojektion überführt werden. Die Parallelprojektion kann demnach als unendlich weit entfernte Beobachtung oder als eine Beobachtung von einer Ebene aus verstanden werden. Wird die Annahme einer Parallelprojektion getroffen, so ist die Sichtbarkeit eines Werkstücks bzw. die Menge sichtbarer Punkte ausschließlich von seiner Orientierung und nicht von der relativen Position des Werkstücks gegenüber dem Sensor abhängig.

Diskussion der Parallelprojektion

Grundsätzlich ist die Annahme einer Parallelprojektion algorithmisch nicht zwingend notwendig. Da der Beobachtungsabstand bei den betrachteten Anwendungsfällen tatsächlich sehr viel größer als die Werkstückgröße ist, lassen sich hierüber allerdings einige Rechenschritte bei der Implementierung stark vereinfachen. Ein praktischer Vorteil der Parallelprojektion besteht beispielsweise in der Tatsache, dass für alle diskretisierten Werkstückorientierungen unabhängig von der Werkstückposition entsprechende Sichtbarkeiten vor der Ausführung der Suche in einer Datenbank hinterlegt werden können und nicht zwangsläufig neu berechnet werden müssen. Die Menge sichtbarer Punkte muss dann nur noch zur Position des Werkstücks im betrachteten Koordinatensystem verschoben werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der Vereinfachung der Fehlerrechnungen des Sensorsystems, wie sie beispielsweise in Abschnitt 4.4.5 bei der Bestimmung eines Annahmebereichs vorgenommen wird, da der auftretende Fehler näherungsweise nur entlang der z-Achse des Sensorkoordinatensystems auftritt.

Durch die vereinfachte Annahme der Parallelprojektion ist ein Teil der tatsächlich gemessenen Sensormesswerte eigentlich nicht sichtbar. Von der Ladungsträger-Innenwand wäre beispielsweise nur der obere Rand sichtbar, sofern die Betrachtung orthogonal zum Ladungsträgerboden erfolgt. Über ein Verfahren der emulierten Parallelprojektion [Palzkill2008, Ledermann2011] besteht die Möglichkeit die erhaltenen Sensormesswerte dahingehend zu bearbeiten, dass diese einer tatsächlichen Parallelprojektion noch stärker ähneln. Hauptkriterium zur Auswahl der Messwerte ist hierbei die Größe des Messwinkels, der per Definition direkt unterhalb des Sensors gleich Null ist. Es wird derjenige Messwert gewählt, der gegenüber einem anderen Mess-

wert mit gleicher lateraler Position den größeren Messwinkel aufweist. Eine zusätzliche Absicherung erfolgt durch die Betrachtung der Messwertnachbarschaft. Hieraus ergibt sich ein Zusatzkriterium, welches eine hohe Anzahl von Messwerten in der Nachbarschaft positiv bewertet.

Das beschriebene Verfahren der Parallelprojektion wird in der Bildverarbeitung auch bei der Erstellung von Tiefenbildern ausgenutzt, deren Erzeugung und Weiterverarbeitung seit einiger Zeit ein zentrales Forschungsthema der Bildanalyse darstellt [Jiang1997]. Ein Tiefenbild stellt eine Form der Datenstrukturierung von parallelprojizierten Tiefendaten dar, die hierfür orthogonal auf eine Bezugsebene projiziert werden. Durch gleichmäßige Diskretisierung dieser Bezugsebene wird ein Raster erzeugt, bei dem jeder Pixel den orthogonalen Abstand zur Ebene darstellt. Das Tiefenbild besitzt den Vorteil, dass aus der 2D-Bildverarbeitung sehr schnelle Auswertungsoperatoren und Verfahren zur Bildsegmentierung bekannt sind [Stotz2011], welche sich zumindest konzeptionell auf ein Tiefenbild übertragen lassen.

3.2.2 Beschreibung der Werkstücklage über interessante Punkte

In diesem Abschnitt soll ein Zusammenhang zwischen der sichtbaren Werkstückoberfläche und den Messwerten des Sensorsystems hergestellt werden, der zu einer konzeptionellen Reduzierung der Suchmenge mit Hilfe von interessanten Punkten führen kann. Interessante Punkte sollen eine Zwangsbedingung an die Werkstücklage stellen und in ihrer Form als Oberflächenmerkmal sowohl auf der Werkstückoberfläche als auch in den Sensormesswerten identifizierbar sein können. Die Zwangsbedingung wird dadurch realisiert, dass alle Werkstücklagen relativ zu interessanten Punkten ausgedrückt werden und im Folgenden dann als relative Werkstücklagen bezeichnet werden.

Definition eines interessanten Punkts

Interessante Punkte sollen ortsveränderliche Koordinatensysteme in Abhängigkeit von der Werkstückorientierung darstellen. Sie sind in dem Sinne ortsveränderlich, als dass ihre Position abhängig von der Orientierung des Werkstückkoordinatensystems W in einem Bezugssystem L ist. Da ein interessanter Punkt ein Oberflächenmerkmal darstellt, kann vorausgesetzt werden, dass es in der endlichen Menge an sichtbaren Punkten ${}^{S}_{P}\widehat{\mathcal{M}}$ der Werkstückoberfläche identifizierbar ist. Formal beschreibt das ortsveränderliche Koordinatensystem demnach die Lage ${}^{W}_{I}\hat{T}$ eines interessanten Punkts I aus der Menge aller sichtbaren Punkte ${}^{S}_{P}\widehat{\mathcal{M}}$ der Werkstückoberfläche in Abhängigkeit von der Orientierung ${}^{L}_{W}\hat{r}$ des Werkstücks im Ladungsträger L.

Die Informationen über die Kenngröße dieses Oberflächenmerkmals soll über seine gung k_I beschrieben werden. Wird die Anzahl verschiedener Ausprägungen mit N_K gekennzeichnet, so folgt

$$k_I = 1 \dots N_K \quad . \tag{3.42}$$

Die Orientierung des interessanten Punkts soll per Definition immer gleich der Orientierung des Bezugssystems L sein. Bezogen auf das Werkstückkoordinatensystem folgt in diesem Fall

$${}^{W}_{L}r = {}^{W}_{I}\mathrm{r} \ \wedge \ {}^{L}_{W}r = {}^{I}_{W}r \quad . \tag{3.43}$$

Beschreibung von Werkstücklagen relativ zu interessanten Punkten

Mit Hilfe des interessanten Punkts kann nun eine diskrete Werkstücklage ${}^{L}_{W}\hat{T}$ im Ladungsträger L in zwei Komponenten aufgespaltet werden, wobei ${}^{L}_{I}\hat{T}$ die Lage des interessanten Punkts im Bezugssystem L und ${}^{I}_{W}\hat{T}$ die Werkstücklage aus Sicht des interessanten Punkts beschreibt. In Abbildung 3-16 wird dieser Zusammenhang schematisch dargestellt.

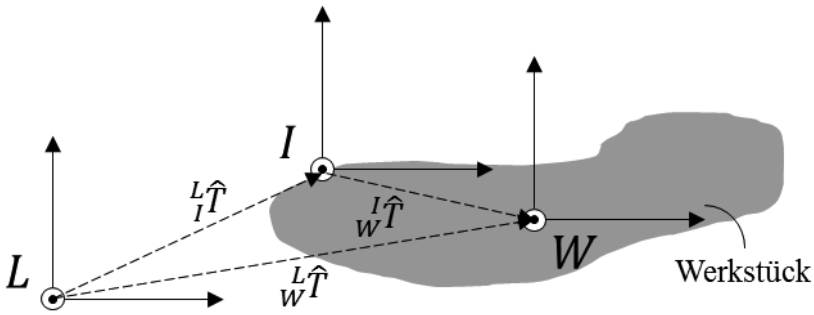

Abbildung 3-16 Beschreibung der Werkstücklage über einen interessanten Punkt, der sich auf der Werkstückoberfläche befindet.

Der interessante Punkt kann im Ladungsträgerkoordinatensystem vollständig über seine Position ${}^{L}_{I}\hat{\mathrm{t}}$ bestimmt werden, da seine Orientierung per Definition gleich dem Ladungsträger ist. Für die Lage des interessanten Punktes gilt

$${}^{L}_{I}\hat{\mathrm{T}} = ({}^{L}_{I}\hat{\mathrm{t}}) \quad . \tag{3.44}$$

Da die Suchmenge aus einer endlichen Anzahl von Orientierungen besteht, kann der Positionsvektor ${}^{I}_{W}\hat{\mathrm{t}}$ der relativen Werkstücklage für jede Drehung ${}^{L}_{W}\hat{r}$ und Merkmalsausprägung k_I zu einem laufzeitunkritischen Moment bestimmt und somit als bekannt angenommen werden. Der Zusammenhang zwischen dem interessanten Punkt und der Werkstücklage ist dann über die Ausprägung k_I und die Orientierung ${}^{L}_{W}\hat{r}$ des Werkstücks festgelegt zu

$$ {}^{I}_{W}\hat{\mathrm{T}} = ({}^{L}_{W}\hat{r}, k_I) \ . \tag{3.45} $$

Für die Werkstücklage ${}^{L}_{W}\hat{T}$ nach Aufspaltung in ihre beiden Komponenten folgt

$$ {}^{L}_{W}\hat{T} = {}^{L}_{I}\hat{\mathrm{T}}({}^{L}_{I}\hat{\mathrm{t}})\,{}^{I}_{W}\hat{\mathrm{T}}({}^{L}_{W}\hat{r}, k_I) \ . \tag{3.46} $$

Zum besseren Verständnis sollen zunächst die durchgeführten Schritte kurz zusammengefasst und in einer diskreten Schreibweise dargestellt werden. In die Gleichung (3.3), der allgemeinen Darstellung einer homogenen Koordinatentransformation, können nacheinander die Gleichungen (3.14), (3.8), (3.19), (3.46) und (3.43) eingesetzt werden und es ergibt sich

$$ \begin{aligned} {}^{L}x &= {}^{L}_{W}\hat{T}\left({}^{W}x\right) \\ &= {}^{L}_{W}f_R\left(f_{\Delta r}({}^{I}_{W}r)\right){}^{W}x + M_{\Delta t}\left({}^{L}_{I}t + {}^{I}_{W}t(f_{\Delta r}({}^{I}_{W}r), k_I)\right) \ . \end{aligned} \tag{3.47} $$

Die Gleichung (3.47) beschreibt nun die Werkstücklage über drei unbekannte Variablen

$$ {}^{L}_{W}\hat{T} = ({}^{L}_{I}t, {}^{I}_{W}r, k_I) \ , \tag{3.48} $$

der diskreten Position des interessanten Punkts ${}^{L}_{I}t$, der Ausprägung des interessanten Punkts k_I und der diskreten Orientierung des Werkstücks ${}^{I}_{W}r$ relativ zum interessanten Punkt. Formal ist zur Beschreibung einer diskreten Werkstücklage ein weiterer Parameter, die Ausprägung des interessanten Punkts, hinzugekommen. Tatsächlich zeigt sich, dass die gewählten Parameter sehr viel schneller und einfacher bestimmt werden können, da eine sequentielle Bestimmung möglich ist. Der Vorteil dieser Darstellung wird deutlicher, nachdem die interessanten Punkte durch lokale Extremwerte und deren Eigenschaften im Folgenden näher betrachtet wurden.

3.2.3 Notwendige Eigenschaften interessanter Punkte

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen für die interessanten Punkte sollen nun die notwendigen Eigenschaften interessanter Punkte erläutert werden, bevor die Umsetzung durch lokale Extremwerte erfolgen kann. Für einen interessanten Punkt im Sinne eines Merkmals soll gelten:

Diskretheit – Diskrete oder diskontinuierliche Merkmale zeichnen sich dadurch aus, dass sie endliche oder abzählbare, vorzugsweise wenige, Ausprägungen k_I annehmen können. Diese Eigenschaft ist zur robusten Identifizierung eines interessanten Punkts notwendig. Bei Merkmalen mit einer Vielzahl verschiedener Ausprägungen könnten Messwertabweichungen zu einer unkorrekt bestimmten Ausprägung führen, was eine erfolgreiche Erkennung erschweren würde. Aus Sicht der Datenverarbeitung und der Berechnungskomplexität wird hierüber auch der Aufwand

zum Vorhalten der von der Ausprägung abhängigen Werkstückposition ${}_{W}^{I}\hat{\mathrm{t}}$ reduziert. Die geforderte Diskretheit wird zu keinen allzu großen Einschränkungen führen, da allgemein die Möglichkeit einer Konvertierung kontinuierlicher Merkmale in diskrete Merkmale über die Verwendung von Histogrammen, wie sie beispielsweise bei der skaleninvarianten Merkmalstransformation [Lowe2004] durchgeführt wird, besteht.

Rauschinvarianz – Durch die Lagebeschreibung eines Werkstücks über einen interessanten Punkt folgt die Einschränkung, dass ein Werkstück nur dann auffindbar ist, wenn mindestens ein zugehöriger interessanter Punkt gefunden werden kann. Die Unempfindlichkeit des Oberflächenmerkmals gegenüber Rauschen ist somit eine unabdingbare Eigenschaft. Ansonsten könnten besonders bei lokalen Merkmalen Messwertfehler oder geringfügige Fertigungstoleranzen der Werkstücke, die häufig bei Rohlingen auftreten, zu einer unkorrekten Identifizierung führen.

Invarianz gegenüber geometrischen Verzerrungen – Die interessanten Punkte müssen sowohl in der berechneten sichtbaren Werkstückoberfläche als auch in den realen Messwerten unterschiedlicher Sensorsysteme identifiziert werden können. Zwischen diesen Aufnahmesystemen kann es zu Bildänderungen wie geometrischen Verzerrungen kommen. Beispielsweise wird die bereits getroffene Annahme einer Parallelprojektion je nach tatsächlich eingesetzter Sensorik unterschiedlich gut angenähert. Aus diesem Grund müssen die interessanten Punkte möglichst robust gegenüber der Beobachtungsart sein.

Im Rahmen der Beobachtungsart spielen auch Abschattungen eine wichtige Rolle. Beim Erfassen von Werkstücken kann es zu Selbst- und Fremdabschattungen kommen. Die Selbstabschattung ist geometriebedingt, was in bestimmten Werkstücklagen dazu führen kann, dass einzelne Werkstücksegmente Teile der Werkstückoberfläche verdecken. Die Fremdabschattung tritt erst im Zusammenspiel mehrerer als Schüttgut gelagerter Werkstücke auf und bedeutet, dass ein Werkstück in Teilen von einem anderen Werkstück verdeckt wird. Diese Effekte können bei der Sichtbarkeitsberechnung kaum berücksichtigt werden und sind auch im Ladungsträger schwer vorhersagbar. Interessante Punkte sollten daher unter verschiedensten Beobachtungsarten möglichst robust gegenüber Abschattungen sein.

Übertragbarkeit – Die Übertragbarkeit bezieht sich gleichermaßen auf das Lagespektrum und verschiedene Werkstückgeometrien. Der interessante Punkt muss alle möglichen Werkstückorientierungen abdecken, da entsprechende Drehungen ansonsten nicht lokalisierbar sind. Für einen möglichst universellen Einsatz der Objektlageerkennung sollte das ausgewählte Oberflächenmerkmal weiterhin auf beliebige Werkstückgeometrien anwendbar sein. Sollte dies nicht gewährleistet werden können, besteht die Alternative in der Verwendung eines Satzes von Merk-

malen, aus welchem anwendungsspezifisch eine Auswahl geeigneter Merkmale erfolgt. Dies soll in dieser Arbeit jedoch nicht näher betrachtet werden, da hierdurch der Einlernvorgang neuer Werkstücktypen erschwert wird (vgl. Abschnitt 4.5.1).

Robustheit von der Suchmengendiskretisierung – Der interessante Punkt soll weitgehend unabhängig von der gewählten Gitter- bzw. Winkelschrittweite des Werkstücks sein. Genauer ausgedrückt soll die Anzahl an identifizierbaren Oberflächenmerkmalen nur von konstanten Parametern abhängen. Bei einer veränderten Diskretisierung innerhalb sinnvoller Parameter soll die Anzahl der auf der Oberfläche auffindbaren interessanten Punkte nahezu gleich bleiben. Diese letzte geforderte Eigenschaft ist für die Reduzierung der Suchmenge elementar. Die Notwendigkeit wird bei der Repräsentierung der Suchmenge durch einen Entscheidungsbaum in Abschnitt 3.2.6 verdeutlicht.

Die in der Fachliteratur häufig bei Merkmalen geforderte Rotationsvarianz ist für dieses Verfahren nicht notwendig. Es ist legitim, dass das verwendete Merkmal für verschiedene Orientierungen verschiedene Ausprägungen annimmt oder an unterschiedlichen Positionen auftritt.

3.2.4 Lokale Extremwerte als interessante Punkte

Zur Bestimmung der interessanten Punkte sollen lokale Extremwerte als Merkmale auf der Oberfläche eines Werkstücks genutzt werden. Je nach verwendetem Koordinatensystem handelt es sich bei den Extremwerten um Maxima oder Minima. Das Maximum bzw. Minimum ist ein Begriff aus einem Teilgebiet der mathematischen Ordnungstheorie und bezeichnet das größte bzw. kleinste Element einer Menge. Analog dazu bezeichnet ein lokales Maxima das größte Element einer Teilmenge.

Per Definition sei festgelegt, dass es sich bei den Extremwerten um Maxima im Ladungsträgerkoordinatensystem handeln soll. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass Maxima im Ladungsträger eine bessere Sichtbarkeit gegenüber Minima aufweisen, da eine Abschattung unwahrscheinlicher ist. Auch wenn die vorgestellten Berechnungen teilweise im Sensorkoordinatensystem erfolgen, soll zur Vereinfachung der Begriff Maxima beibehalten werden. Streng genommen würde es sich in diesem Fall um Minima handeln, sofern sich der Sensor oberhalb des Ladungsträgers befindet, da diese Extremwerte den kürzesten Abstand zum Sensorsystem aufweisen.

Die Bestimmung eines Maximums in den Sensormesswerten ist aufgrund der arbiträren Topologie der Tiefenmessungen nicht trivial. Das hier vorgestellte Verfahren zeigt eine Möglichkeit zur effizienten Bestimmung lokaler Maxima und zeigt Ähnlichkeiten zur Berechnung multiskalarer Maxima und der maximal stabilen Volumen, die im Abschnitt 2.5 beschrieben wurden.

Die Größe eines Elementes, die zur Berechnung des Extremwerts herangezogen wird, soll über den z-Wert des Positionsvektors eines Sensormesswerts beschrieben sein. Zur Bestimmung eines lokalen Maximums muss dann das Gebiet bzw. Intervall festgelegt werden, in dem das betrachtete Element am größten sein soll. Dieses Gebiet soll eine Teilmenge der Sensormesswerte beschreiben. Die Berechnung der Teilmengen zur Identifikation der lokalen Maxima erfolgt durch das im Folgenden beschriebene Vorgehen.

Berechnung lokaler Maxima

Da alle Sensormesswerte ${}_P^L\widehat{\mathcal{M}}$ innerhalb des Ladungsträgers zur Oberfläche eines Werkstücks gehören können, werden sie als potentielle Kandidaten eines interessanten Punkts ${}_I^L\widehat{\mathrm{T}}$ betrachtet. Für die Menge der interessanten Punkte ${}_I^L\widehat{\mathcal{M}}$ folgt mit der Menge aller Sensormesswerte ${}_P^L\widehat{\mathcal{M}}$ innerhalb des Ladungsträgers

$$ {}_I^L\widehat{\mathcal{M}} \subset {}_P^L\widehat{\mathcal{M}} \quad . \tag{3.49} $$

Für jeden potentiellen Kandidaten ${}_I^L\widehat{\mathrm{T}}$ werden alle anderen Sensormesswerte in das Bezugssystem des interessanten Punkts transformiert. Hierüber wird dann die Menge der Sensormesswerte ${}_P^I\widehat{\mathcal{M}}$ erhalten. Aus den transformierten Sensormesswerten wird eine Teilmenge

$$ {}_P^I\widehat{\mathcal{M}}_{\Delta z} = \left\{ {}_P^I\hat{T} \in {}_P^I\widehat{\mathcal{M}} \,\middle|\, {}_P^I\hat{\mathrm{t}}_z + \Delta z \geq 0 \right\} \tag{3.50} $$

gebildet, zu der alle Messwerte gehören, die einen Höchstabstand Δz der z-Komponente ${}_P^I\hat{\mathrm{t}}_z$ nicht unterschreiten.

Werden nun die x- und y-Komponenten der verbleibenden Messwerte ${}_P^I\widehat{\mathcal{M}}_{\Delta z}$ auf die xy-Ebene des Koordinatensystems des interessanten Punktes projiziert, so bilden die Indizes i und j der x- und y-Komponenten einen Unterraum im $\mathbb{N}^2$, der als Binärbild aufgefasst werden kann. In diesem Binärbild ist ein Messwert genau dann ein interessanter Punkt, wenn er von allen anderen wegzusammenhängenden Messwerten im betrachteten Binärbild den höchsten z-Wert aufweist. Andersherum ist ein Messwert genau dann kein interessanter Punkt, wenn es einen wegzusammenhängenden Punkt gibt, der größer ist. In Abbildung 3-17 wird der beschriebene Zusammenhang visualisiert.

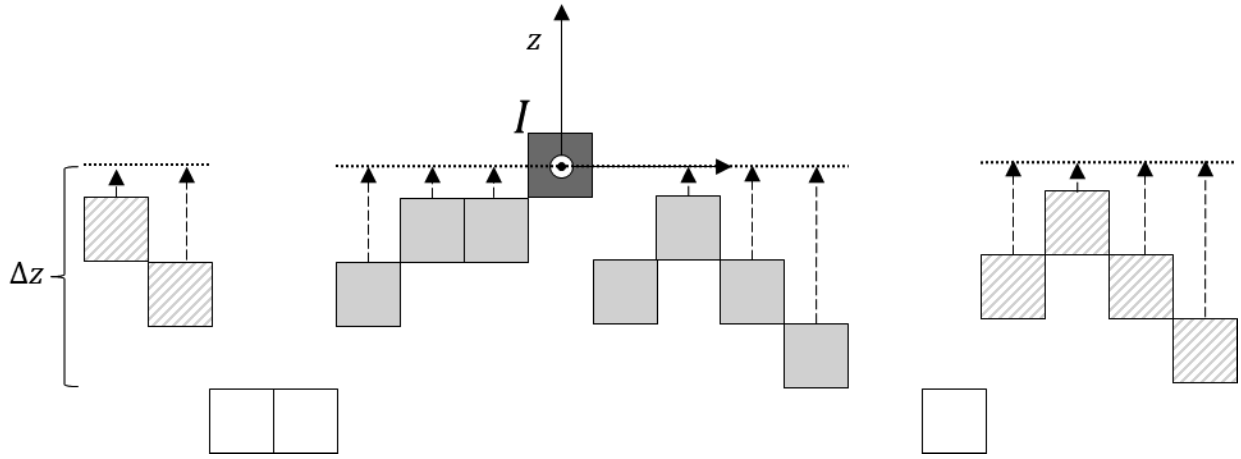

Abbildung 3-17 Berechnung eines interessanten Punkts, der in der Darstellung dunkelgrau markiert ist. Die schraffierten und hellgrauen Messwerte befinden sich innerhalb des Höchstabstands Δz, wobei die hellgrauen Messwerte das wegzusammenhängend Gebiet des interessanten Punkts kennzeichnen. Die weißen Messwerte befinden sich unterhalb des Höchstabstands Δz und werden nicht berücksichtigt.

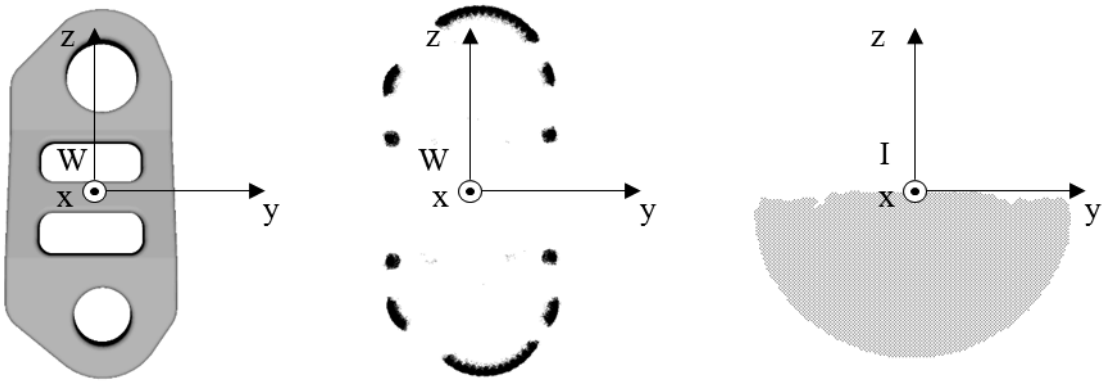

Abbildung 3-18 Interessante Punkte und resultierende relative Werkstücklagen. Links: Ein Kettenglied als exemplarisches Werkstück. Mitte: Gesamtheit aller gefundenen interessanten Punkte des Werkstücks nach Berücksichtigung aller möglichen Werkstückorientierungen, wobei in jeder Orientierung mindestens ein interessanter Punkt auftritt. Die interessanten Punkte sind als schwarze Punkte eingezeichnet. Rechts: Gesamtheit aller relativen Werkstücklagen zu interessanten Punkten. Die Werkstücklage ist durch den Werkstückmittelpunkt visualisiert und als graue Punkte eingezeichnet.

Zwangsbedingung für Werkstücklagen

Werden nun alle interessanten Punkte in allen möglichen diskreten Werkstückorientierungen bestimmt, so können hieraus alle möglichen relativen Werkstücklagen zu interessanten Punkten ermittelt werden. In Abbildung 3-18 sind die hierdurch erhaltenen Zwangsbedingungen dargestellt, die für einen interessanten Punkt die möglichen relativen Werkstücklagen beschreiben.

3.2.5 Eignung lokaler Extremwerte als interessante Punkte

In diesem Abschnitt sollen die Eigenschaften lokaler Extremwerte hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als interessante Punkte gemäß Abschnitt 3.2.3 betrachtet werden:

Diskretheit – Für jedes lokale Maximum ist eine diskrete Beschreibung möglich, wenn alle identifizierten lokalen Maxima einer Werkstückorientierung entsprechend ihrer Größe aufgereiht werden und ihre Ausprägung k_I dem Index ihrer Position entspricht. Über diese Festlegung wird allerdings deutlich, dass eine Bestimmung der Ausprägung in den Sensormesswerten auf diese Weise nicht zweckdienlich ist, da die Maxima in einer chaotischen Szene ganz andere Indexpositionen erhalten würden. Die Bestimmung der Ausprägung der lokalen Maxima wird daher implizit durch die Berechnung der relativen Werkstücklagen im Rahmen der Hough-Abstimmung in Abschnitt 4.4 durchgeführt.

Rauschinvarianz – Grundsätzlich kann ein lokales Maximum durch das Einwirken von Messfehlern an verschiedenen Positionen gefunden werden. Bei einer als hinreichend glatt angenommenen Werkstückoberfläche wird allerdings die Annahme getroffen, dass sich bei Messfehlern das lokale Maximum nur geringfügig in seiner Position ändert und in diesem Sinne eine hohe Invarianz gegenüber Messfehlern aufweisen kann.

Invarianz gegenüber geometrischen Verzerrungen – Lokale Maxima führen zu Abschattungen auf der Werkstückoberfläche, sind jedoch selbst weniger anfällig gegenüber Verdeckungen. Außerdem können sie auch mit unterschiedlichen Sensorsystemen robust erkannt werden, sodass eine hohe Invarianz gegenüber geometrischen Verzerrungen und Abschattungen zu erwarten ist.

Übertragbarkeit – Lokale Maxima können auf praktisch jeder Werkstückgeometrie erkannt werden und sind damit grundsätzlich für alle relevanten Werkstückoberflächen geeignet. Die Übertragbarkeit des Verfahrens auf andere Werkstücktypen ist somit gewährleistet.

Robustheit von der Suchmengendiskretisierung – Die Berechnung interessanter Punkte in den Eingangsdaten ist gemäß Gleichung (3.50) nur vom gewählten Höchstabstand Δz abhängig. Der Höchstabstand Δz selbst ist unabhängig von der gewählten Diskretisierungsschrittweite. In Abbildung 3-19 wurde die Robustheit der interessanten Punkte von der Suchmengendiskretisierung durch Variation der Gitterschrittweite Δt untersucht. Hierfür wurde die Gitterschrittweite innerhalb der für die betrachteten Anwendungsfälle relevanten Parameter zwischen einem und zwanzig Millimetern variiert. Obgleich die durchschnittliche Anzahl interessanter Punkte leicht variieren kann, sind die Unterschiede vergleichsweise gering. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass kleinere Strukturen auf der Werkstückoberfläche erst bei einer sehr kleinen Gitterschrittwei-

te korrekt abgebildet werden und erst dann als lokale Maxima auftreten können. Bei der Verwendung größerer Diskretisierungsschrittweiten konvergiert die Anzahl erwartungsgemäß gegen Eins, da irgendwann das gesamte Werkstück durch einen einzigen Messwert beschrieben würde. Für die betrachteten Werkstückgeometrien wird daher die Annahme getroffen, dass die Anzahl interessanter Punkte und damit auch die Anzahl ihrer Ausprägungen für die relevanten Gitterschrittweiten weitgehend unabhängig von der Suchmengendiskretisierung sind.

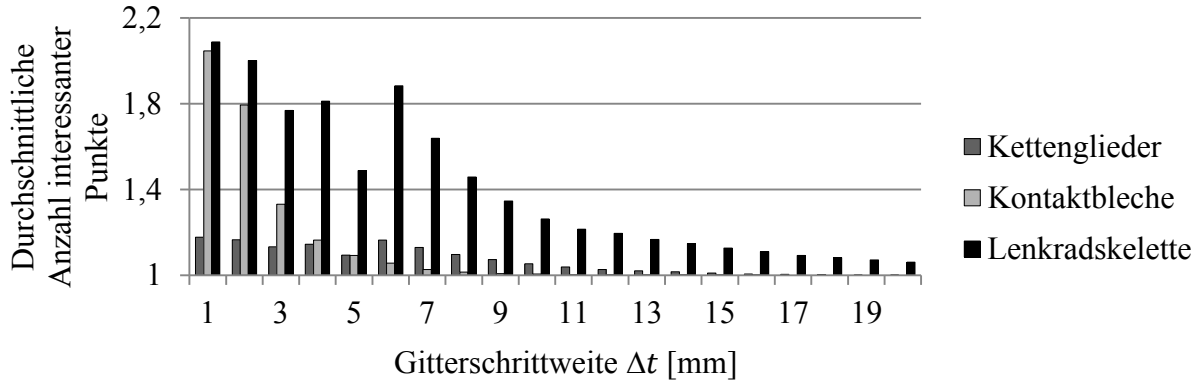

Abbildung 3-19 Veränderung der durchschnittlichen Anzahl interessanter Punkte in Abhängigkeit von der Gitterschrittweite. Die Anzahlen sind über alle möglichen Werkstückorientierungen gemittelt. Für die Werkstückfamilie der Kettenglieder wurden zehn Varianten, bei den Kontaktblechen und Lenkradskeletten jeweils zwei Varianten berücksichtigt.

3.2.6 Repräsentierung durch Entscheidungsbaum

In diesem Abschnitt wird der Entscheidungsbaum eingeführt, der die Suchmenge strukturiert und somit die Grundlage für die in Kapitel 4 vorgestellte Suchstrategie bildet. In Abschnitt 3.2.2 wurde bereits aufgezeigt, wie eine Werkstücklage ${}_{W}^{L}\hat{T}$ über zwei Komponenten bzw. homogene Koordinatentransformationen, der Lage eines interessanten Punkts ${}_{I}^{L}\hat{T}$ und der relativen Werkstücklage ${}_{W}^{I}\hat{T}$, dargestellt werden kann. Diese beiden Komponenten bilden nun die erste und zweite Ebene des Entscheidungsbaums, wodurch dieser einschließlich der Wurzel eine Tiefe von drei besitzt. Die schematische Darstellung des erhaltenen Entscheidungsbaums kann Abbildung 3-20 entnommen werden. Im Folgenden wird zunächst die resultierende Komplexität des Suchbaums bestimmt.

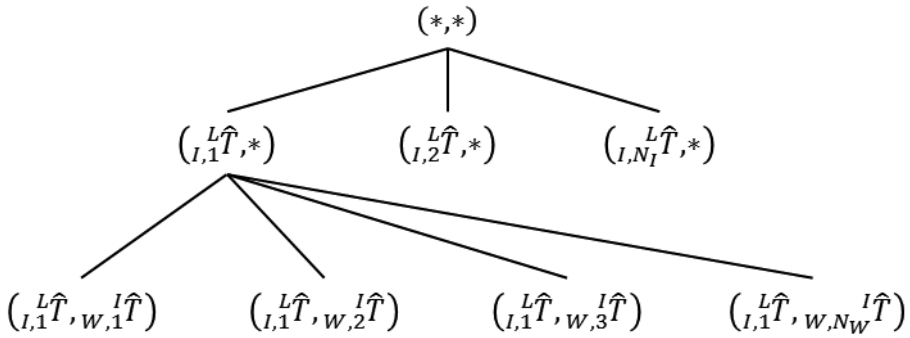

Abbildung 3-20 Entscheidungsbaum für die Objektlageerkennung. Die Bestimmung der interessanten Punkte erfolgt in der ersten Ebene und die Bestimmung der relativen Werkstücklagen in der zweiten Ebene. In der Darstellung wurden die Wurzel und der erste Knoten der ersten Ebene exemplarisch expandiert, wobei die noch unbestimmten Komponenten der Lösung mit einem Sternchen gekennzeichnet sind.

Anzahl interessanter Punkte

Die interessanten Punkte befinden sich in der ersten Ebene des Entscheidungsbaums, da ihre Bestimmung vor den relativen Werkstücklagen erfolgen muss. Sei die Anzahl der in den Sensormesswerten gefundenen interessanten Punkte mit N_I gekennzeichnet, so folgt über die Menge ${}_{I}^{L}\widehat{\mathcal{M}}$ an interessanten Punkten

$$N_I = \left|{}_{I}^{L}\widehat{\mathcal{M}}\right| \ . \tag{3.51}$$

Die Anzahl an interessanten Punkten N_I wird als unabhängig von der gewählten Suchmengendiskretisierung angenommen (vgl. Abschnitt 3.2.5), sodass die erste Ebene des Entscheidungsbaums für die Komplexität der Suchraumgröße vernachlässigt werden kann. Die Anzahl aller interessanten Punkte N_I hängt lediglich von der Werkstückgeometrie und der Bereitstellungsart der Werkstücke ab. Das bedeutet, dass die Anzahl interessanter Punkte steigt, wenn viele interessante Punkte in den jeweiligen Werkstückorientierungen eines Werkstücktypen gefunden werden. Außerdem steigt die Anzahl an interessanten Punkten, wenn die Bereitstellung auf einer großen Fläche erfolgt und sich somit viele Werkstücke im Sichtfeld des Sensorsystems befinden. In Abschnitt 3.4.3 wird gezeigt, dass die Anzahl an interessanten Punkten im Ladungsträger für die betrachteten Anwendungsfälle einen niedrigen zweistelligen Betrag annimmt.

Anzahl relativer Werkstücklagen

In der zweiten Ebene befinden sich die relativen Werkstücklagen, deren Anzahl größer als die möglichen Werkstückorientierungen ist, da in einer Werkstückorientierung mehrere interessante

Punkte auftreten können. Sei die Anzahl der relativen Werkstücklagen mit N_W bezeichnet, so folgt über die Gleichungen (3.23) und (3.42) mit der Anzahl möglicher Ausprägungen N_K eines interessanten Punkts und der Anzahl diskreter Werkstückorientierungen N_r

$$N_W = \left|{}_W^I\widehat{\mathcal{M}}\right| = N_K N_r \quad . \tag{3.52}$$

In Abschnitt 3.2.5 wurde bereits gezeigt, dass die auftretende Anzahl an Ausprägungen N_K der interessanten Punkte einen kleinen einstelligen Betrag annimmt und ebenfalls als unabhängig von der Suchmengendiskretisierung angenommen wird. Somit ist die Anzahl diskreter Werkstückorientierungen der einzige Parameter, der von der gewählten Suchmengendiskretisierung abhängig ist, wobei in Abschnitt 3.1.7 die Komplexität für die Orientierung mit $\mathrm{O}(n^3)$ identifiziert wurde.

Komplexität des Entscheidungsbaums

Aus den obigen Betrachtungen folgt, dass die Suchbaumgröße insgesamt ebenfalls eine Komplexität von $\mathrm{O}(n^3)$ besitzt. Die ursprüngliche Komplexität des Suchraums von $\mathrm{O}(n^6)$ konnte somit signifikant reduziert werden. Der Suchbaum bietet damit eine sehr viel günstigere Voraussetzung für die folgende Suchstrategie, eine gültige Lösung nach möglichst kurzer Zeitdauer zu finden.

Bei der Bestimmung interessanter Punkte in den Sensormesswerten entstehen zusätzliche Zeitaufwände. Der reduzierten Komplexität der Daten steht prinzipiell eine steigende Komplexität des Algorithmus gegenüber, der für die Erstellung des Suchbaums benötigt wird. Die Komplexität zur Erstellung des Suchbaums bezogen auf die Diskretisierung wird dabei mit $\mathrm{O}(n^2)$ angenommen, da die Identifizierung der interessanten Punkte auf der gemessenen Oberfläche und nicht im gesamten Raum stattfindet. Hieraus wird deutlich, dass der signifikanten Suchraumreduktion ein verhältnismäßig geringer Zeitaufwand gegenübersteht.

3.2.7 Kaskadierung von Entscheidungsbäumen

Der bisher dargestellte Entscheidungsbaum ist prinzipiell geeignet, um hiermit eine Objektlageerkennung durchführen zu können. In diesem Abschnitt soll eine optionale Erweiterung vorgestellt werden, welche eine höhere Genauigkeit der Lokalisierung ermöglichen bzw. das Laufzeit- und Speicherverhalten der Suchstrategie verbessern kann. Im weitesten Sinne kann der vorgestellte Ansatz als Möglichkeit zur Feinanpassung von Werkstücklagen aufgefasst werden, die sich konzeptionell in das vorgestellte Schema des Suchraums und der noch folgenden Suchstrategie einfügen lässt.

Untersuchbäume

Der Ansatz besteht im stufenförmigen Anordnen mehrerer Entscheidungsbäume. Hierfür wird zu jedem Lösungskandidaten, einem interessanten Punkt ${}_{I}^{L}\hat{T}$ und einer relativen Werkstücklage ${}_{W}^{I}\hat{T}$, ein Untersuchbaum gebildet, sofern der Lösungskandidat selbst noch keine gültige Lösung darstellt bzw. die Lösungsgüte noch verbessert werden soll. Dies kann immer dann der Fall sein, wenn die gewählte Diskretisierungsschrittweite nicht ausreichend ist, um die tatsächlich vorliegende Werkstücklage hinreichend genau zu beschreiben. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Lösungskandidat selbst zwar keine zufriedenstellende Güte besitzt, sich aber bereits in der Nähe der tatsächlichen Lösung befindet, so dass eine Untersuchung der lokalen Nachbarschaft des Lösungskandidaten zielführend sein kann. An dieser Stelle sei bereits auf Abbildung 4-11 verwiesen, in der gezeigt wird, dass die Bewertungen ähnlicher Werkstücklagen zu ähnlichen Gütebewertungen führen können.

Der hierfür verwendete Untersuchbaum sei so definiert, dass er die halbe Gitterschrittweite des Suchbaums Δt aufweist. Es gilt

$$\Delta t_{Untersuchbaum} = \frac{\Delta t}{2} \,. \tag{3.53}$$

Über den als linear angenommenen Zusammenhang zwischen Winkel- und Gitterschrittweite folgt

$$\Delta r_{Untersuchbaum} = \frac{\Delta r}{2} \,. \tag{3.54}$$

Weiterhin soll für den Untersuchbaum gelten, dass dieser ausschließlich Elemente enthält, welche eine lokale Nachbarschaft des Lösungskandidaten beschreiben. Die Größe der lokalen Nachbarschaft sei so festgelegt, dass sie ausschließlich Elemente enthält, deren Abstand zum Lösungskandidaten geringer ist als die Gitterschrittweite Δt des Suchbaums. Über die mit Gleichung (3.30) eingeführte Metrik d_T wird ersichtlich, dass es sich bei der Gitterschrittweite Δt um den minimalen Abstand zwischen zwei Elementen des Suchbaums handelt.

Für alle interessanten Punkte des Untersuchbaums ${}_{I}^{L}\hat{T}_{Untersuchbaum}$ soll dann gelten, dass sie einen geringeren Abstand d_T zum interessanten Punkt ${}_{I}^{L}\hat{T}$ aufweisen als die Gitterschrittweite Δt. Analog folgt für alle relativen Werkstücklagen des Untersuchbaums ${}_{W}^{I}\hat{T}_{Untersuchbaum}$, dass sie einen geringeren Abstand d_T zur relativen Werkstücklage ${}_{W}^{I}\hat{T}$ aufweisen als die Gitterschrittweite Δt. Somit folgt für den Abstand

$$d_T\left({}^{L}_{I}\hat{T}_{Untersuchbaum}, {}^{L}_{I}\hat{T}\right) < \Delta t \text{ und}$$
$$d_T\left({}^{I}_{W}\hat{T}_{Untersuchbaum}, {}^{I}_{W}\hat{T}\right) < \Delta t \ . \quad (3.55)$$

Die beschriebene Kaskadierung soll in Abbildung 3-21 noch einmal veranschaulicht werden. Weiterhin ist es konzeptionell auf gleiche Weise möglich, mehrere Untersuchbäume zu kaskadieren bzw. Untersuchbäume von Untersuchbäumen zu bilden und damit die mögliche Erkennungsgenauigkeit weiter zu erhöhen.

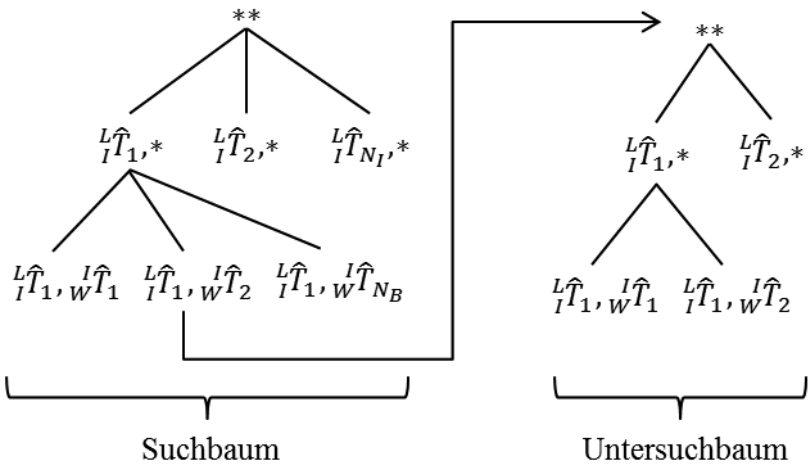

Abbildung 3-21 Kaskadierung von zwei Entscheidungsbäumen. Die Lösungskandidaten eines Suchbaums werden verwendet, um im Untersuchbaum gezielt den erwarteten Lösungsbereich näher zu untersuchen.

Komplexität der Untersuchbäume

Die Größe eines Untersuchbaums ist unabhängig von der gewählten Diskretisierung und variiert mit der Anzahl an interessanten Punkten, die innerhalb der lokalen Nachbarschaft gefunden werden können, wobei diese typischerweise sehr gering ist. Je nach gewählter Parametrierung der Objektlageerkennung kann gezeigt werden, dass ein Untersuchbaum eine Größe von hundert bis tausend Elementen aufweist und während eines Suchdurchlaufes weit weniger als hundert Untersuchbäume verwendet werden, sodass durch die Einführung von Untersuchbäumen die effektive Suchraumgröße lediglich um einen drei- bis höchstens fünfstelligen Betrag ansteigt. Unter der Annahme, dass sowohl Größe als auch Anzahl der verwendeten Untersuchbäume unabhängig von der Suchmengendiskretisierung sind, folgt, dass die Verwendung von Untersuchbäumen die Komplexität der Suchmenge nicht verändert und im Kontext der Suchraumgröße vernachlässigbar sein soll.

3.3 Filterung der Suchmenge

Die Bildung der Suchmenge in den vorangehenden Abschnitten geschah für den allgemeinen Fall einer chaotischen Bereitstellung, bei dem jedwede Werkstückorientierung auftreten kann, eindeutig durch ihre Sichtbarkeit bestimmt ist und durch das Greifsystem gegriffen werden kann. Unter Berücksichtigung der spezifischen Werkstückgeometrie und des Greifsystems soll nun im Folgenden aufgezeigt werden, dass diese Einflüsse in der Praxis ein anwendungsspezifisches Potenzial zur zusätzlichen Suchmengenreduktion aufweisen. In solchen Fällen ist es unter Umständen möglich, die Suchmenge um mehr als den Faktor zwei zu reduzieren.

Identische Sichtbarkeiten

Unter identischen Sichtbarkeiten werden diejenigen Werkstückorientierungen verstanden, die unter derselben Betrachtungsrichtung nicht voneinander unterscheidbar sind. Besonders intuitiv ist dieser Sachverhalt bei Rotationskörpern, bei denen eine Drehung um eine Rotationsachse zur gleichen sichtbaren Werkstückoberfläche führt. Wenn keine Unterscheidung der Werkstückorientierungen möglich ist, können die redundanten Werkstückorientierungen aus der Suchmenge entfernt werden.

Für den Fall eines rotationssymmetrischen Werkstücks, beispielsweise einer Getriebewelle, ist die mögliche Reduktion der Suchmenge signifikant, da durch die unberücksichtigte Rotationsachse nur fünf Freiheitsgrade des Werkstücks existieren. Eine weitere mögliche Konstellation wird in Abbildung 3-22 veranschaulicht, bei der die Drehung eines Zahnrades um eine Rotationsachse wiederholt zur selben Sichtbarkeit führt.

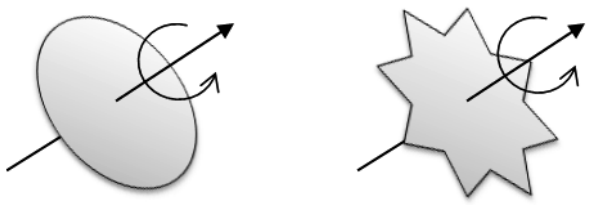

Abbildung 3-22 Identische Sichtbarkeiten von Werkstücken bei Drehung um eine Achse. Links: Bei einer Kreisscheibe sind alle Sichtbarkeiten identisch. Rechts: Bei einem Zahnrad führt die Drehung um einen bestimmten Winkel wiederholt zur gleichen Sichtbarkeit, sodass ein Großteil der Werkstückorientierungen identisch ist.

Für die Suchmenge folgt das allgemeine Filterkriterium, dass nur diejenigen Werkstückorientierungen berücksichtigt werden sollen, welche zu unterschiedlichen Sichtbarkeiten führen. Formal

folgt für die Suchmenge somit, dass alle Werkstücklagen unberücksichtigt bleiben, welche die gleiche Menge sichtbarer Oberflächenpunkte aufweisen. Eine diesbezügliche Berechnung kann automatisiert über die Renderfunktion vorgenommen werden, sodass für alle verbleibenden Werkstückorientierungen

$$f_{Render,W}\left({}^{S}_{W,i}\hat{\mathrm{r}}\right) \neq f_{Render,W}\left({}^{S}_{W,j}\hat{\mathrm{r}}\right) \quad \forall \; i,j = 1 \ldots N_r \wedge i \neq j \tag{3.56}$$

gelten muss.

Greifmöglichkeiten

Eine Greifmöglichkeit kennzeichnet eine Stellung des Greifsystems gegenüber dem Werkstück, in der ein stabiler Griff zur anschließenden Handhabung des Werkstücks erfolgen kann. Diese Greifmöglichkeiten werden auch Greifpunkte genannt und sind vom verwendeten Greifsystem und der Werkstückgeometrie abhängig. Zur Handhabung eines lokalisierten Werkstücks wird davon ausgegangen, dass es eine oder idealerweise mehrere unterschiedliche Greifmöglichkeiten aufweisen muss.

Kann jedoch ein Werkstück beispielsweise nur auf der Oberseite gegriffen werden, so kann dieser Greifpunkt, wenn das Werkstück mit der Oberseite auf dem Ladungsträgerboden liegt, prinzipiell nicht durch das Greifsystem erreicht werden bzw. ist eine kollisionsfreie Entnahme durch das Greifsystem nicht möglich. Die Objektlageerkennung dient dem Zweck der Werkstückentnahme und nicht primär der Szenenauswertung als Selbstzweck. Falls es also konzeptionell nicht-greifbare Werkstücklagen gibt, so kann die Annahme getroffen werden, dass diese Orientierungen auch nicht lokalisiert werden müssen und in der Suchmenge keine Berücksichtigung finden sollen.

Unwahrscheinliche Orientierungen

Abhängig sowohl von der Werkstückgeometrie als auch von der Werkstückbereitstellung ist es möglich, dass das Auftreten bestimmter Werkstücklagen nahezu ausgeschlossen werden kann. Das Werkstück wird dann mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht in entsprechenden Orientierungen auftreten. Je nach Bereitstellungsart kann dies beispielsweise auf stehende Werkstücke zutreffen. Insbesondere bei Förderbändern kann dieser Fall durch fehlende Seitenwände auftreten. Falls diese Orientierungen trotzdem auftreten sollten, so ist ihre Lage dann meist derart instabil, dass sie durch die Entnahme benachbarter Werkstücke ihre Orientierung verlieren. Für die als unwahrscheinlich klassifizierten Orientierungen kann die anwendungsspezifische Filterung der Suchmenge analog zu den Greifmöglichkeiten stattfinden.

Eine Übersicht der erhaltenen Rotationsmengen durch verschiedene Filterergebnisse kann Abbildung 3-23 entnommen werden.

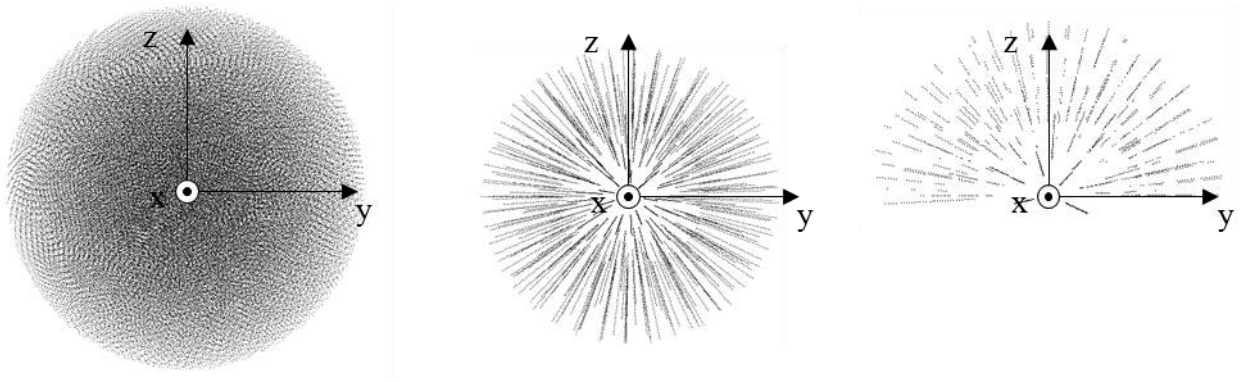

Abbildung 3-23 Darstellung verschiedener Rotationsmengen mit Hilfe modifizierter Kugelkoordinaten mit Rollwinkel, wobei jeder Punkt für eine Werkstückorientierung steht. Links: Abbildung aller möglichen Rotationen für eine Winkelauflösung von etwa 4°. Mitte: Rotationen bei einer Winkelauflösung von 10° und einer Beschränkung der Drehung um die z-Achse im körpereigenen Koordinatensystem zwischen -45° und 45° für einen Fall, bei dem diese Orientierungen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht auftreten können. Rechts: Filterung der konzeptionell nicht greifbaren Werkstückorientierungen durch die Beschränkung des Polarwinkels auf 0° bis 90° bei einer Winkelauflösung von 10°.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Diskretisierungsschrittweite

Bei der Festlegung sinnvoller Diskretisierungsschrittweiten des Suchraums wird das Sensorsystem näher betrachtet, da das Sensorsystem die maximal erreichbare Genauigkeit der Objektlageerkennung vorgibt. Sollte die hierdurch erreichbare Erkennungsgenauigkeit nicht ausreichen, werden im Anschluss die Möglichkeiten zur mechanischen Genauigkeitssteigerung kurz aufgeführt.

Sensorsystem

Die Sensorgenauigkeit beschreibt die Messgenauigkeit der Abstandswerte im Sensorkoordinatensystem S. Exemplarisch soll die Abschätzung der Sensorgenauigkeit für den Linienprofilsensor Sick LMS 400 durchgeführt und hierüber Richtwerte für die Gitterschrittweiten Δt_x, Δt_y und Δt_z bestimmt werden. Der Sick LMS 400 wird zur Generierung einer flächigen Punktewolke orthogonal zur Scanlinie um seinen Nullpunkt mit einer externen Kinematik geschwenkt.

Die Lichtpulse werden von der Beleuchtungseinheit mit einer Winkelauflösung β ausgesendet, worüber sich die Gitterschrittweite Δt_x bestimmen lässt (siehe Abbildung 3-24).

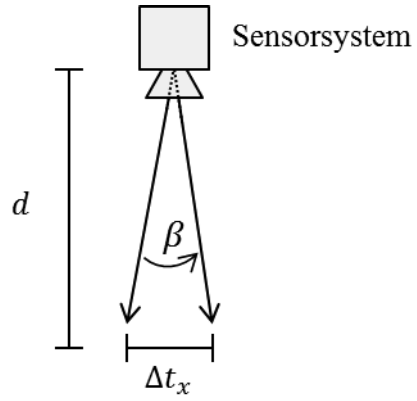

Abbildung 3-24 Abschätzung der Gitterschrittweite Δt_x eines Tiefensensors bei gegebener Winkelauflösung β in Abhängigkeit vom vertikalen Messabstand d.

Unter der Annahme, dass die Winkelauflösung β sehr klein ist und sich die erfasste Szene mit vergleichsweise großem Abstand direkt unterhalb des Sensors befindet, kann der Tangens linearisiert werden. Somit folgt für die laterale Sensorauflösung entlang der Scanlinie, die gleich der Gitterschrittweite Δt_x gesetzt wird, bei einem Messabstand d

$$\Delta t_x \geq \tan\frac{\beta}{2} 2d \quad \xrightarrow{linearisert} \quad \Delta t_x \geq\approx \beta d \quad . \tag{3.57}$$

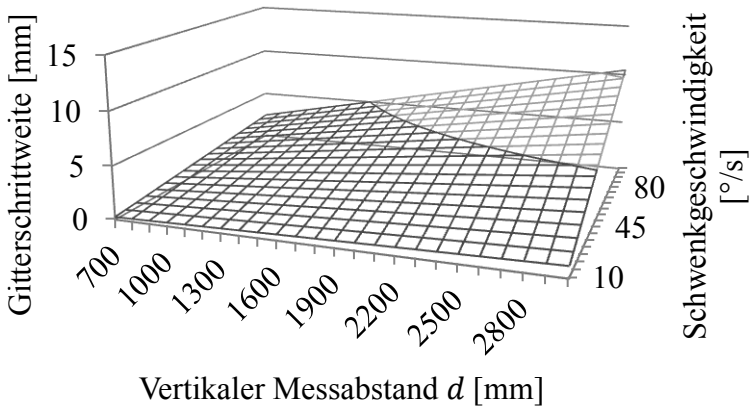

Abbildung 3-25 Gitterschrittweite Δt_y in Abhängigkeit der Schwenkgeschwindigkeit und dem vertikalen Messabstand für den Sensor Sick LMS 400 bei einer Scanfrequenz von 500 Hz.

Mit der sensorspezifischen Scanfrequenz, die die Anzahl von Scanlinien pro Sekunde angibt, kann die laterale Auflösung orthogonal zur Scanlinie in Abhängigkeit der Schwenkgeschwindig-

keit und dem Messabstand bestimmt werden, wobei diese gleich der Gitterschrittweite Δt_y gesetzt werden soll. Die resultierenden Gitterschrittweiten Δt_y können der Abbildung 3-25 entnommen werden.

Die Genauigkeit des Sensors entlang des Lichtimpulses soll näherungsweise als Messgenauigkeit in z-Richtung und als Gitterschrittweite Δt_z aufgefasst werden. Soll nun die gewählte Gitterschrittweite Δt in allen Richtungen konstant sein, so müssen die Schwenkgeschwindigkeit und die Winkelauflösung β entsprechend angepasst werden:

Wird ein Versuchsaufbau betrachtet, bei dem der Messabstand zum Kistenboden 2,5 Meter beträgt, ergibt sich eine laterale Gitterschrittweite von 3 mm bei einer Schwenkgeschwindigkeit von 30°/s und einer Winkelauflösung β von 0.1°. Bei einem ideal angenommenen Remissionswert der Werkstücke entspricht dies der Messgenauigkeit entlang des Lichtimpulses, welche in diesem Fall laut Herstellerangaben ebenfalls etwa 3 mm beträgt [Sick2013]. Diese Abschätzungen können als Anhaltspunkt zur Festlegung der Diskretisierungsschrittweiten in der Praxis verwendet werden.

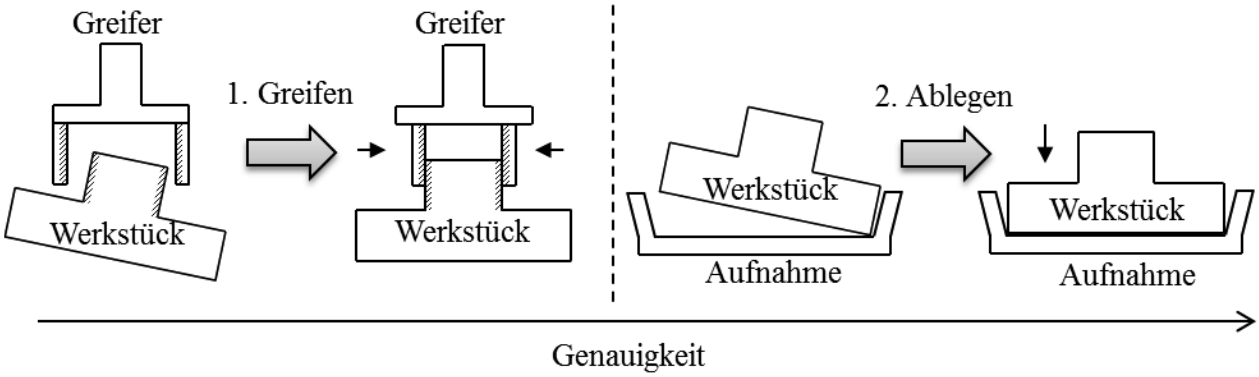

Abbildung 3-26 Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung durch mechanische Nachzentrierung bei einem Zweifingergreifer (links) und einer Werkstückaufnahme beim Ablegen des Werkstück zur Übergabe an einen nachfolgenden Fertigungsschritt (rechts).

Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung der Werkstücklage

Falls durch die Objektlageerkennung keine ausreichende Lokalisierungsgenauigkeit erreicht werden kann, da die Genauigkeitsanforderungen die Sensorgenauigkeit überschreiten, besteht die Möglichkeit einer mechanischen Nachzentrierung. Die Zentrierung kann sowohl über ein mechanisches Greifsystem als auch über die Werkstückaufnahme realisiert werden (siehe Abbildung 3-26). Bei der Werkstückaufnahme ist in diesem Fall eine werkstück-spezifische Zentrier-

vorrichtung erforderlich. Typische Elemente einer Zentriervorrichtung sind Zentrierstifte oder -dornen, aber auch Führungsschienen und Rutschbahnen.

3.4.2 Berechnungsdauer der Sichtbarkeit

Für das vorgestellte Verfahren müssen die sichtbaren Oberflächen einer Vielzahl verschiedener Werkstückorientierungen mit Hilfe der Renderfunktion berechnet werden. Die sichtbare Oberfläche wird beispielsweise zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen interessanten Punkten und relativer Werkstücklage sowie für die in Abschnitt 4.4 vorgestellte Hough-Abstimmung benötigt. Unter anderem bei der Kaskadierung von Entscheidungsbäumen kann es darüber hinaus notwendig sein, auf die sichtbare Oberfläche einer Werkstückorientierung während der Suche zuzugreifen, wofür prinzipiell zwei sich ergänzende Maßnahmen zur Verfügung stehen.

Zum einen besteht die Möglichkeit der Verwendung eines Pufferspeichers, in dem alle Sichtbarkeiten abgespeichert werden. Dies ist prinzipiell möglich, da eine endliche Menge an diskreten Werkstückorientierungen existiert. Die Bestimmung der Sichtbarkeit kann dann einmalig ausgeführt werden, sodass sich nur die Zugriffszeit auf diese Datenbank auf die effektive Suchlaufzeit auswirkt. Je nach Werkstückgröße und der gewählten Diskretisierungsschrittweiten sowie der verwendeten Recheneinheit ist das Ablegen aller Sichtbarkeiten in einer Datenbank jedoch nicht immer möglich.

Zum anderen besteht die zweite Maßnahme zur Optimierung dann in der Beschleunigung der Sichtbarkeitsberechnung. Für die Tests der Berechnungsdauer sichtbarer Werkstückoberflächen wurden die Varianten von VTK [Schroeder2006], OpenGL [Rost2009], CUDA [Farber2011] und eine speziell für diesen Anwendungsfall entwickelte Renderfunktion verwendet. Die entwickelte Renderfunktion ist für die Berechnung der sichtbaren Oberfläche eines einzelnen Werkstücks optimiert, während die bestehenden Ansätze für das Rendern komplexer Szenen entwickelt wurden, wie sie beispielsweise in Videospielen zum Einsatz kommen. Diese Szenen enthalten typischerweise Farbinformationen, wie Texturen und Schatten, und weitere rechenintensive Lichteffekte, die für diese Aufgabenstellung nicht benötigt werden. Die größte Geschwindigkeitssteigerung konnte wahrscheinlich durch die Vermeidung von Fließkommazahlen und die Verwendung einer Festkomma-Arithmetik erzielt werden, da auch auf modernen Recheneinheiten eine Multiplikation von Ganzzahlen weniger Zeit gegenüber der Fließkommadarstellung benötigt. Für ein mit der Programmiersprache C++ kompiliertes Testprogramm dauerte die Multiplikation mit Fließkommazahlen durchschnittlich fünf Mal länger als die Ganzzahlmultiplikation.

Die Abbildung 3-27 zeigt, dass das Festkomma-Rendering aufgrund seiner dezidierten Implementierung gegenüber den am Markt verfügbaren Varianten deutlich besser abschneidet.

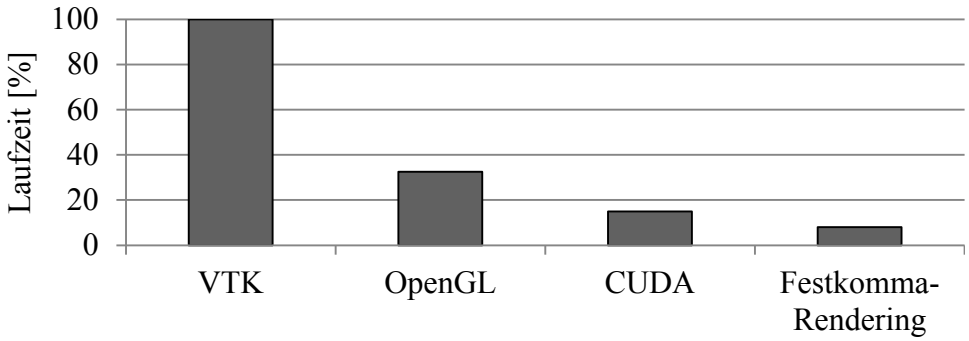

Abbildung 3-27 Vergleich der Laufzeiten verschiedener Renderfunktionen zur Berechnung der sichtbaren Werkstückoberfläche. Die Performance beim Rendern reiner Tiefeninformationen steigt von links nach rechts. Die Messreihe wurde mit einer Recheneinheit mit 8 Kernen à 3 GHz, 8 GB Arbeitsspeicher und einer 2 GB Grafikkarte mit 3D-Beschleuniger erstellt.

3.4.3 Interessante Punkte in Sensormesswerten

In diesem Abschnitt soll eine Untersuchung erfolgen, wie viele interessante Punkte in den Sensormesswerten auftreten. In Abschnitt 3.2.4 wurde bereits die Annahme getroffen, dass die Anzahl an interessanten Punkten bzw. deren Ausprägungen weitgehend unabhängig von der Suchmengendiskretisierung ist. Hier wurde gezeigt, dass durchschnittlich ein bis zwei interessante Punkte auf der sichtbaren Oberfläche einer Werkstückorientierung bestimmt werden können. Für die Untersuchung von im Haufwerk bereitgestellten Werkstücken wird zunächst die Situation in einem Ladungsträger und anschließend auf einem Förderband betrachtet.

Ladungsträger

In Abbildung 3-28 ist erkennbar, dass die Anzahl interessanter Punkte innerhalb eines Ladungsträgers zwischen eins und dreißig variiert. Die Szenen im Ladungsträger unterscheiden sich einerseits durch das individuelle Lagenmuster der Werkstücke und andererseits durch den unterschiedlichen Füllgrad des Ladungsträgers. Im Laufe der iterativen Entnahmevorgänge leert sich der Ladungsträger, wobei bei einem niedrigen Füllstand erwartungsgemäß weniger bis keine interessanten Punkte ausgemacht werden.

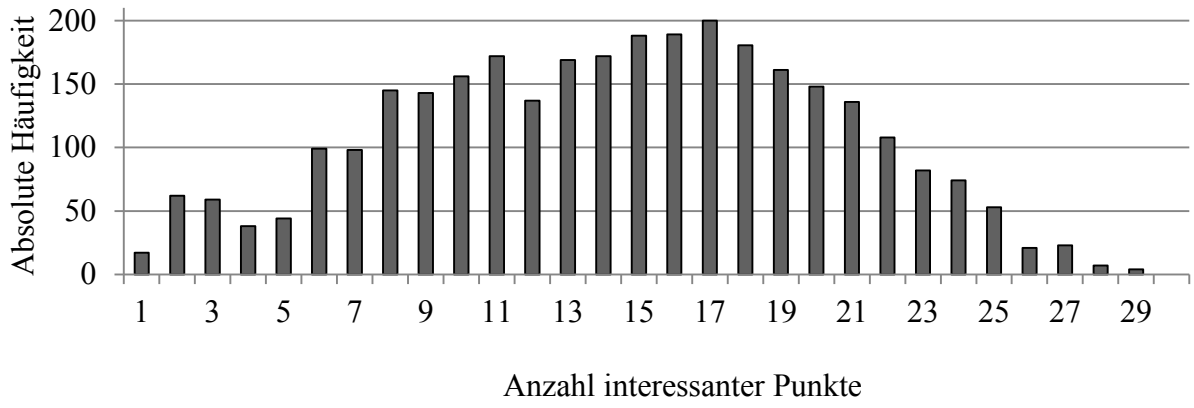

Abbildung 3-28 Anzahl an interessanten Punkten in einer Punktewolke. Es wurden 3.086 verschiedene Szenen eines Ladungsträgers ausgewertet.

In Abbildung 3-29 wird die unterschiedliche Anzahl interessanter Punkte im Ladungsträger bei großen und kleinen Werkstücken betrachtet. Beide Werkstücktypen aus der Werkstückfamilie der Kettenglieder besitzen etwa die gleiche Anzahl an interessanten Punkten auf ihrer Oberfläche. Ist der Ladungsträger mit verhältnismäßig großen Werkstücken gefüllt, so werden weniger interessante Punkte in den Sensormesswerten ausgemacht. Die größeren Werkstücke besitzen eine größere Oberfläche, sodass bei einer typischen Bereitstellungssituation weniger Werkstücke in den oberen Lagen des Ladungsträgers sichtbar sind.

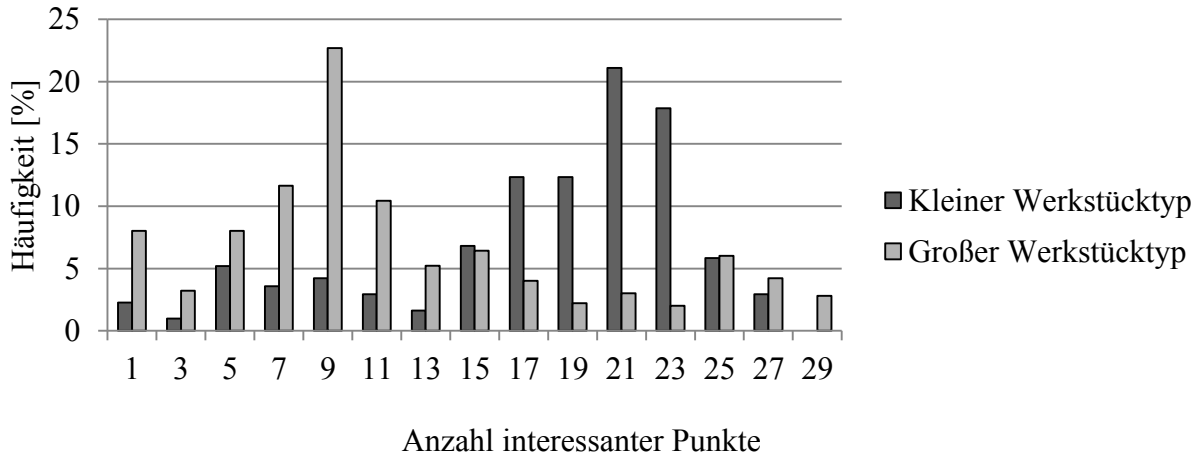

Abbildung 3-29 Anzahl an interessanten Punkten im Ladungsträger für einen kleinen und einen großen Werkstücktyp.

Förderband

In Abbildung 3-30 wird die resultierende Anzahl interessanter Punkte auf Förderbändern untersucht, auf denen die Werkstücke ebenfalls im Haufwerk, also chaotisch, bereitgestellt werden.

Die Anzahl interessanter Punkte variiert in diesem Fall in einem etwas geringeren Intervall als beim Ladungsträger, ebenfalls jedoch mit einer kleineren zweistelligen Anzahl.

Die Tatsache, dass zu keinem Zeitpunkt überhaupt keine interessanten Punkte gefunden werden, kann über den anwendungsspezifischen Aufbau der Anlage erklärt werden. Bei dem betrachteten Förderband wird mit zusätzlichen Lichttastern der Füllstand überwacht. Das Förderband wird vor einem erneuten Zyklus der Objektlageerkennung gegebenenfalls solange weiter getaktet, bis sich wieder Werkstücke in ausreichender Menge unterhalb des Sensorsystems befinden. Weiterhin befinden sich aufgrund der peripheren Komponenten um das Förderband zu jedem Zeitpunkt Störkonturen in der Szene, auf deren Oberfläche fortwährend ein bis zwei interessante Punkte gefunden werden.

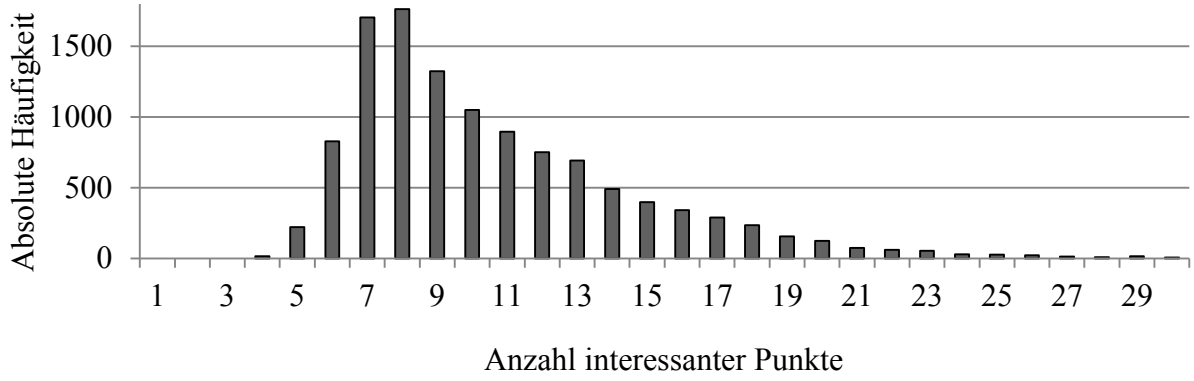

Abbildung 3-30 Anzahl an interessanten Punkten auf einem Förderband. Es wurden 11.595 verschiedene Szenen betrachtet.

4 Suchstrategie der Objektlageerkennung

In diesem Kapitel erfolgt die Vorstellung und Untersuchung der auf dem Entscheidungsbaum angewendeten Suchstrategie. In Abschnitt 4.1 wird zunächst die Bestensuche als Suchstrategie eingeführt, die die heuristische Suche steuern soll. Die Vorrangwarteschlange als ein zentrales Instrument der Bestensuche wird in Abschnitt 4.2 genauer behandelt. Die Evaluierung der interessanten Punkte findet in Abschnitt 4.3 statt. Die Evaluierung der relativen Werkstücklagen über eine Hough-Abstimmung wird in Abschnitt 4.4 durchgeführt. In Abschnitt 4.5 erfolgt die zur Erprobung des Verfahrens notwendige Einbettung in das Gesamtsystem zur Werkstückentnahme. Die aus den realisierten Anlagen erhaltenen Ergebnisse werden in Abschnitt 4.6 vorgestellt. Abschließend folgt eine Diskussion und Bewertung der Ergebnisse in Abschnitt 4.7.

4.1 Bestensuche

Nachdem in Kapitel 3 der Suchraum festgelegt wurde, folgt nun die Vorstellung der zur Lösungsfindung erforderlichen Suchstrategie, die möglichst schnell und robust Lösungen im Suchraum auffinden soll. Hierfür wird in dieser Arbeit der Algorithmus der Bestensuche als heuristische Baumsuche verwendet.

Die Bestensuche durchläuft den Entscheidungsbaum, indem sukzessive Baumknoten expandiert, bewertet und zu jedem Zeitpunkt der erfolgversprechendste Weg zum Ziel weiterverfolgt wird. Zu Beginn der Suche besteht der Entscheidungsbaum nur aus einem Element, der Baumwurzel. Durch jede Expansion eines Knotens kann sich der Entscheidungsbaum um eine Vielzahl neuer Knoten erweitern, die sich in der Ebene darunter befinden. Der Entscheidungsbaum nimmt demnach nur genau dann die Größe der Suchmenge an, wenn der Entscheidungsbaum bzw. jeder einzelne Knoten vollständig expandiert wurden. Die Speicherkomplexität des Entscheidungsbaums ist folgerichtig maximal genau so groß wie die der Suchmenge.

Für die Anwendung einer Bestensuche soll zunächst eine Ablaufübersicht geboten und anschließend die Evaluierungsfunktion näher betrachtet werden. Die ebenfalls zentrale Vorrangwarteschlange wird gesondert in Abschnitt 4.2 ausgeführt.

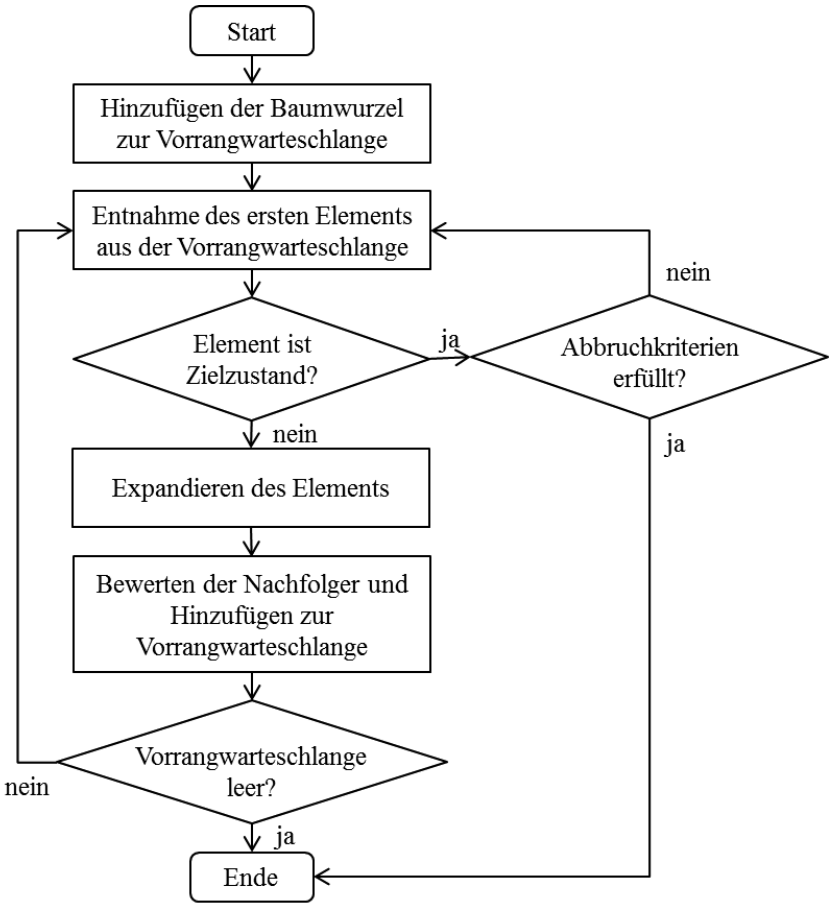

Abbildung 4-1 Regelablauf der Bestensuche. Die Suche endet nach Erfüllung der Abbruchkriterien oder bei einer leeren Vorrangwarteschlange. Eine leere Vorrangwarteschlange bedeutet, dass die Bewertung aller Suchbaumelemente und damit des gesamten Suchraums erfolgt ist.

4.1.1 Ablaufübersicht

Die Suche beginnt mit dem Hinzufügen der Baumwurzel in die Vorrangwarteschlange, anschließend wiederholt sich iterativ der Regelablauf der Suche:

- Es wird das erste Element der Vorrangwarteschlange entnommen und überprüft, ob der Zielzustand erreicht ist. Ist der Zielzustand erreicht, handelt es sich bei dem entnommenen Element um eine gültige Werkstücklage.
- Ist eine gültige Werkstücklage gefunden, wird das Abbruchkriterium untersucht. Das Abbruchkriterium stellt in dieser Arbeit die Anzahl der zu findenden Werkstücke dar. Sind Werkstücke in einer ausreichenden Anzahl lokalisiert und das Kriterium somit erfüllt, ist die Suche erfolgreich beendet.

- Ist der Zielzustand nicht erreicht, so wird der aus der Vorrangwarteschlange entnommene Knoten expandiert und die Nachfolger des Knotens mit Hilfe der Evaluierungsfunktion bewertet. Die bewerteten Elemente werden der Vorrangwarteschlange hinzugefügt und der Zyklus beginnt erneut, sofern sich noch Elemente in der Vorrangwarteschlange befinden.
- Sollte die Vorrangwarteschlange leer sein, bevor das Abbruchkriterium erfüllt ist, so ist die Suche im Sinne des Abbruchkriteriums gescheitert. Je nach Festlegung des Abbruchkriteriums, der Anzahl zu findender Werkstücke, können allerdings trotzdem eine oder mehrere Werkstücklagen gefunden worden sein und die Entnahmeplanung kann dessen ungeachtet fortgesetzt werden.

Die grundsätzliche Vorgehensweise wird Abbildung 4-1 noch einmal graphisch dargestellt.

Ein bei Suchalgorithmen häufig definiertes Abbruchkriterium ist die vergangene Suchzeit. In diesen Fällen wird die Suche nach Ablauf einer bestimmten Zeitdauer abgebrochen. Der Einfachheit halber wurde dieses Abbruchkriterium in der Abbildung nicht aufgeführt. Natürlich besteht beim vorgestellten Regelablauf nichtsdestotrotz die Möglichkeit, die Suche nach Ablauf einer festgelegten Zeitdauer zu beenden.

4.1.2 Evaluierungsfunktion

Die Evaluierungsfunktion kann einen Baumknoten bewerten und weist ihm einen Evaluierungswert zu. Bei den Knoten des Entscheidungsbaums kann es sich entweder um interessante Punkte oder um relative Werkstücklagen handeln. Da bei der Bestensuche immer derjenige Knoten weiter expandiert wird, welcher den aktuell niedrigsten Evaluierungswert aufweist, ist die Evaluierungsfunktion entscheidend für ein möglichst zielgerichtetes Durchlaufen des Suchbaums.

Der Evaluierungswert stellt in diesem Sinne eine Kostenabschätzung dar, wie weit der betrachtete Knoten vom Zielzustand entfernt ist. Eine Entfernung von Null bedeutet folgerichtig, dass es sich bei dem betrachteten Knoten um eine gültige Lösung handeln muss. Anders formuliert kennzeichnet ein Evaluierungswert von Null per Definition den Zielzustand.

Wird die Evaluierungsfunktion auf einem Baumknoten, der einen interessanten Punkt beschreibt, ausgeführt, kann der Zielzustand nicht erreicht werden, da der Zielzustand eine Werkstücklage beschreiben soll. Zur unterschiedlichen Handhabung der beiden Typen von Baumknoten erfolgt für die Evaluierungsfunktion eine Fallunterscheidung. Für interessante Punkte ${}^{\mathrm{L}}_{I}\hat{T}$ wird der Evaluierungswert $h_I\left({}^{\mathrm{L}}_{I}\hat{T}\right)$ und für relative Werkstücklagen ${}^{\mathrm{I}}_{W}\hat{T}$ der Evaluierungswert $h_W\left({}^{\mathrm{I}}_{W}\hat{T}\right)$ verwendet, so dass für die Evaluierungsfunktion gilt

$$h(\hat{T}) = \begin{cases} h_I, \text{falls } \hat{T} = {}^{\mathrm{L}}_{I}\hat{T} \\ h_W, \text{falls } \hat{T} = {}^{\mathrm{I}}_{W}\hat{T} \end{cases} . \qquad (4.1)$$

Bei der Umsetzung der Evaluierungsfunktion in den Abschnitten 4.3 und 4.4 sollen formale Kriterien einer heuristischen Evaluierungsfunktion berücksichtigt werden, die im Folgenden kurz aufgeführt werden:

- Die Evaluierungsfunktion soll *fair* sein. Dies bedeutet, dass zu jedem Evaluierungswert größer gleich Null nur endlich viele Baumknoten existieren, welche einen kleineren oder gleichen Evaluierungswert besitzen. Dieses Kriterium wird analog zur Vollständigkeit bei uninformierten Verfahren eingesetzt und bedeutet, dass ein Zielzustand erreicht wird, sofern er existiert [Becker2001]. Da die Suchmenge eine endliche Anzahl an Elementen aufweist, kann dieses Kriterium als erfüllt betrachtet werden.
- Die Evaluierungsfunktion soll ein *zulässiger Schätzer* sein. Ein zulässiger Schätzer kennzeichnet sich dadurch, dass die Entfernung zum Zielzustand nie überschätzt wird [Becker2001]. Die minimal mögliche Entfernung zum Zielzustand im betrachteten Entscheidungsbaum ist zu jedem Zeitpunkt bekannt und soll bei den Wertebereichen der Evaluierungsfunktionen entsprechend berücksichtigt werden, sodass auch dieses Kriterium als erfüllt angesehen werden soll.

Weiterhin soll berücksichtigt werden, dass die Evaluierungsfunktion möglichst stark zwischen verschiedenen Zuständen differenzieren können sollte, denn eine Evaluierungsfunktion ist umso brauchbarer, je deutlicher Zustände voneinander unterschieden werden können. Im Extremfall, wenn alle Zustände gleich bewertet würden, wäre die Evaluierungsfunktion unbrauchbar [Becker2001].

Bei der Bestensuche werden oft die Ausführungskosten zur Bewertung eines Baumknotens vernachlässigt [Becker2001]. Auch in dieser Arbeit werden die entstehenden Kosten nicht explizit untersucht. Implizit erfolgt jedoch eine Bewertung anhand der Gesamtlaufzeit des Verfahrens (vgl. Abschnitt 4.6.6).

4.2 Vorrangwarteschlange

In diesem Abschnitt wird die Vorrangwarteschlange (auch Prioritätswarteschlange) eingeführt und Möglichkeiten zur effizienten Anwendung im Rahmen der Bestensuche dargestellt. In der Vorrangwarteschlange ist ganz allgemein festgelegt, in welcher Reihenfolge die Baumknoten durchsucht werden, wobei die Baumknoten in diesem Zusammenhang als Elemente bezeichnet

werden sollen. Die Vorrangwarteschlange stellt eine erweiterte Form einer Warteschlange dar, bei der die Elemente der Warteschlange sortiert vorliegen.

Im betrachteten Anwendungsfall beinhaltet die Vorrangwarteschlange die aktuellen Blätter des Suchbaums. Die Blätter des Suchbaums stellen diejenigen Knoten dar, welche als nächste expandiert werden könnten. Die Sortierung der Vorrangwarteschlange erfolgt über einen zusätzlichen Schlüssel, den jedes Element besitzt und der durch den Evaluierungswert dargestellt wird. Die Vorrangwarteschlange soll aufsteigend sortiert sein, sodass das erste Element der Vorrangwarteschlange den niedrigsten Evaluierungswert aufweist.

Die Vorrangwarteschlange stellt somit eine Folge dar, deren Folgeglieder a_n diskrete Lagebeschreibungen sind. Die Lagebeschreibungen können entweder die eines interessanten Punkts ${}^{\mathrm{L}}_{I}\hat{T}$ oder die des Werkstücks relativ zum interessanten Punkt ${}^{\mathrm{I}}_{W}\hat{T}$ sein. Für die Vorrangwarteschlange a folgt somit

$$a: \mathbb{N} \to \mathbb{R}^{4x4},\ n \to a_n \coloneqq \hat{T}\ . \tag{4.2}$$

Die Reihenfolge der Knoten in der Vorrangwarteschlange ist durch ihre Bewertung durch die Evaluierungsfunktion gegeben. Für die Elemente der Vorrangwarteschlange folgt demnach

$$h(a_n) \leq\ h(a_{n+1})\ . \tag{4.3}$$

Die Länge der Vorrangwarteschlange variiert während der Suche. Zu Beginn ist die Länge Null, während die maximale Länge stets kleiner als die Suchbaumgröße bleibt. Die Suchbaumgröße ist abhängig von der Anzahl an gefundenen interessanten Punkten (vgl. Abschnitt 3.4.3). Aus der zur Lösungsfindung erforderlichen Anzahl an zu expandierenden interessanten Punkten (vgl. Abschnitt 4.6.1) kann geschlussfolgert werden, dass die Vorrangwarteschlange typischerweise eine Länge von weniger als 5% der Suchbaumgröße einnimmt.

4.2.1 Operatoren

Eine Vorrangwarteschlange besitzt im Allgemeinen mehrere Operatoren, von denen für das vorgestellte Verfahren drei relevant sind, die im Folgenden vorgestellt werden:

Entnahme – Der Zugriff auf die Elemente der Vorrangwarteschlange erfolgt immer beim ersten Element. Das erste Element ist der am besten bewertete Knoten mit dem niedrigsten durch die Evaluierungsfunktion zugewiesenen Wert und damit der höchsten Priorität. Die Rückgabe dieses Werts soll mit dem gleichzeitigen Entfernen des Eintrages aus der Vorrangwarteschlange einher-

gehen. Durch wiederholtes Entnehmen von Elementen kann die Vorrangwarteschlange so sukzessive geleert werden.

Einfügen – Nach der Entnahme eines Elementes wird dieses expandiert. Die Nachfolger des Elementes werden nun der Vorrangwarteschlange hinzugefügt. Jedes Element muss vor dem Einfügevorgang einen Evaluierungswert zugewiesen bekommen, damit eine anschließende Sortierung anhand des Evaluierungswerts vorgenommen werden kann.

Sortieren – Nach erfolgtem Einfügen neuer Elemente soll eine Sortieroperation durchgeführt werden, wonach das erste Element der Vorrangwarteschlange erneut den niedrigsten Schlüssel bzw. Evaluierungswert aufweist. Das Sortieren der Elemente ist in dieser Arbeit unmittelbar mit dem Einfügevorgang verbunden und kann prinzipiell auch als kombinierte Operation aufgefasst werden. Da ein entnommenes Element in nahezu jedem Fall eine Vielzahl von Nachfolgern hat, ist die Ausgangssituation des Sortiervorgangs, dass der sortierten Vorrangwarteschlange eine unsortierte Liste hinzugefügt wird.

Die Sortierung der Vorrangwarteschlange kann eine zeitkritische Operation der heuristischen Suche darstellen, da das Sortieren während der Ausführung des Suchalgorithmus stattfindet. Insbesondere durch die vorgestellte Kaskadierung gewinnt die Sortierung der Vorrangwarteschlange an Bedeutung: Da bei der Bestensuche eine Lösung per Definition durch den Zielzustand von Null gekennzeichnet wird, könnten alle Lösungskandidaten größer Null verworfen werden und eine Sortierung wäre in diesem Fall nicht notwendig. Durch die Einführung einer Kaskadierung können jedoch auch Lösungskandidaten, die keine ausreichende Güte aufweisen, mit Hilfe von Untersuchbäumen weiter untersucht werden. Hierfür ist es dann notwendig, eine Sortierung vorzunehmen, und folgerichtig vorteilhaft, das Laufzeitverhalten der Vorrangwarteschlange zu optimieren. Möglichkeiten hierzu werden in den folgenden Abschnitten aufgeführt.

4.2.2 Unter-Vorrangwarteschlangen

Um das praktische Laufzeitverhalten der Sortierung der Vorrangwarteschlangen zu verbessern, soll die Vorrangwarteschlange aus mehreren in ihrer Anzahl und Länge variierenden Teillisten, den Unter-Vorrangwarteschlangen, bestehen. Formal ist eine Vorrangwarteschlange demnach aus einer Liste von Unter-Vorrangwarteschlangen zusammengesetzt, die dazu dienen, die zu sortierenden Listen möglichst klein zu halten, da typische Sortierverfahren eine durchschnittliche Laufzeitkomplexität bezogen auf die Menge aller Eingabeparameter zwischen $O\big(n\log(n)\big)$ und $O(n^2)$ besitzen. Es ist daher zu erwarten, dass die Sortierung zweier Teillisten schneller erfolgen kann als die Sortierung einer großen Liste, die aus beiden Teillisten besteht.

Da durch die Einfüge-Operation nicht nur ein einzelnes Element, sondern eine unsortierte Liste der sortierten Vorrangwarteschlange hinzugefügt wird, ist es durch den Einsatz von Unter-Vorrangwarteschlangen zunächst lediglich erforderlich, die Sortierung der neu hinzugekommenen Liste vorzunehmen. So kann auf die vollständige Neusortierung aller Elemente der Vorrangwarteschlange verzichtet werden.

Sobald nun alle Unter-Vorrangwarteschlangen in sich sortiert vorliegen, können die jeweils ersten Elemente der Unter-Vorrangwarteschlange verwendet werden, um die Unter-Vorrangwarteschlangen untereinander zu sortieren. Das kleinste Element mit der höchsten Priorität ist auf diese Weise stets bekannt. Das zweitkleinste Element ist anschließend entweder der Nachfolger derselben Unter-Vorrangwarteschlange oder das erste Element der nächsten Unter-Vorrangwarteschlange.

Nachfolger interessanter Punkte als Unter-Vorrangwarteschlangen

Die Anzahl interessanter Punkte steht einer vergleichsweise sehr großen Anzahl relativer Werkstücklagen gegenüber. Nach erfolgter Expansion eines interessanten Punkts muss die darunterliegende Baumebene, bestehend aus einer Vielzahl relativer Werkstücklagen, der Vorrangwarteschlange hinzugefügt werden. Es bietet sich daher an, dass die relativen Werkstücklagen eines interessanten Punkts zur Bildung der Teillisten verwendet werden. Per Definition sollen die Unter-Vorrangwarteschlangen somit immer alle direkten Nachfolger eines interessanten Punkts beinhalten. In Abbildung 4-2 wird das beschriebene Vorgehen noch einmal verdeutlicht.

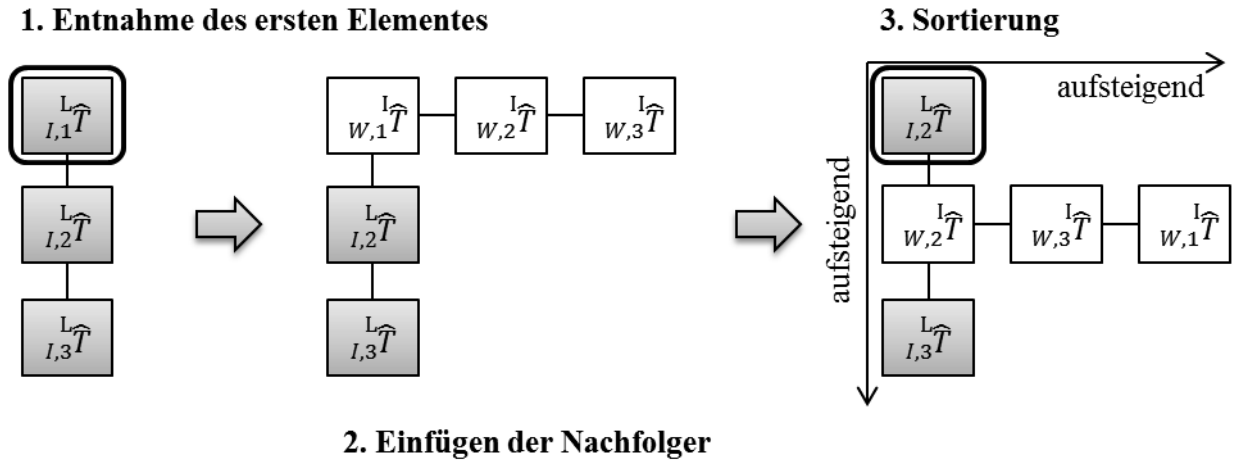

Abbildung 4-2 Operatoren der Vorrangwarteschlange. Das erste Element der Vorrangwarteschlange ist mit einem schwarzen Rand hervorgehoben. Im ersten Schritt wird ein Element, in diesem Fall ein interessanter Punkt, der Vorrangwarteschlange entnommen. Seine Nachfolger, in diesem Fall relative Werkstücklagen, werden im zweiten Schritt der Vorrangwarteschlange hinzugefügt und eine neue Unter-Vorrangwarteschlange wird gebildet. Im dritten Schritt werden sowohl die neu hinzugefügten Unter-Vorrangwarteschlangen als auch die ersten Elemente aller Unter-Vorrangwarteschlangen zueinander sortiert.

4.2.3 Vorsortierung

Im Folgenden soll die Möglichkeit aufgezeigt werden, durch die Verwendung problemspezifischen Wissens die Geschwindigkeit des Sortiervorgangs der Unter-Vorrangwarteschlangen durch die Verwendung einer Vorsortierung zu erhöhen. Das Ziel einer Vorsortierung besteht darin, den Elementen der Unter-Vorrangwarteschlange bereits eine Grundordnung durch das Ausnutzen von Vorzugslagen zu geben, bevor diese evaluiert und sortiert werden. Hierbei wird angenommen, dass je besser die Vorsortierung ist, desto effizienter der anschließende Sortiervorgang gestaltet werden kann.

Vorzugslagen

Unter Vorzugslagen versteht man diejenigen stabilen Orientierungen eines Werkstücks, welche das Werkstück aufgrund seiner Geometrie und Massenverteilung bei freier Bewegung am häufigsten einnimmt [Spur1986, Hesse2006a]. Bei diesem Werkstückverhalten wird die Position des Werkstücks, trotz der Verwendung des Begriffs Lage, nicht berücksichtigt. Die Stabilität einer Werkstückorientierung kann mit Hilfe der Standsicherheit, dem Quotienten des Kippmoments und des Standmoments, berechnet werden [Zeitler2007].

Folgt man der Annahme, dass die Werkstücke überwiegend in einer stabilen Orientierung im Ladungsträger vorliegen, so kann zu jedem Werkstück die jeweils wahrscheinlichste und unwahrscheinlichste Orientierung ermittelt werden. In Abbildung 3.3 werden die Vorzugslagen eines zylindrischen Körpers exemplarisch dargestellt. Für komplexere Geometrien kann die Untersuchung der Vorzugslagen auch empirisch, durch Versuchsreihen, erfolgen.

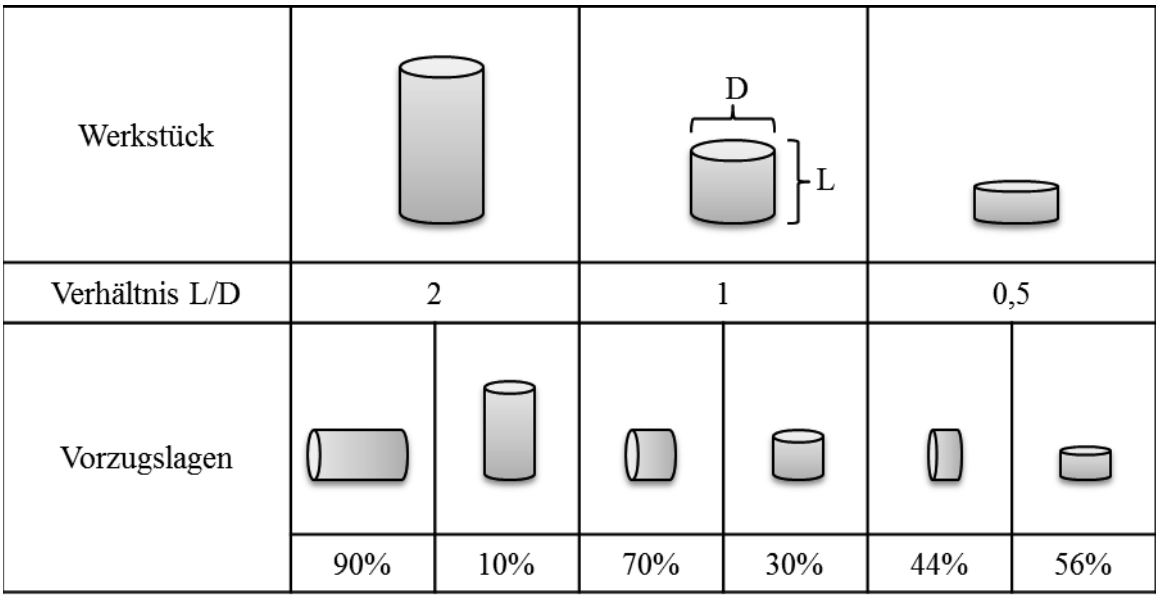

Abbildung 4-3 Vorzugslagen zylindrischer Körper. Eigene Darstellung nach Dilling [1975].

Vorgehen zur Vorsortierung

Basierend auf den Kenntnissen der Vorzugslagen von Werkstücken, wird in dieser Arbeit ein mögliches Vorgehen zur semi-automatischen Vorsortierung vorgeschlagen:

- Zunächst werden die stabilsten Werkstückorientierungen festgelegt. Anhaltspunkt hierfür kann die Größe der Kontaktfläche des Werkstücks mit dem Boden sein sowie der geschätzte Abstand des Schwerpunkts vom Boden. Die stabilsten Orientierungen beschreiben demnach ein liegendes Werkstück.
- Weiterhin wird festgelegt, welche Drehungen keinen Einfluss auf die Stabilität der Orientierung haben sollen. Sei beispielsweise die z-Achse eines liegenden Werkstücks orthogonal zum Boden, so kann für alle Drehungen um die z-Achse angenommen werden, dass diese keine Auswirkungen auf die Stabilität besitzen.
- Für alle verbleibenden Werkstückorientierungen wird mit Hilfe der Metrik d_r über den Achswinkel (vgl. Abschnitt 3.1.6) der kleinstmögliche Abstand zu einer stabilen Orientierung bestimmt.

- Die Werkstückorientierungen werden abschließend anhand ihres Abstands aufgelistet.

Die Auflistung der Werkstücklagen beginnt entsprechend mit der wahrscheinlichsten Orientierung (liegendes Werkstück) und endet mit der instabilsten Orientierung (stehendes Werkstück), da erwartet wird, dass die wahrscheinlichste Orientierung am häufigsten den niedrigsten Evaluierungswert zugewiesen bekommt. Aus Abbildung 4-4 geht hervor, dass sich die Vorsortierung empirisch bestätigen lässt und daher für weitere Untersuchungen in Abschnitt 4.6.3 verwendet werden kann.

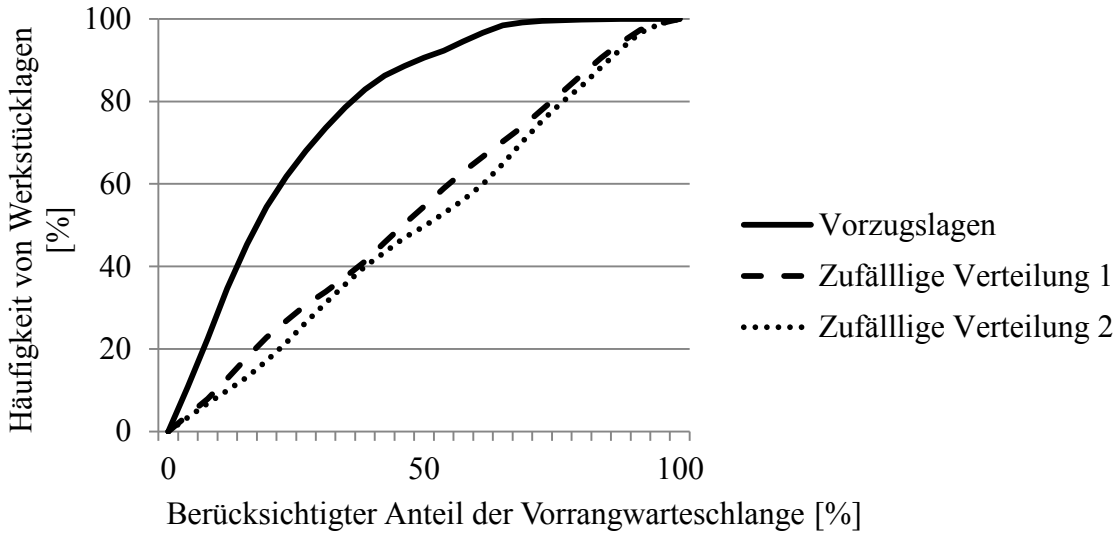

Abbildung 4-4 Häufigkeit der Vorzugsorientierung gegenüber zwei zufälligen Verteilungen am Beispiel von Kettengliedern. Berücksichtigt wurden 2.084 Werkstückorientierungen verschiedener Lagenmuster eines Ladungsträgers. Die zufällige Verteilung führt dazu, dass sich beispielsweise in der ersten Hälfte der Vorrangwarteschlange erwartungsgemäß etwa 50% der vorkommenden Werkstücklagen befinden. Durch Berücksichtigung der Vorzugsorientierungen kann dieser Anteil deutlich auf über 90% erhöht werden.

4.2.4 Sortierverfahren

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte interne Struktur der Vorrangwarteschlange mit mehreren Unter-Vorrangwarteschlangen führt dazu, dass es eine verhältnismäßige geringe Anzahl von Unter-Vorrangwarteschlangen gibt. Die Anzahl der Unter-Vorrangwarteschlangen, die untereinander sortiert werden müssen, korrespondiert mit der Anzahl interessanter Punkte und liegt im niedrigen zweistelligen Bereich (vgl. Abschnitt 3.4.3). Aufgrund des geringen Umfangs dieser Sortieroperation soll diese nicht näher betrachtet werden und nur die Sortierung der Unter-Vorrangwarteschlangen im Vordergrund stehen.

Die Größe einer Unter-Vorrangwarteschlange umfasst nach der Expansion eines interessanten Punkts die Anzahl relativer Werkstücklagen ${}_{W}^{I}\hat{T}$. Je nach festgelegter Winkelschrittweite müssen in einer Unter-Vorrangwarteschlange typischerweise zwischen 20.000 und 200.000 Elemente sortiert werden. In der Fachliteratur finden sich zahlreiche Algorithmen zur Sortierung von Listen [vgl. Ottmann2012]. Grundsätzlich sollen sowohl stabile als auch nicht stabil arbeitende Sortierverfahren eingesetzt werden können, die sich darin unterscheiden, dass gleichbewertete Elemente bei stabilen Verfahren ihre relative Position zueinander nach der Sortierung beibehalten. Exemplarisch sollen zwei Verfahren, ein stabiles und ein nicht-stabiles, näher betrachtet werden:

Quicksort – Hierbei handelt es sich um einen weit verbreiteten, rekursiven und nicht-stabilen Sortieralgorithmus, der über eine hohe Ausführungsgeschwindigkeit verfügt. Die zu sortierende Liste wird in zwei Teillisten aufgeteilt. Ausgehend von einem Pivotelement werden die Listenelemente entweder in die Teilliste für die kleineren oder größeren Elemente verteilt. Auf den so entstandenen Teillisten wird der Algorithmus rekursiv erneut ausgeführt.

Insertionsort – Dieses Sortierverfahren arbeitet stabil und ist am effizientesten bei vorsortierten Eingabemengen und gehört somit zu den natürlichen Sortierverfahren. *Insertionsort* überführt die Eingabeliste in eine Ausgabeliste, indem jedes Element nacheinander an die korrekte Position eingefügt wird. Alternativ kann die Berechnung direkt auf der Eingabeliste durchgeführt werden, indem die Elemente hinter dem korrekt positionierten Element verschoben werden.

Die Komplexität der Laufzeit von *Insertionsort* kann im günstigsten Fall mit $O(n)$ unter der von *Quicksort* liegen. Dies ist der Fall, wenn die zu sortierende Liste weitgehend vorsortiert vorliegt. Eine Entscheidung, welches Sortierverfahren zur Objektlageerkennung eingesetzt werden soll, basiert auf einer Untersuchung des Laufzeitverhaltens der Sortieralgorithmen mit und ohne Vorsortierung und kann den Ergebnissen in Abschnitt 4.6.3 entnommen werden.

4.3 Evaluierung interessanter Punkte

In diesem Abschnitt soll die Evaluierung der interessanten Punkte betrachtet werden, die in Abschnitt 3.2.2 eingeführt wurden und die erste Ebene des Suchbaums bilden. Die Evaluierung erfolgt über die Evaluierungsfunktion h_I, die jedem interessanten Punkt ${}_{I}^{\mathrm{L}}\hat{T}$ einen Evaluierungswert zuweist. Der Evaluierungswert schätzt den Abstand zur Lösung für das Auffinden einer gültigen Werkstücklage in der folgenden Baumebene bzw. die anfallenden Kosten. Je niedriger der Evaluierungswert ausfällt, desto erfolgsversprechender wird die weitere Untersuchung des Baumpfads eingeschätzt.

Zur Bestimmung des Evaluierungswerts soll die Annahme getroffen werden, je freiliegender sich ein Werkstück im Ladungsträger befindet, desto wahrscheinlicher kann es erkannt und auch gegriffen werden. Für die Berechnung des Evaluierungswerts seien daher zwei Überlegungen ausschlaggebend:

- Je weiter die Werkstücklage von den Seitenwänden und dem Boden des Ladungsträgers entfernt ist, desto größer sei die Entnahmewahrscheinlichkeit, da der Ladungsträger eine Störkontur darstellen kann, die eine Entnahme erschwert. Die im Ladungsträger angeordneten Werkstücke können beispielsweise nur dann entnommen werden, wenn sich der Greifer kollisionsfrei hin zum Greifpunkt am Werkstück bewegen kann. Der Greifer, bzw. der Roboter, könnte mit den Seitenwänden des Ladungsträgers kollidieren, weshalb im Allgemeinen ein großer Abstand zum Ladungsträger vorteilhaft ist. Der Mittelpunkt des oberen Ladungsträgerrandes soll daher eine günstige Position für einen interessanten Punkt darstellen.
- Je näher sich das Werkstück am Sensorsystem befindet, desto mehr Messwerte können von dem Werkstück gewonnen werden und desto besser wird seine Sichtbarkeit sein. Eine höhere Sichtbarkeit soll mit einer höheren Erkennungswahrscheinlichkeit einhergehen. Ein geringer Abstand zum Sensorsystem soll daher ebenfalls eine vorteilhafte Position darstellen.

Bevor die Berechnungsvorschrift der Evaluierungsfunktion auf Grundlage der obigen Überlegungen vorgestellt wird, soll der Wertebereich des Evaluierungswerts festgelegt werden. Der Evaluierungswert soll stets größer Null sein, da bei der Evaluierung interessanter Punkte der Zielzustand nicht erreichbar ist. Gleichzeitig soll der Evaluierungswert kleiner gleich eins sein, da die Evaluierungsfunktion den minimal möglichen Weg nicht überschätzen darf, so dass

$$0 < h_I\left({}^{L}_{I}\hat{T}\right) \leq 1 \tag{4.4}$$

folgt. Mit der maximalen Messentfernung des Sensorsystems l_S, den Kantenlängen des quaderförmigen Ladungsträger-Innenraums L_x, L_y, L_z und der Position ${}^{L}_{I}\hat{t}$ eines interessanten Punkts folgt für die Evaluierungsfunktion

$$h_I\left({}^{L}_{I}\hat{T}\right) = \frac{1}{2}\left(\underbrace{\frac{\left|{}^{L}_{I}\hat{t} - {}^{L}_{S}\hat{t}\right|}{l_S}}_{\substack{Skalierter\ Abstand \\ zum\ Sensorsystem}} + \underbrace{\frac{\left|{}^{L}_{I}\hat{t} - \left(\frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, L_z\right)^T\right|}{\left|\left(\frac{L_x}{2}, \frac{L_y}{2}, L_z\right)^T\right|}}_{\substack{Skalierter\ Abstand\ zum \\ Mittelpunkt\ des\ Ladungsträgerrandes}} \right) . \qquad (4.5)$$

Beide aufgeführten Terme können jeweils einen Wert von maximal eins annehmen, weshalb eine Normierung erfolgt. Der erste Term, der den Abstand zum Sensorsystem beschreibt, kann nicht den Wert Null annehmen, da die betrachteten Sensorsysteme stets einen Mindestmessabstand größer Null benötigen. Somit ist für Gleichung (4.5) die Forderung von Gleichung (4.4) erfüllt.

Für eine typische Bereitstellungssituation von Kettengliedern wird in Abbildung 4-5 die Bewertungsreihenfolge der interessanten Punkte aufgezeigt.

Abbildung 4-5 Interessante Punkte in einem Ladungsträger mit Kettengliedern. Die interessanten Punkte sind durch weiße Kreise gekennzeichnet. Die Nummerierung der interessanten Punkte kennzeichnet ihre Position in der Vorrangwarteschlange analog zu ihrer heuristischen Bewertung. Zur überwiegenden Mehrheit der extrahierten Merkmale könnte sich eine Werkstücklage bestimmen lassen, da die zugehörigen Werkstücke einen vergleichsweise großen sichtbaren Oberflächenanteil aufweisen.

4.4 Evaluierung relativer Werkstücklagen

In diesem Abschnitt soll die Evaluierung der relativen Werkstücklagen betrachtet werden, der zweiten Ebene des Suchbaums, die in Abschnitt 3.2.2 eingeführt wurde. Die Evaluierung erfolgt über die Evaluierungsfunktion h_W, die jeder relativen Werkstücklage ${}^{\mathrm{I}}_{W}\hat{T}$ einen Evaluierungs-

wert zuweist. Über diesen Evaluierungswert wird eine wahrscheinlichkeitsbasierte Aussage über das Vorliegen einer gültigen Werkstücklage mit Hilfe einer Hough-Abstimmung erzielt.

Damit eine Hough-Abstimmung in diesem Kontext verwendet werden kann, müssen die Komponenten der Hough-Abstimmung auf das vorliegende Problem übertragen werden: Zunächst wird der Akkumulatorraum vorgestellt, in den die abgegebenen Stimmen eingetragen werden. Die Stimmabgabe soll über Sensormesswerte erfolgen, die anschließend näher betrachtet werden. Die notwendigen Zusammenhänge zwischen den Messwerten und Stimmen werden im Rahmen der Abstimmungsdatenbank erläutert. Das Abstimmungsergebnis und der Annahme- bzw. Ablehnungsbereich der Hough-Abstimmung bilden dann die Grundlage der Evaluierungsfunktion.

4.4.1 Akkumulatorraum

Der Akkumulatorraum speichert das Ergebnis des Abstimmungsprozesses, bei dem für jede relative Werkstücklage Stimmen abgegeben werden können. Der Akkumulatorraum muss daher die Möglichkeit aufweisen, zu jeder relativen Werkstücklage die Anzahl abgegebener Stimmen zu verzeichnen. Weiterhin ist es vorteilhaft, wenn die Abstimmungsergebnisse in einer leicht weiterverarbeitbaren Form vorliegen, da die Ergebnisse nach erfolgter Bewertung in der Vorrangwarteschlange sortiert werden.

Aus diesen Gründen soll der Akkumulatorraum durch eine lineare Datenreihe (engl.: Array) dargestellt werden. Hierfür werden die fünf Indizes zur Beschreibung einer diskreten Werkstücklage (vgl. Gleichung (3.22)) über eine lineare Indizierung zu einem Index zusammengefasst. Ein Eintrag der Datenreihe besteht dann aus dem Index der diskreten Werkstücklage und einem dazugehörigen Zähler, der bei entsprechender Stimmabgabe erhöht wird. Die Zuordnung der Einträge zu den relativen Werkstücklagen erfolgt so, dass jeder Index einer relativen Werkstücklage dem entsprechenden Index der Datenreihe entspricht (siehe Abbildung 4-6).

Wie bereits in Abschnitt 3.2.6 aufgeführt, kann die Suchmenge der diskreten relativen Werkstücklagen eine datenverarbeitungstechnisch handhabbare Größe aufweisen, sodass in der Praxis der vollständige Akkumulatorraum auf einem Speichermedium, wie dem Hauptspeicher, allokiert werden kann. Somit kann durch die Gewährleistung schneller Zugriffszeiten auf die Daten des Akkumulatorraums ein Beitrag für die erforderliche Laufzeiteffizienz des Verfahrens zur Objektlageerkennung geleistet werden.

Index relativer Werkstücklagen ${}^{I}_{W}\hat{T}$	0	1	2	3	4	5
Zähler	0	0	0	0	0	0
Visualisierung						

Abbildung 4-6 Akkumulatorraum vor Beginn einer Hough-Abstimmung. Die Hypothesen werden durch relative Werkstücklagen dargestellt, die über Indizes zugeordnet werden. Der dazugehörige Zähler misst die Anzahl abgegebener Stimmen für jeden Index und wird mit Null initiiert. Die Visualisierung der Werkstücklagen dient in dieser Darstellung zum verbesserten Verständnis.

4.4.2 Stimmabgaben über Sensormesswerte

Die Stimmabgabe bei einer Hough-Abstimmung erfolgt über Merkmale, die in den Eingangsdaten bestimmt werden. In dieser Arbeit sollen die Stimmabgaben direkt durch einzelne Sensormesswerte bzw. durch die relative Position eines Messwerts gegenüber der Position eines interessanten Punkts abgegeben werden. Durch die direkte Verwendung von Messwerten zur Stimmabgabe und der Vermeidung komplexer geometriespezifischer Merkmale kann die Annahme einer größtmöglichen Übertragbarkeit des Verfahrens auf beliebige Werkstück-Geometrien getroffen werden, da keine Adaption an die Geometrie des Werkstücks vorgenommen werden muss.

Die relative Position kann mit einem Verschiebungsvektor

$$ {}^{I}_{P,i}\hat{t} = {}^{L}_{I}\hat{t} - {}^{L}_{P,i}\hat{t} \qquad (4.6) $$

durch Subtraktion der Messwertposition ${}^{L}_{P,i}\hat{t}$ von der Position eines interessanten Punkt ${}^{L}_{I}\hat{t}$ ausgedrückt werden. Jeder Verschiebungsvektor ${}^{I}_{P,i}\hat{t}$ ermöglicht eine wahrscheinlichkeitsbasierte Aussage über das Vorhandensein bestimmter Werkstücklagen, unter der Voraussetzung, dass sowohl der interessante Punkt korrekt bestimmt wurde und ein gültiger Messwert vorliegt, der zum selben Werkstück wie der betrachtete interessante Punkt gehört. Anders ausgedrückt beruht dieser Ansatz auf der bedingten Wahrscheinlichkeit von Werkstücklagen unter der Voraussetzung von Sensordaten.

Tatsächlich muss in der Praxis nicht für jeden Sensormesswert ein Verschiebungsvektor gebildet werden. Alle Messwerte, die einen bestimmten Mindestabstand zum interessanten Punkt überschreiten, können bei bekannter Geometrie des Werkstücks nicht zur Werkstückoberfläche gehören und sollen demnach zur Reduktion des Berechnungsaufwands vernachlässigt werden. Eine Möglichkeit zur Vorauswahl potentiell relevanter Sensormesswerte besteht daher in der Verwendung der Werkstücklänge L_W als Mindestabstand, wobei die Werkstücklänge in Abschnitt 3.1.3 als längste Seite des minimal umgebenden Rechtecks eingeführt wurde.

Die Anzahl an Stimmen $n_{Stimmen}$, die eine relative Werkstücklage ${}_{W}^{I}\hat{T}$ erhält, ergibt sich aus der Größe der Schnittmenge zwischen der Menge an Sensormesswerten ${}_{P}^{I}\widehat{\mathcal{M}}$ und der theoretisch sichtbaren Werkstückoberfläche, die über die Renderfunktion $\mathrm{f}_{Render,W}$ ermittelt wird. Es gilt also

$$n_{Stimmen}\left({}_{W}^{I}\hat{T}\right) = \left| f_{Render,W}\left({}_{W}^{I}\hat{T}\right) \cap {}_{P}^{I}\widehat{\mathcal{M}} \right| \quad . \tag{4.7}$$

In dieser Arbeit soll die Anzahl an Stimmen $n_{Stimmen}$ jedoch nicht nacheinander für jede relative Werkstücklage ${}_{W}^{I}\hat{T}$ bestimmt werden. Im nächsten Abschnitt wird daher eine Möglichkeit zur effizienten Berechnung der Gleichung (4.7) für alle relativen Werkstücklagen mit Hilfe einer Abstimmungsdatenbank aufgeführt.

4.4.3 Abstimmungsdatenbank

Die Abstimmungsdatenbank f_{Hough} (auch: R-Table [Ballard1981]) ist eine Datenstruktur, die den Zusammenhang zwischen Merkmalen und Hypothesen darstellt. Der Vorteil der Abstimmungsdatenbank besteht darin, dass die Anzahl abgegebener Stimmen nicht für jede Hypothese separat bestimmt werden muss, sondern durch die einmalige Betrachtung der Merkmale für alle Hypothesen erfolgt.

In dieser Arbeit stellt die Abstimmungsdatenbank einen Zusammenhang zwischen den Verschiebungsvektoren ${}_{P,i}^{I}\hat{t}$ und den relativen Werkstücklagen ${}_{W}^{I}\hat{T}$ her, bei dem jeder mögliche Verschiebungsvektor ${}_{P,i}^{I}\hat{t}$ durch die Abstimmungsdatenbank f_{Hough} auf eine Menge ${}_{W}^{I}\widehat{\mathcal{M}}$ von relativen Werkstücklagen abgebildet wird. Es folgt also

$$f_{Hough}\colon \mathbb{R}^3 \rightarrow \{\mathbb{R}^{4x4}\},\ {}_{P,i}^{I}\hat{t} \rightarrow {}_{W}^{I}\widehat{\mathcal{M}} \quad . \tag{4.8}$$

Für die Menge ${}_{W}^{I}\widehat{\mathcal{M}}$ von relativen Werkstücklagen für einen gegebenen Verschiebungsvektor ${}_{P,i}^{I}\hat{t}$ folgt somit

$$ {}^{I}_{W}\widehat{\mathcal{M}} = f_{Hough}\left({}^{I}_{P,i}\hat{t}\right) . \tag{4.9} $$

Die für einen Verschiebungsvektor erhaltene Menge von relativen Werkstücklagen kann nun genutzt werden, um die entsprechenden Hypothesen im Akkumulatorraum zu verzeichnen. Hierfür wird für jede relative Werkstücklage über den entsprechenden Index der Zähler im Akkumulatorraum erhöht. Die Funktionsweise der Abstimmungsdatenbank wird Abbildung 4-7 zusammengefasst.

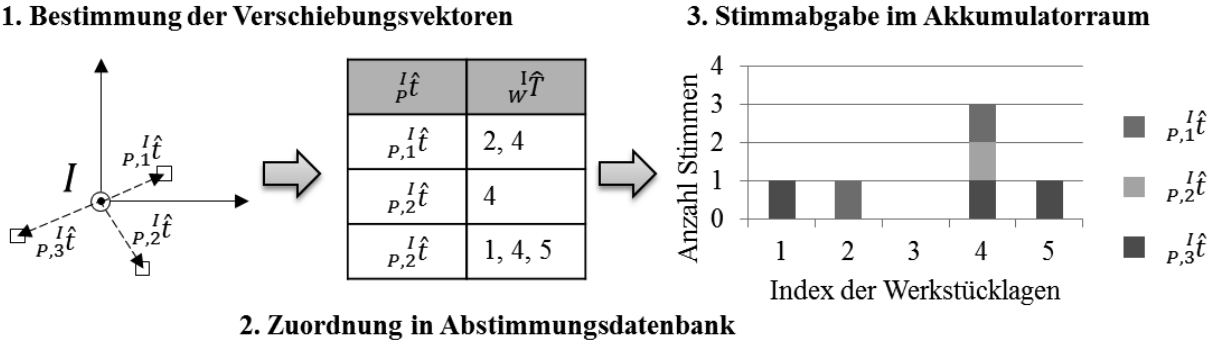

Abbildung 4-7 Hough-Abstimmung mit Hilfe der Abstimmungsdatenbank. Im ersten Schritt werden die Verschiebungsvektoren zwischen interessanten Punkten und Sensormesswerten gebildet. In der Abstimmungsdatenbank befindet sich für jeden Verschiebungsvektor eine Menge an relativen Werkstücklagen, bei denen entsprechende Verschiebungsvektoren aufgetreten sind. Der Zähler jeder in der Menge enthaltener relativer Werkstücklagen wird im Akkumulatorraum erhöht. Dieser Vorgang wird für alle Verschiebungsvektoren durchgeführt.

Erstellung der Abstimmungsdatenbank

Zur Erstellung der Datenbank werden nacheinander die sichtbaren Oberflächen für alle relativen Werkstücklagen über die Renderfunktion $f_{Render,W}$ gebildet. Für jeden auf der sichtbaren Oberfläche bestimmten interessanten Punkt werden alle Verschiebungsvektoren berechnet und in der Abstimmungsdatenbank verzeichnet. Die Größe der hierdurch entstehenden Datenstrukturen kann den Ergebnissen in Abschnitt 4.6.2 entnommen werden.

Die Abstimmungsdatenbank muss bei gleichbleibender Diskretisierung und Werkstückgeometrie für einen Werkstücktypen jeweils nur einmal erstellt werden. Es bietet sich daher an, dies in einem der Objektlageerkennung vorgeschalteten Prozess, der Datenbankerstellung durchzuführen und die Datenbank dann auf einem Permanentspeicher abzulegen. Da während der Objektlageerkennung umfangreiche Zugriffe auf die Abstimmungsdatenbank vorgenommen werden, ist es darüber hinaus vorteilhaft, wenn die Abstimmungsdatenbank bei Bedarf in ein Speichermedium geladen werden kann, das eine möglichst niedrige Zugriffszeit und eine hohe Bandbreite auf-

weist. Bei der Nutzung einer handelsüblichen Recheneinheit bietet sich hierfür vorzugsweise der Hauptspeicher an.

Aufgrund des verhältnismäßig sehr geringen Umfangs der Untersuchbäume können deren Abstimmungsdatenbanken auch dynamisch berechnet werden. Hier ist die bereits untersuchte Geschwindigkeitssteigerung der Sichtbarkeitsberechnung (vgl. Abschnitt 3.4.2) für die effektive Laufzeit von großer Bedeutung.

In Abbildung 4-8 wird die Abstimmungsdatenbank anhand ihrer Verschiebungsvektoren ${}^{I}_{P,i}\hat{t}$ visualisiert. Die Mehrzahl aller z-Komponenten der Verschiebungsvektoren befindet sich unterhalb des Ursprungs. Ein geringerer Teil befindet sich oberhalb, da die lokalen Maxima nicht nur globale Maxima der sichtbaren Oberfläche darstellen.

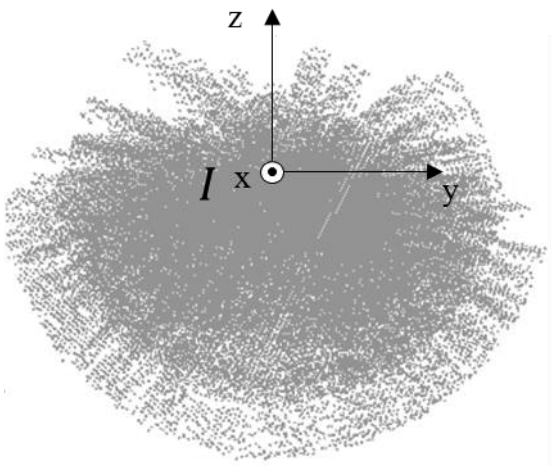

Abbildung 4-8 Abstimmungsdatenbank eines Kettenglieds. Die Abstimmungsdatenbank stellt einen Zusammenhang zwischen den Verschiebungsvektoren ${}^{I}_{P,i}\hat{t}$ und entsprechenden relativen Werkstücklagen ${}^{I}_{W}\hat{T}$ dar. Hierfür werden die sichtbaren Oberflächen aller relativen Werkstücklagen relativ zu den interessanten Punkten beschrieben. Die grauen Punkte kennzeichnen jeweils einen Verschiebungsvektor ${}^{I}_{P,i}\hat{t}$ im Koordinatensystem des interessanten Punkts mit einer zugehörigen Menge ${}^{I}_{W}\widehat{\mathcal{M}}$ größer Null.

4.4.4 Abstimmungsergebnis

In diesem Abschnitt wird zunächst die Berechnung des Abstimmungsergebnisses vorgestellt und anschließend ein Erwartungswert eingeführt, der die Grundlage zu einer Gütebestimmung des Abstimmungsergebnisses in Abschnitt 4.4.5 bilden soll.

Berechnung des Abstimmungsergebnisses

Die Rohdaten der Abstimmungsergebnisse liegen vor, nachdem jede Stimme im Akkumulatorraum verzeichnet worden ist. Der Zählerstand einer relativen Werkstücklage beschreibt dann die absolute Anzahl abgegebener Stimmen. Die absolute Anzahl der Stimmen soll in einem Nachbearbeitungsschritt noch skaliert werden, damit eine Vergleichbarkeit zwischen zwei relativen Werkstücklagen möglich ist. Die Skalierung dient der Normierung und erfolgt über die Größe der Werkstückoberfläche, da diese die maximal mögliche Anzahl abgegebener Stimmen darstellt. Andernfalls erhielten Werkstückorientierungen mit geringerer Oberflächengröße tendenziell ein geringeres Abstimmungsergebnis gegenüber größeren Werkstückoberflächen.

Die Anzahl der theoretisch möglichen Stimmen lässt sich über den Betrag der Menge aller gerenderten Messwerte mit Hilfe der Renderfunktion $f_{Render,W}$ bestimmen. Über den Quotienten der abgegebenen Stimmen $n_{Stimmen}$ und der theoretisch möglichen Stimmen $\left|f_{Render,W}\left({}_{W}^{I}\hat{T}\right)\right|$ können dann die Abstimmungsergebnisse ins Verhältnis zueinander gesetzt werden. Für das Abstimmungsergebnis k_{Hough} einer relativen Werkstücklage ${}_{W}^{I}\hat{T}$ folgt somit

$$k_{Hough}\left({}_{W}^{I}\hat{T}\right) = \frac{n_{Stimmen}\left({}_{W}^{I}\hat{T}\right)}{\left|f_{Render,W}\left({}_{W}^{I}\hat{T}\right)\right|} \; . \qquad (4.10)$$

Das Abstimmungsergebnis k_{Hough} ermöglicht nun die Vergleichbarkeit der Anzahl abgegebener Stimmen für verschiedene relative Werkstücklagen. Für die Gütebestimmung einer Abstimmung soll im nächsten Schritt der Erwartungswert herangezogen werden.

Erwartungswert des Abstimmungsergebnisses

Der Erwartungswert μ_{Hough} des Abstimmungsergebnisses k_{Hough} soll die Grundlage zur Festlegung eines Annahme- und Ablehnungsbereiches darstellen und beschreibt ein wahrscheinliches Abstimmungsergebnis unter Berücksichtigung der Sensorungenauigkeiten, da in der Praxis aufgrund von Messfehlern ein Abstimmungsergebnis $k_{Hough}\left({}_{W}^{I}\hat{T}\right) = 1$ die Ausnahme darstellen wird.

In diesem Rahmen wird vorausgesetzt, dass alle betrachteten Sensorsysteme eine annähernd normalverteilte und bekannte Messgenauigkeit aufweisen. Eine Untersuchung der Messwerte des Sensors Sick LMS 400, deren Ergebnisse in Abbildung 4-9 veranschaulicht werden, stützt die Voraussetzung einer Normalverteilung. Im Folgenden wird daher davon ausgegangen, dass alle betrachteten Sensorsysteme ebenfalls eine annähernd normalverteilte und bekannte Messgenauigkeit aufweisen.

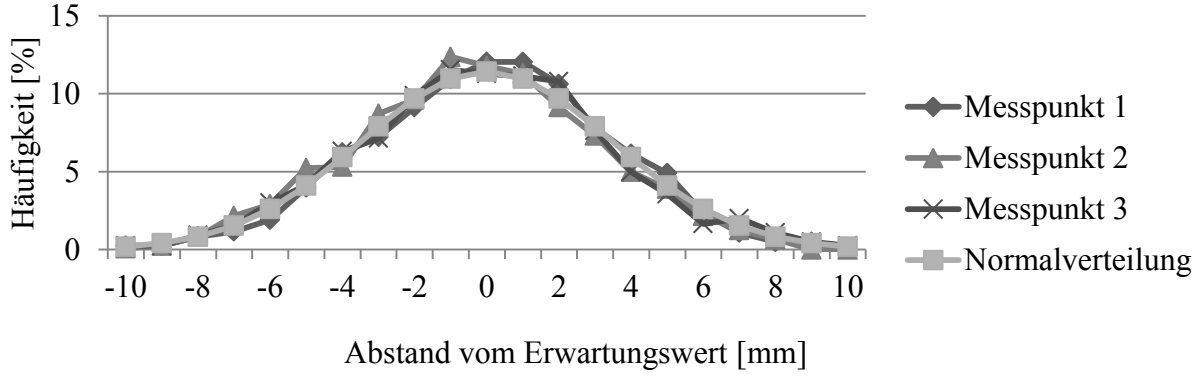

Abbildung 4-9 Messgenauigkeit des Linienscanners Sick LMS 400. Für jeden der drei Messpunkte wurden 1200 Messungen berücksichtigt, die relativ zum berechneten Erwartungswert dargestellt wurden. Die entstehende Häufigkeitsverteilung wird mit der Häufigkeitsverteilung einer idealen Normalverteilung verglichen, die bei einer Standardabweichung $\sigma_{Sensor} \approx 3{,}5$ mm das höchste Maß an Ähnlichkeit aufweist.

Der theoretische Erwartungswert μ_{Hough} des Abstimmungsergebnisses kann über die Dichtefunktion der Normalverteilung

$$F(\mu, \sigma, \lambda) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lambda} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi-\mu}{\sigma}\right)^2} \mathrm{d}\xi \qquad (4.11)$$

bestimmt werden, wenn die Rechnung zur Vereinfachung nur entlang der z-Achse des Sensorsystems erfolgt. Diese Annahme geht aus den Vereinfachungen bei der Sichtbarkeitsberechnung in Abschnitt 3.2.1 hervor.

Die Stimmabgabe kann demnach nur dann erfolgen kann, wenn der Verschiebungsvektor ${}_{P,i}^{I}\hat{t}$, genauer die z-Komponente des Verschiebungsvektors, korrekt bestimmt werden konnte. Damit dies möglich ist, muss sich der zugehörige Sensormesswert der Werkstückoberfläche an der richtigen Position befinden. Hierfür muss die Messung innerhalb eines bestimmten Intervalls erfolgt sein, das bei der anschließenden Diskretisierung demselben Gitterpunkt zugeordnet wird.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Messwert innerhalb des notwendigen Intervalls befindet, lässt sich bei bekannter Gitterschrittweite Δt und bekannter Standardabweichung σ_{Sensor} des Sensorsystems berechnen. Die Wahrscheinlichkeit soll bei einer Vielzahl an Messungen als Erwartungswert aufgefasst werden. Vereinfacht für den eindimensionalen Fall folgt somit für den theoretischen Erwartungswert

$$\mu_{Hough} = F\left(0, \sigma_{Sensor}, \frac{\Delta t}{2}\right) - F\left(0, \sigma_{Sensor}, \frac{-\Delta t}{2}\right) . \quad (4.12)$$

In Abbildung 4-10 ist der theoretische Erwartungswert μ_{Hough} des Abstimmungsergebnisses in Abhängigkeit der Gitterschrittweite Δt und der Standardabweichung σ_{Sensor} dargestellt.

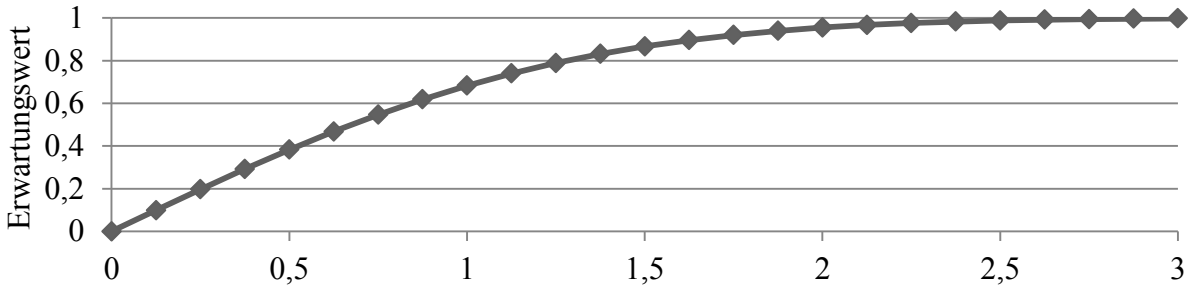

Abbildung 4-10 Erwartungswert des Abstimmungsergebnisses in Abhängigkeit der gewählten Diskretisierungsschrittweite und der Standardabweichung des verwendeten Sensors.

4.4.5 Annahme- und Ablehnungsbereich

In diesem Abschnitt soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, die eine Entscheidungshilfe bietet, ob die durch das Abstimmungsergebnis k_{Hough} bewertete relative Werkstücklage ${}_{W}^{I}\hat{T}$ als gültige Lösung akzeptiert werden kann oder nicht. Hierfür soll ein statistischer Test verwendet werden, in dessen Rahmen ein Annahme- bzw. Ablehnungsbereich festgelegt wird. Der Annahmebereich beschreibt dann denjenigen Wertebereich des Testergebnisses, in dem statistisch gesehen eine Hypothese bzw. relative Werkstücklage als Lösung der Objektlageerkennung akzeptiert werden könnte.

Es sei an dieser Stelle hervorgehoben, dass einerseits nicht alle Einflussgrößen durch den Test berücksichtigt sowie andererseits auch einige Vereinfachungen vorgenommen werden, sodass das Ergebnis nicht zwangsläufig als einziges Entscheidungskriterium herangezogen werden muss. Diesem Sachverhalt widmet sich der Abschnitt 4.4.6 ausführlicher.

Einstichproben-Gauß-Test

Als statistischer Test soll der Einstichproben-Gauß-Test Anwendung finden, mit dessen Hilfe geprüft werden kann, ob eine Stichprobe einer bekannten Normalverteilung entstammen könnte. In diesem Rahmen wird das Abstimmungsergebnis k_{Hough} als Stichprobenmittelwert interpretiert.

Der Einstichproben-Gauß-Test ermittelt über den Stichprobenmittelwert k_{Hough} und den theoretischen Erwartungswert μ_{Hough} eine Prüfgröße, mit deren Wert eine Entscheidung über die Nullhypothese getätigt wird [Sachs1992]. Die Nullhypothese besagt, dass ein Werkstück tatsächlich in entsprechender Lage vorliegt. Die Alternativhypothese besagt dagegen, dass sich das Werkstück nicht in dieser Lage befindet. Formal erfolgt die Formulierung als zweiseitiger Hypothesentest, für den gilt

$$\begin{aligned} \text{Nullhypothese:}\quad & \mu_{Hough} = k_{Hough} \\ \text{Alternativhypothese:}\quad & \mu_{Hough} \neq k_{Hough}\ . \end{aligned} \qquad (4.13)$$

Der statistische Test sieht vor, die Nullhypothese nur dann abzulehnen, wenn die Abweichungen der Prüfgröße einen Schwellwert, den Annahmebereich, überschreiten, bei dem das Zutreffen der Nullhypothese nur durch sehr unwahrscheinliche Zufälle zustande kommen könnte. In diesem Fall wird es als wahrscheinlicher angesehen, dass die Nullhypothese nicht stimmt [Sachs1992].

Falls die Messgenauigkeit bzw. die daraus resultierende Standardabweichung des Sensorsystems in spezifischen Anwendungsfällen unbekannt ist oder als zu stark veränderlich eingestuft wird, existieren noch weitere statistische Tests, mit denen vergleichbare Aussagen getroffen werden können. Als Beispiel sei der Einstichproben-t-Test genannt, bei dem ersatzweise eine empirische Standardabweichung berechnet wird. Alternative Testmethoden sollen jedoch in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

Annahmebereich der Prüfgröße

Wird als Stichprobenumfang die Anzahl der abgegebenen Stimmen $n_{Stimmen}$ verwendet, so folgt für die Prüfgröße z_{Hough} des Einstichproben-Gauß-Tests nach Sachs [1992] zu

$$z_{Hough} = \frac{k_{Hough} - \mu_{Hough}}{\sigma_{Sensor}} \sqrt{n_{Stimmen}}\ . \qquad (4.14)$$

Beim Einstichproben-Gauß-Test wird angenommen, dass die Prüfgröße z_{Hough} für korrekte Nullhypothesen standardnormalverteilt mit $F(0{,}1, \lambda)$ ist [Sachs1992]. Der Annahmebereich lässt sich dann über das Signifikanzniveau α festlegen, das eine Abschätzung über die Irrtumswahrscheinlichkeit ermöglicht. Dieser Fehler erster Art beschreibt das Risiko, eine richtige Nullhypothese irrtümlich abzulehnen bzw. beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine richtige Nullhypothese vom statistischen Test korrekt bestätigt wird [Sachs1992].

In dieser Arbeit soll das Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$ festgelegt werden. Die Integration der Standardnormalverteilung über das Intervall $[-1{,}96;\ 1{,}96]$ entspricht dann etwa $1 - \alpha$ [Sachs1992], wodurch für den Annahmebereich der Prüfgröße z_{Hough} zu

$$\left|z_{Hough}\right| \leq 1{,}96 \tag{4.15}$$

folgt. Durch die Festlegung des Annahmebereiches kann im nächsten Abschnitt die Evaluierungsfunktion eingeführt werden, in deren Zusammenhang noch auf eine optionale Korrektur bei der Berechnung der Prüfgröße z_{Hough} eingegangen wird.

4.4.6 Evaluierungsfunktion

Mit dem Betrag der Prüfgröße z_{Hough}, dem über das Signifikanzniveau α bestimmten Annahmebereich und der Definition des Zielzustands durch Null soll für die heuristische Evaluierungsfunktion

$$h_W\left({}^{I}_{W}\hat{T}\right) = \begin{cases} 0, & \text{falls } \left|z_{Hough}\right| \leq 1{,}96 \\ \left|z_{Hough}\right|, & \text{falls } \left|z_{Hough}\right| > 1{,}96 \end{cases} \tag{4.16}$$

folgen. Die Evaluierungsfunktion kennzeichnet somit den Zielzustand durch Null, wenn sich die Prüfgröße z_{Hough} im Annahmebereich befindet. Vor der Verwendung der Evaluierungsfunktion sollen jedoch noch zwei Einflussgrößen berücksichtigt werden, die bisher nicht betrachtet wurden, aber das Abstimmungsergebnis beeinflussen können: Die auftretenden Abschattungen im Ladungsträger und die Diskretisierung von Werkstücklagen.

Einfluss der Abschattungen auf die Evaluierungsfunktion

Durch die vorherrschende, chaotische Bereitstellung der Werkstücke ist davon auszugehen, dass es zu Abschattungen der Werkstücke kommt und die überwiegende Anzahl an Werkstücken teilweise verdeckt ist. Die Bestimmung des vorherrschenden Abschattungsgrads ist jedoch nicht allgemein möglich und soll daher in dieser Arbeit als unbekannte Einflussgröße behandelt werden. In der Folge nehmen das Abstimmungsergebnis und damit auch die Prüfgröße einen schlechteren Wert an, als statistisch erwartet werden kann.

Einfluss der Diskretisierung von Werkstücklagen auf die Evaluierungsfunktion

Aufgrund der gewählten Diskretisierung der Werkstücklagen können für eine tatsächlich vorliegende Werkstücklage gar keine Stimmen abgegeben werden, da in der Praxis nur ähnliche Werkstücklagen zur Abstimmung stehen. Wird für eine ähnliche Werkstücklage abgestimmt, so ist

davon auszugehen, dass das erhaltene Abstimmungsergebnis gegenüber einer exakten Werkstücklage schlechter ausfällt. Obgleich der Einfluss der durch die Diskretisierung entstehenden Ungenauigkeiten allgemein schwer vorhersagbar ist, kann gezeigt werden, dass ähnliche Werkstücklagen in der Regel auch ähnliche Abstimmungsergebnisse erzielen.

In Abbildung 4-11 wird anhand zweier Beispiele gezeigt, dass die Ausbildung des Gütegebirges bezogen auf die Steilheit und der Anzahl der Nebenminima zumindest für einen Teil der Werkstücklagen, mit Blick auf die diskretisierungsbedingten Ungenauigkeiten, als hinreichend angesehen werden kann.

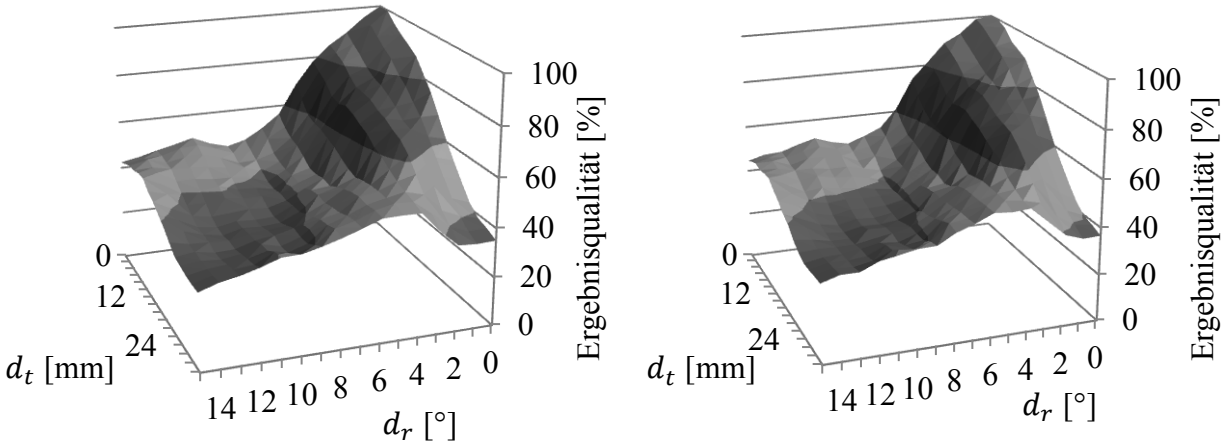

Abbildung 4-11 Veränderung des Abstimmungsergebnisses bei Variation der Position und Orientierung gegenüber der tatsächlichen Werkstücklage anhand zweier Beispiele. Mit zunehmendem Abstand verschlechtert sich das Abstimmungsergebnis erwartungsgemäß. In einem kleinen Bereich weist es jedoch eine hohe Ähnlichkeit auf.

Einführung eines Korrekturwerts

Zur Kompensation der aufgeführten Störgrößen des Abstimmungsergebnisses soll eine Erwartungswertkorrektur $\Delta\mu$ eingeführt werden, die anwendungsspezifisch erlauben soll, den theoretischen Erwartungswert μ_{Hough} zu verschieben. Der tatsächlich verwendete Erwartungswert $\tilde{\mu}_{Hough}$ wird dann ausgehend von Gleichung (4.12) über die Erwartungswertkorrektur $\Delta\mu$ zu

$$\tilde{\mu}_{Hough} = \mu_{Hough} + \Delta\mu \qquad (4.17)$$

festgelegt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Störgrößen einen im Mittel überwiegend konstanten Einfluss haben können. Das bedeutet, dass die vorherrschende Abschattung kombi-

niert mit einer Lageungenauigkeit den theoretischen Erwartungswert μ_{Hough} annähernd konstant beeinflussen kann.

Durch ein Absenken des Erwartungswerts könnte ein sehr hohes Abstimmungsergebnis abgelehnt werden, wenn es sich rechtsseitig des Annahmebereichs befindet und statistisch gesehen zu viele Stimmen erhalten hat bzw. zu gut bewertet wurde. In diesem Fall sollte das Ergebnis trotzdem angenommen werden und die Prüfgröße hierfür über einen einseitigen Hypothesentest bestimmt werden, der ausschließlich zu schlecht bewertete Werkstücklagen ablehnt. Bei den betrachteten Anwendungsfällen liegt allerdings die rechte Seite des Annahmebereichs bei eins oder mehr, sodass auf diesen Umstand nicht näher eingegangen werden soll.

Grundsätzlich ist es auch möglich, ergänzend zur Korrektur des Erwartungswerts den Annahmebereich zu vergrößern oder zu verkleinern. In diesem Fall würde ein anderes Signifikanzniveau für die Festlegung des Annahmebereichs eingestellt. In Abschnitt 4.5.1 wird auf das Signifikanzniveau beim Einlernen neuer Werkstücktypen noch einmal eingegangen.

Diskussion des Korrekturwerts

Der Korrekturwert $\Delta\mu$ kann nun verwendet werden, um eine benutzerdefinierte Parametrierung der Erkennungssicherheit vorzunehmen. Eine hohe Erkennungssicherheit führt zu wenigen bis keinen falsch erkannten Werkstücklagen und somit zu einer hohen Prozesssicherheit. Die Kehrseite einer hohen Erkennungssicherheit besteht im erhöhten Risiko einer unvollständigen Entleerung eines Ladungsträgers, da tendenziell weniger Werkstücklagen gefunden werden. Hierdurch könnte sich die Anlagenverfügbarkeit reduzieren, da dem angeschlossenen Fertigungsschritt keine weiteren Werkstücke zugeführt werden.

Falls zu starke Abweichungen des Erwartungswerts in der praktischen Anwendung zu unzuverlässigen Lokalisierungsergebnissen führen, kann ein zusätzlicher Test durch Überprüfung der Werkstückkontur eingeführt werden, um die Zuverlässigkeit wieder zu erhöhen. Es ist bekannt, dass die Werkstückkontur beim menschlichen Sehen eine wichtige Funktion bei der Objekterkennung besitzt [Attneave1954]. Die Werkstückkontur eignet sich daher für eine zusätzliche Validierung von Hypothesen, durch die Rückprojektion der Werkstückgeometrie in die Sensormesswerte und einem anschließenden Vergleich der Konturverläufe, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch keine nähere Betrachtung finden soll.

4.5 Erprobung im industriellen Einsatz

In diesem Kapitel wird die Erprobung des Verfahrens zur Objektlageerkennung im industriellen Einsatz vorgestellt. Die Möglichkeit zum Einlernen neuer Werkstücke wird in Abschnitt 4.5.1 betrachtet, die insbesondere bei einem variablen Teilespektrum einen hohen Stellenwert einnimmt. In Abschnitt 4.5.2 wird die Einbettung des Verfahrens in eine Entnahmeplanungssoftware aufgezeigt, die alle erforderlichen Verfahrwege zur Entnahme eines Werkstücks aus Ladungsträgern berechnet und speziell für das Verfahren zur Objektlageerkennung entwickelt wurde. In Abschnitt 4.5.3 folgt abschließend eine Übersicht des Gesamtanlagenverhaltens und der hierfür angefertigten Ablaufsteuerungen.

4.5.1 Einlernen neuer Werkstücke

Als Einlernen neuer Werkstücke soll der Vorgang bezeichnet werden, der es ermöglicht, das Verfahren zur Objektlageerkennung auf einen neuen Werkstücktyp zu übertragen. Dieser Einlernvorgang sollte nach Möglichkeit einfach umsetzbar sein, da davon ausgegangen wird, dass es während der Lebensdauer eines automatisierten Zuführsystems häufig zu Umrüstungen auf einen neuen Werkstücktypen kommt. Dies kann entweder der Fall sein, wenn der Produktlebenszyklus eines Werkstücks beendet ist oder aufgrund variierender Stückzahlabfragen die Auslastung des nachfolgenden Fertigungsschritts erhöht werden soll und daher ein neuer Werkstücktyp eingeführt wird. In Abbildung 4-12 ist erkennbar, dass kundenseitig bereits in der Konzeptionsphase ein Teilespektrum zwischen fünf und zehn Werkstücktypen eingeplant wird.

Um eine möglichst flexible Erweiterbarkeit des Verfahrens zur Objektlageerkennung gewährleisten zu können, sollen alle notwendigen Parameter in zwei Klassen eingeteilt werden: Die erste Klasse dient der Konfiguration von Werkstückfamilien und setzt gegebenenfalls Expertenwissen voraus. Innerhalb der zweiten Klasse sind werkstückspezifische Anpassungen möglich, die mittels Anwenderwissen umsetzbar sein sollten. Auf diese Weise ist es möglich, neue Werkstücktypen innerhalb einer Werkstückfamilie direkt vom Endanwender in der Fertigung einlernen zu lassen.

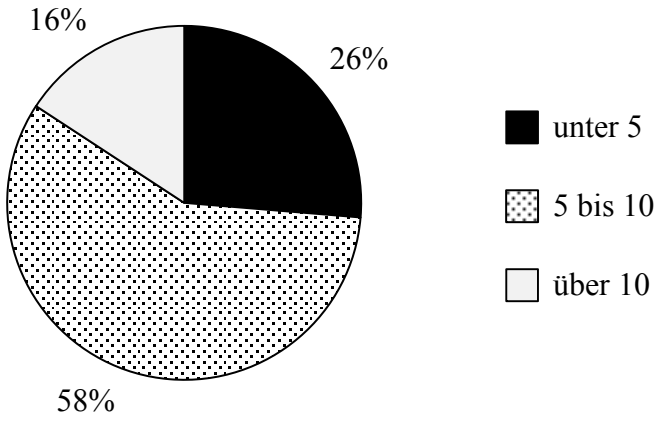

Abbildung 4-12 Geplantes Teilespektrum eines automatisierten Zuführsystems. Eigene Erhebung basierend auf 38 Kundenanfragen im Zeitraum von Anfang 2010 bis Mitte 2012.

Konfiguration von Werkstückfamilien

Die erste Klasse der Konfiguration dient der Einstellung von Werkstückfamilien. Eine Werkstückfamilie umfasst alle Werkstücktypen, deren visuelle Eigenschaften günstige Voraussetzungen für eine gemeinsame Abstraktion bieten. Diese Konfigurationsklasse enthält Parameter, die nur mit einem tieferen Verständnis der Algorithmik einstellbar sind. Die Parameter sollen so gewählt werden, dass sie für ähnliche Werkstücke konstant bleiben können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Werkstückfamilien gebildet: Kettenglieder, Kontaktbleche und Lenkradskelette. Für die in einer Werkstückfamilie enthalten Parameter soll exemplarisch der Höchstabstand Δz bei der Bestimmung interessanter Punkte genannt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4), sowie die Einstellung des Signifikanzniveaus α (vgl. Abschnitt 4.4.6).

Werkstückspezifische Anpassung innerhalb einer Werkstückfamilie

Die zweite Klasse der Konfiguration dient der Anpassung vorhandener Werkstückfamilien und beinhaltet Parameter, die nach einer entsprechenden Schulung vom Endanwender selbst eingestellt werden können, wobei die Anzahl der Parameter idealerweise sehr gering ist, um den Schulungsaufwand minimieren zu können. Zum Einlernvorgang gehört es, dem Verfahren zur Objektlageerkennung ein entsprechendes Flächenmodell zur Geometriebeschreibung zugänglich zu machen. Die optionale Angabe der Bereitstellungsart ermöglicht die Festlegung vorkommender Werkstückorientierungen und schränkt damit den Suchraum ein bzw. reduziert damit die Laufzeit potentiell.

Weiterhin müssen bei der werkstückspezifischen Anpassung die Diskretisierungsschrittweiten festgelegt werden, was durch die Angabe der verwendeten Sensorauflösung durchgeführt werden kann. Die gewünschte Erkennungssicherheit kann schließlich über die Festlegung der Erwartungswertkorrektur $\Delta\mu$ erfolgen, die das Spannungsfeld zwischen zu wenig erkannten Werkstücken und falschen Lokalisierungen beschreibt. In Tabelle 4-1 sind die vier Parameter noch einmal zusammengefasst.

Parameter	Einstellung
Werkstückgeometrie	Flächenmodell
Orientierungsmöglichkeiten	Chaotische oder semichaotische Bereitstellung
Erkennungsgenauigkeit	Verwendete Sensorauflösung
Erkennungssicherheit	Erwartungswertkorrektur $\Delta\mu$ zur Anpassung des Annahmebereichs

Tabelle 4-1 Parameter zum Einlernen neuer Werkstücke bei gegebener Werkstückfamilie.

4.5.2 Entnahmeplanung

Die Entnahmeplanung hat die Aufgabe, die für den Entnahmevorgang erforderlichen Verfahrbewegungen des Roboters zu berechnen. Das Ergebnis der Entnahmeplanung besteht in einem Pfad zum Werkstück bzw. zu dem am Werkstück befindlichen Greifpunkt sowie einem Pfad, um das gegriffene Werkstück aus dem Ladungsträger zu entnehmen. Die einzelnen Schritte der Entnahmeplanung werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Szenenerfassung – Soll ein Werkstück entnommen werden, wird im ersten Schritt die Szene mit einer 3D-Sensorik erfasst. Hierbei muss sichergestellt sein, dass der Ladungsträgerinhalt zu einem möglichst großen Teil sichtbar ist und nicht durch Störkonturen verdeckt wird.

Ladungsträger-Lageerkennung – Sofern keine ausreichend hohe Positioniergenauigkeit des Ladungsträgers gewährleistet werden kann, soll eine Ladungsträger-Lageerkennung erfolgen. Kann der Ladungsträger nicht korrekt lokalisiert werden, muss angenommen werden, dass sich ein falscher oder gar kein Ladungsträger in der Szene befindet, und der Zyklus wird abgebrochen.

Da ein Ladungsträger als starrer Körper angenommen wird, kann das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren zur Objektlagenerkennung auch für die Ladungsträger-Lageerkennung verwendet werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Freiheitsgrade des Ladungsträgers wird die-

se Aufgabe als weniger komplex gegenüber der Werkstück-Lageerkennung betrachtet und daher nicht näher vorgestellt. Lediglich Ergebnisse zur Dauer der Ladungsträger-Lageerkennung finden sich in Abschnitt 4.6.6.

Leerkistenerkennung – Die Leerkistenerkennung dient dem Zweck, eine Meldung an die übergeordnete Steuerung machen zu können, um einen Ladungsträgerwechsel zu initiieren. Ein leerer Ladungsträger stellt somit einen regulären Abbruch des Zyklus dar. Ein leerer Ladungsträger soll dadurch erkannt werden, dass sich innerhalb des Ladungsträger-Innenvolumens keine relevante Anzahl an Sensormesswerten befindet.

Fremdkörpererkennung – Auch bei als sortenrein angenommener Bereitstellung kann es zu Fremdkörpern im Ladungsträger kommen, da Fehler im Materialfluss nicht ausgeschlossen werden können. Bei der Fremdkörpererkennung muss unterschieden werden, ob es sich bei den im Ladungsträger aufgenommenen Sensormesswerten entweder um ein (noch) nicht erkanntes Werkstück oder um Falschteile handelt. Ein Fremdkörper soll daher nur gemeldet werden, wenn sich weniger Sensormesswerte im Ladungsträger-Innenvolumen befinden als die minimale Werkstückoberfläche erwarten lässt und es sich nicht um einen leeren Ladungsträger handelt.

Werkstück-Lageerkennung – Die Werkstück-Lageerkennung wird gemäß dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren durchgeführt. Für jedes Zuführsystem kann eine anwendungsspezifische Parametrierung vorgenommen werden, bei der die gewünschte Anzahl an Werkstücklagen und optional auch die maximale Suchdauer festgelegt werden.

Greifpunktberechnung und Bahnplanung – Für die gefundenen Werkstücklagen wird eine Zugänglichkeitsbetrachtung in Form einer Greifpunktberechnung und Bahnplanung durchgeführt. Das am Fraunhofer IPA entwickelte Verfahren [Spenrath2012] simuliert mit Hilfe eines Flächenmodells sowohl des Greifsystems als auch des Roboters den Entnahmevorgang und überprüft diesen auf Kollisionen mit Sensormesswerten. Wird ein Pfad gefunden, mit dem eine kollisionsfreie Entnahme möglich erscheint, so können entsprechende Verfahrbewegungen an die übergeordnete Steuerung übermittelt werden. Andernfalls wird eine Meldung herausgegeben, dass die Werkstücke nicht zugänglich sind.

Eine grafische Darstellung der Entnahmeplanung kann Abbildung 4-13 entnommen werden.

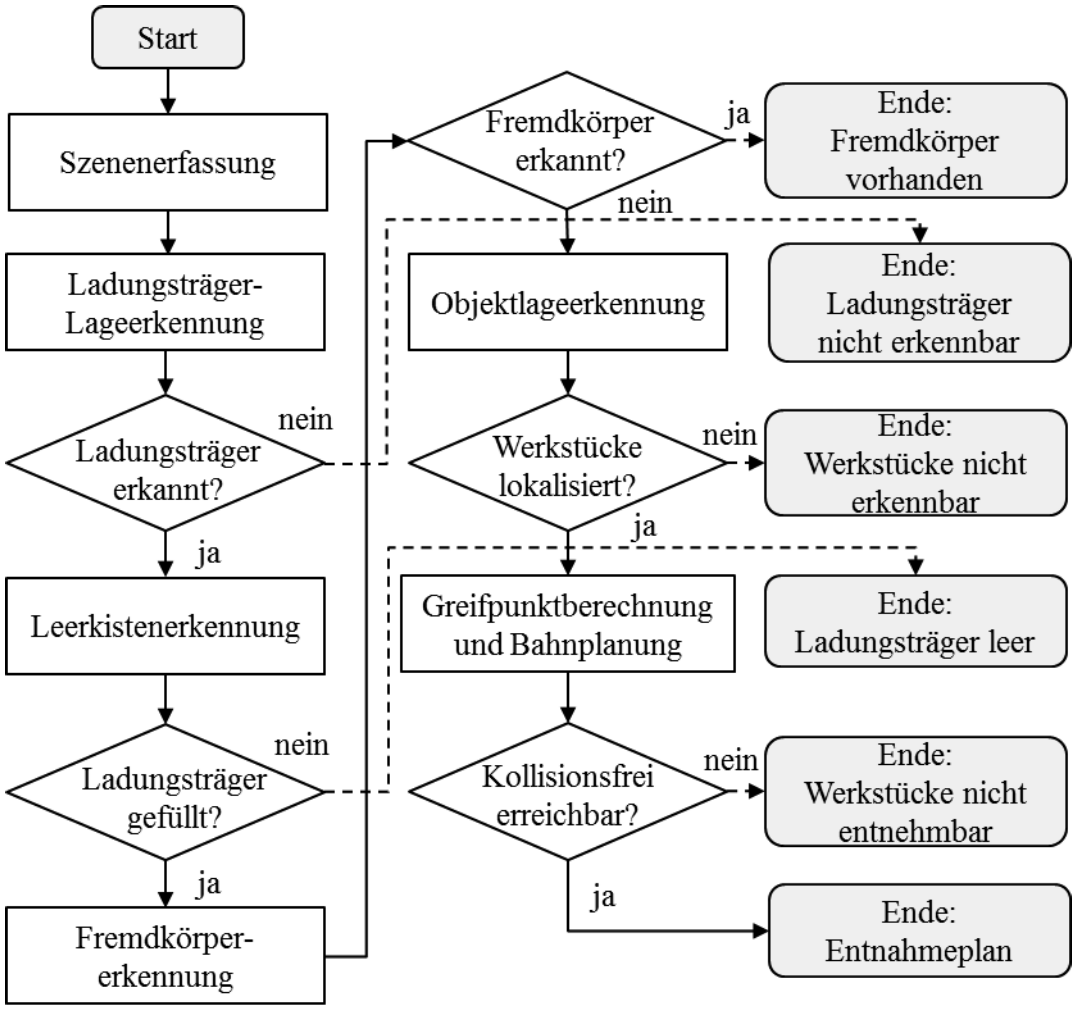

Abbildung 4-13 Regelablauf für die Entnahmeplanung. Der Start eines Zyklus erfolgt durch die übergeordnete Steuerung und endet mit einem in der rechten Spalte aufgeführten Zustand.

4.5.3 Ablaufsteuerung

In diesem Abschnitt soll die Einbettung der Entnahmeplanung in die übergeordnete Ablaufsteuerung vorgestellt werden, die das Gesamtsystem einer automatisierten Zuführung koordiniert. Typischerweise umgesetzt wird diese auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), in den betrachteten Anwendungsfällen mit der Simatic S7 von Siemens oder der Allen-Bradley SLC von Rockwell Automation.

Die Koordinaten des Gesamtsystems umfassen alle zur Anlage gehörenden Komponenten, wie der Entnahmeplanung und dem Roboter, aber auch die Koordinaten zu einem zentralen Leitrechner in der Fertigung, falls dieser vorhanden ist, oder andernfalls direkt zum angeschlossenen Fertigungsschritt. Weiterhin verfügt die Ablaufsteuerung in der Regel auch über eine Benutzungs-

schnittstelle (auch: Benutzerschnittstelle), über die ein Arbeiter alle Statusinformationen des automatisierten Zuführsystems einsehen kann und gegebenenfalls nach einem manuellen Eingriff die Anlage erneut starten kann.

Es wurden zwei verschiedene Ablaufsteuerungen entworfen, die je nach Montage des Sensorsystems zum Einsatz kommen können. Hierbei wird zwischen stationären und robotergeführten Sensorsystemen unterschieden, die anhand zweier in dieser Arbeit realisierten Anwendungen in Abbildung 4-14 dargestellt werden.

Abbildung 4-14 Stationäre und robotergeführte Varianten des Sensormesssystems von in dieser Arbeit realisierten Zuführsystemen. Links: Abbildung eines automatisierten Zuführsystems in Zusammenarbeit mit der Firma Liebherr Verzahntechnik GmbH. Das über dem Ladungsträger stationär montierte Sensorsystem kann parallel zur Werkstückübergabe den Inhalt des Ladungsträgers erfassen. Rechts: Realisiertes Zuführsystem bei der Firma TAKATA in Zusammenarbeit mit der Firma Faude Automatisierungstechnik GmbH. Mit dem am Roboter montierten Sensorsystem können verschiedene Ladungsträger, die sich im Arbeitsraum des Roboters befinden, erfasst werden.

Die Ablaufsteuerung koordiniert die Entleerung des Bereitstellungspuffers, sodass dem angeschlossenen Fertigungsschritt bei Bedarf ein neues Werkstück zur Verfügung gestellt wird. Der Füllstand des Bereitstellungspuffers ist der Ablaufsteuerung stets über angeschlossene Sensoriken, beispielsweise Lichttaster, bekannt. Anschließend wird die Entnahmeplanung angesteuert und deren Entnahmedaten werden an den Roboter zur Werkstückentnahme und -übergabe übermittelt. Wird ein leerer Ladungsträger durch die Entnahmeplanung gemeldet, initiiert die Ablaufsteuerung den erforderlichen Ladungsträgerwechsel.

Je nachdem wie das Sensorsystem montiert ist, unterscheidet sich die Ablaufsequenz geringfügig: Die stationäre Variante ermöglicht im Gegensatz zur robotergeführten Variante Parallelisie-

rungsmöglichkeiten bei der Werkstückübergabe und der Entnahmeplanung, die in Abbildung 4-15 dargestellt werden.

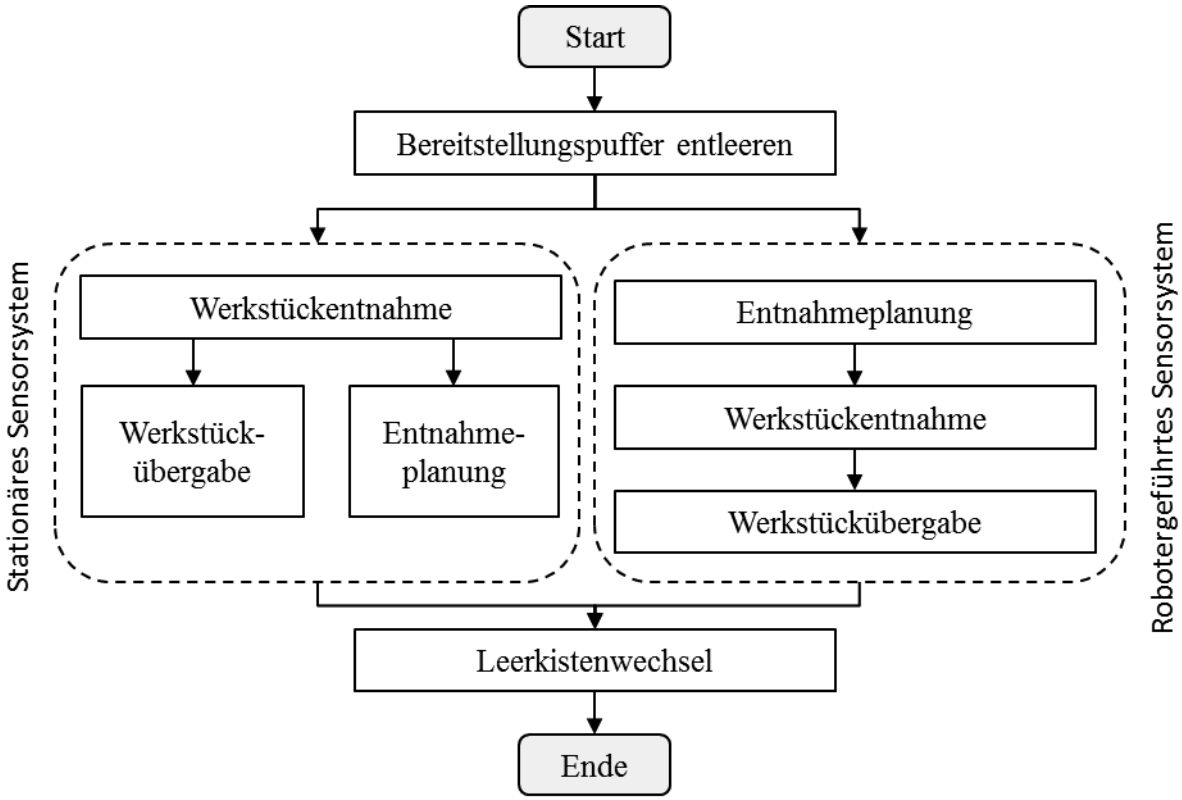

Abbildung 4-15 Ablaufsteuerung. Die Unterscheidung erfolgt zwischen stationärem oder robotergeführtem Sensorsystem.

4.6 Ergebnisse

4.6.1 Evaluierung interessanter Punkte

Die Auswertung der Evaluierungswerte der interessanten Punkte ist exemplarisch anhand der Werkstückfamilie der Kettenglieder vorgenommen worden. In Abbildung 4-16 sind interessante Punkte, die zu einer gültigen Werkstücklage geführt haben bzw. deren Positionen in der Vorrangwarteschlange und die entsprechenden Häufigkeiten dargestellt. Die Position in der Vorrangwarteschlange bezieht sich auf den Zeitpunkt nach erfolgter Expansion der Baumwurzel und richtet sich nach dem zugewiesenen Evaluierungswert.

Zu den interessanten Punkten, die durch die Evaluierungsfunktion am niedrigsten bewertet bzw. am aussichtsreichsten eingestuft worden sind, wurden am häufigsten gültige Werkstücklagen lokalisiert. Somit muss nur ein geringer Teil des Suchbaums expandiert werden, da die aussichts-

reichsten interessanten Punkte in der Regel auch eine Lösung beinhalten. Auf Grundlage dieser Untersuchung kann also festgestellt werden, dass die Evaluierungsfunktion der interessanten Punkte imstande ist, gemäß den definierten Kriterien die heuristische Suche positiv zu steuern.

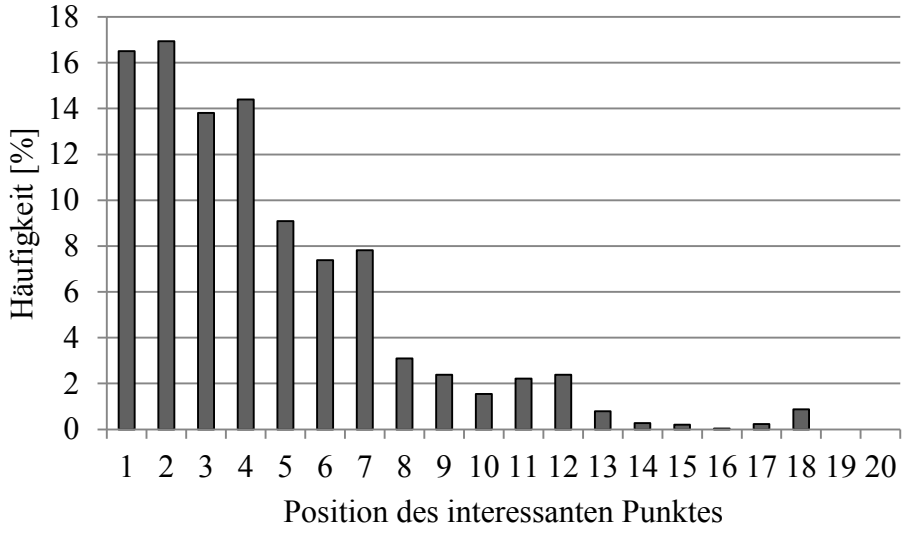

Abbildung 4-16 Evaluierungswerte interessanter Punkte. Für 2951 erkannte Kettenglieder ist die Position der interessanten Punkte in der Vorrangwarteschlange dargestellt, die zu einer gültigen Werkstücklage geführt haben.

4.6.2 Evaluierung relativer Werkstücklagen

Im Rahmen der Hough-Abstimmung soll der Umfang der Abstimmungsdatenbank betrachtet werden. Anschließend werden die erhaltenen Abstimmungsergebnisse sowie deren resultierende Prüfgrößen analysiert.

Größe der Abstimmungsdatenbank

In Abbildung 4-17 sind die resultierenden Größen der Abstimmungsdatenbanken für Kettenglieder aufgezeigt. Die verschiedenen Typen von Kettengliedern führen zu unterschiedlichen Größen der sichtbaren Oberfläche, was bei gleicher Parametrierung die Größe der Abstimmungsdatenbank maßgeblich beeinflusst. Hierbei wird exemplarisch zwischen einer chaotischen und einer semi-chaotischen Bereitstellung unterschieden, wobei die semi-chaotische Bereitstellung einen kleineren Suchraum aufweist und somit zu einer kleineren Abstimmungsdatenbank führt.

Demnach kann die Datenbank auch für größere Werkstücke in chaotischer Bereitstellung eine handhabbare Größe annehmen. So ist der Zugriff über den Hauptspeicher bei einer sich ergeben-

den Höchstgröße von etwa 550 Megabyte mit handelsüblichen Recheneinheiten problemlos möglich.

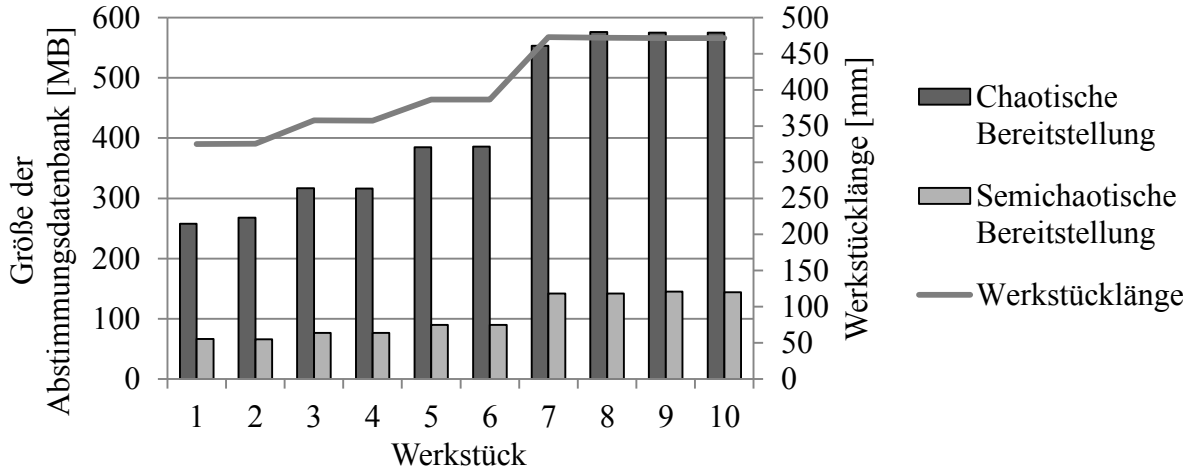

Abbildung 4-17 Größe der Abstimmungsdatenbank in Abhängigkeit der Werkstücklänge anhand zehn verschiedener Kettenglieder. Die Größe der Abstimmungsdatenbank nimmt mit steigender Werkstücklänge zu, wobei die Werkstücklänge innerhalb der Werkstückfamilie der Kettenglieder als proportional zur Größe der Werkstückoberfläche angesehen werden kann.

Abstimmungsergebnisse und Prüfgröße

Die Visualisierung der Abstimmungsergebnisse in Abbildung 4-18 liefert eine Übersicht zu den in der Praxis erhaltenen Werten, die zu einer Annahme einer Werkstücklage geführt haben. Die Verteilung der Abstimmungsergebnisse variiert zwischen den betrachteten Werkstückfamilien, da anwendungsspezifische Einflussfaktoren auf die Abstimmungsergebnisse wirken. Je chaotischer die Werkstückbereitstellung ausfällt, desto größer ist die auftretende Abweichung der Abstimmungsergebnisse vom Erwartungswert und desto niedriger fällt dieser aus.

Mit Blick auf die aus den Abstimmungsergebnissen resultierenden Prüfgrößen ist in Abbildung 4-19 zu erkennen, dass diese einen annähernd standardnormalverteilten Verlauf aufweisen. Die Graphen der Kontaktbleche und der Lenkradskelette verlaufen rechtsseitig nicht bis zur Grenze des Annahmebereichs, der in diesen Fällen ein Abstimmungsergebnis von über eins voraussetzen würde.

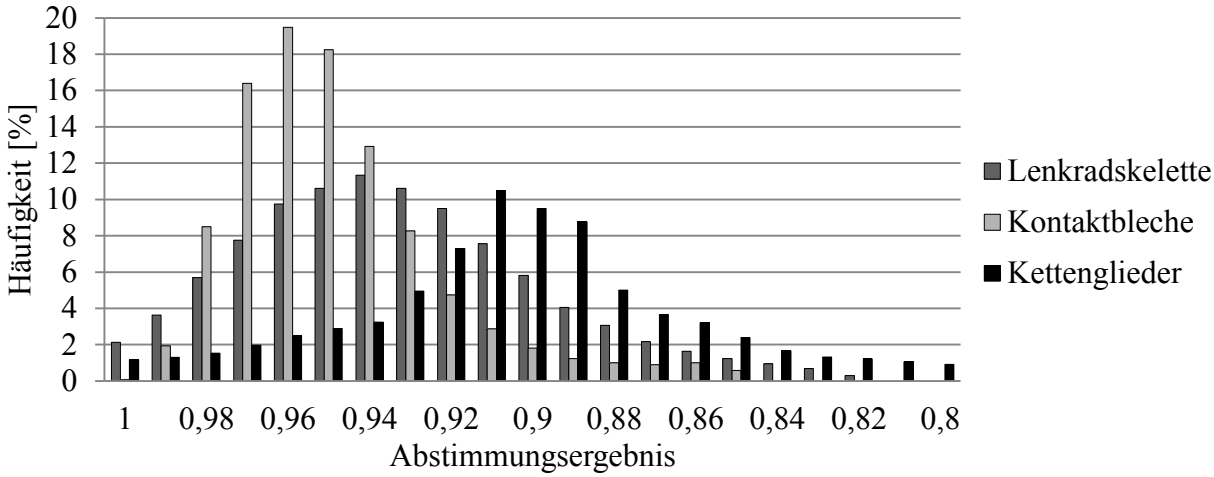

Abbildung 4-18 Häufigkeitsverteilung der Abstimmungsergebnisse k_{Hough} für lokalisierte Werkstücklagen. Berücksichtigt wurden die Ergebnisse für 267.244 Lenkradskelette, 78.934 Kontaktbleche und 9.159 Kettenglieder im industriellen Einsatz.

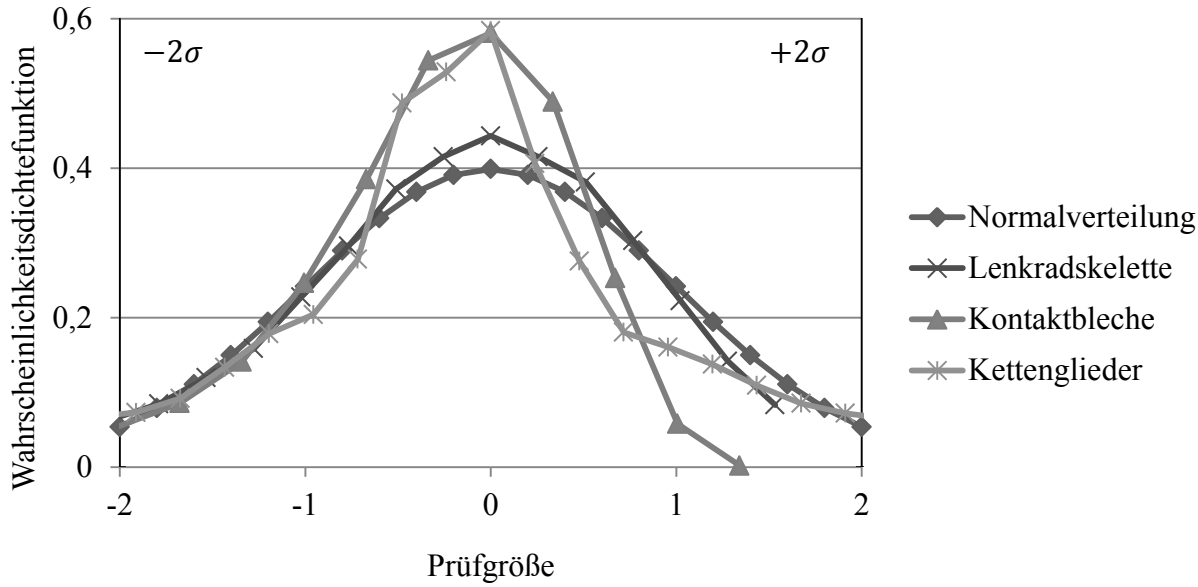

Abbildung 4-19 Ergebnisse der Prüfgröße z_{Hough} für lokalisierte Werkstücklagen im Intervall von $\pm 2\sigma$. Berücksichtigt wurden die Ergebnisse für 267.244 Lenkradskelette, 78.934 Kontaktbleche und 9.159 Kettenglieder im industriellen Einsatz.

Die Unterschiede bei den Abstimmungsergebnissen zwischen den Werkstückfamilien und die vorgenommene Korrektur des Erwartungswerts werden im Folgenden kurz erörtert:

- Bei den *Kontaktblechen* wurde der verwendete Erwartungswert $\tilde{\mu}_{Hough} = 0{,}96$ über die Erwartungswertkorrektur $\Delta\mu = -0{,}03$ erhalten. Die vergleichsweise geringe Absenkung

des theoretischen Erwartungswerts kann durch die geringen Abschattungen im Ladungsträger begründet werden, da die Geometrie der Kontaktbleche eher flach ist und ihre Bereitstellungssituation weniger chaotisch ausfällt, sodass die Abstimmungsergebnisse im Vergleich zu den anderen Werkstückfamilien die höchsten Werte aufweisen.

- Die *Lenkradskelette* besitzen Werkstückstrukturen, die im Verhältnis zur Sensorauflösung verhältnismäßig klein sind. Dort treten potentiell höhere Messungenauigkeiten auf, da erfahrungsgemäß die Messfehler an Kanten besonders hoch ausfallen. Insbesondere die vergleichsweisen dünnen Lenkradspeichen werden daher unter Umständen ungenau erfasst. Hinzu kommt in diesem Fall, dass bei diesen dünnen und langen Strukturen eine leichte, durch die Diskretisierung bedingte, Orientierungsungenauigkeit das Abstimmungsergebnis stark verschlechtern kann. Die Abstimmungsergebnisse weisen hier durchschnittlich etwas niedrigere Werte auf, sodass der verwendete Erwartungswert $\tilde{\mu}_{Hough} = 0{,}94$ bei einer Erwartungswertkorrektur von $\Delta\mu = -0{,}05$ beträgt.
- Die *Kettenglieder* haben den geringsten Ordnungszustand der betrachteten Anwendungsfälle, sodass es bei der chaotischen Bereitstellung zu starken gegenseitigen Verdeckungen der Werkstücke kommt, was die Abstimmungsergebnisse gemäß der Abbildung am stärksten mindern kann. Eine Verschiebung des verwendeten Erwartungswerts auf $\tilde{\mu}_{Hough} = 0{,}91$ erfolgt mit einer Erwartungswertkorrektur von $\Delta\mu = -0{,}08$.

Auf Grundlage der erhaltenen Ergebnisse und der Tatsache, dass die realisierten Anwendungen erfolgreich im Dreischichtbetrieb laufen, kann die Annahme getroffen werden, dass die vorgestellte Evaluierungsfunktion nach erfolgter Einstellung der Erwartungswertkorrektur mit Hilfe der eingeführten Prüfgröße eine robuste Werkstück-Lageerkennung ermöglicht.

4.6.3 Sortiervorgänge

Die vorgestellten Sortieralgorithmen, *Quicksort* und *Insertionsort*, sollen mit und ohne Vorsortierung der relativen Werkstücklagen getestet werden. Eine weitere Unterscheidung bei der Untersuchung soll durch die Beschaffenheit der unmittelbaren Werkstückumgebung und der hierdurch entstehenden Umgebungsstörung vorgenommen werden. Bei einem Werkstück, in dessen unmittelbarer Umgebung sich kaum andere Werkstücke oder Störkonturen befinden, wird der Abstimmungsprozess weniger durch Stimmabgaben, die nicht zur Werkstückoberfläche des interessanten Punkts gehören, überlagert. Ein entsprechend isoliert positioniertes Werkstück weist in diesem Sinne eine geringe Umgebungsstörung auf. Ein Werkstück, bei dem es zu Abschattungen durch andere Werkstücke kommt, weist demgegenüber eine starke Umgebungsstörung auf.

Abbildung 4-20 stellt zunächst das Laufzeitverhalten der Sortiervorgänge mit und ohne Vorsortierung dar. In Abbildung 4-21 werden die Laufzeiten der Sortieralgorithmen miteinander verglichen. Die Verwendung einer Vorsortierung führt zu einer Geschwindigkeitssteigerung der Sortierverfahren, weshalb sie für das Verfahren zur Objektlageerkennung angewendet wird. Weiterhin wirkt sich eine geringe Umgebungsstörung positiv auf das Laufzeitverhalten aus. Bei *Insertionsort* kann die durchschnittliche Sortierdauer um 50% verringert werden, gegenüber einer Reduktion von etwa 20% bei *Quicksort*. Bei einer Vorsortierung ohne Umgebungsstörungen sind die Unterschiede in der Laufzeit beider Algorithmen am geringsten. In allen anderen Fällen schneidet *Quicksort* im Mittel deutlich besser ab und sollte daher in der Praxis dem *Insertionsort* vorgezogen werden.

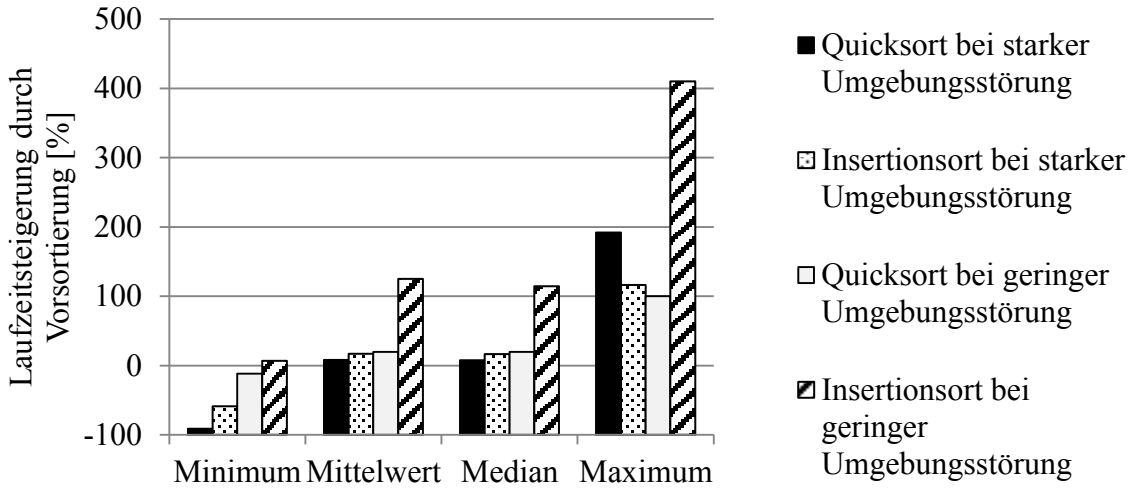

Abbildung 4-20 Laufzeitverhalten der Sortierverfahren für 8.082 ausgewertete Sortiervorgänge.

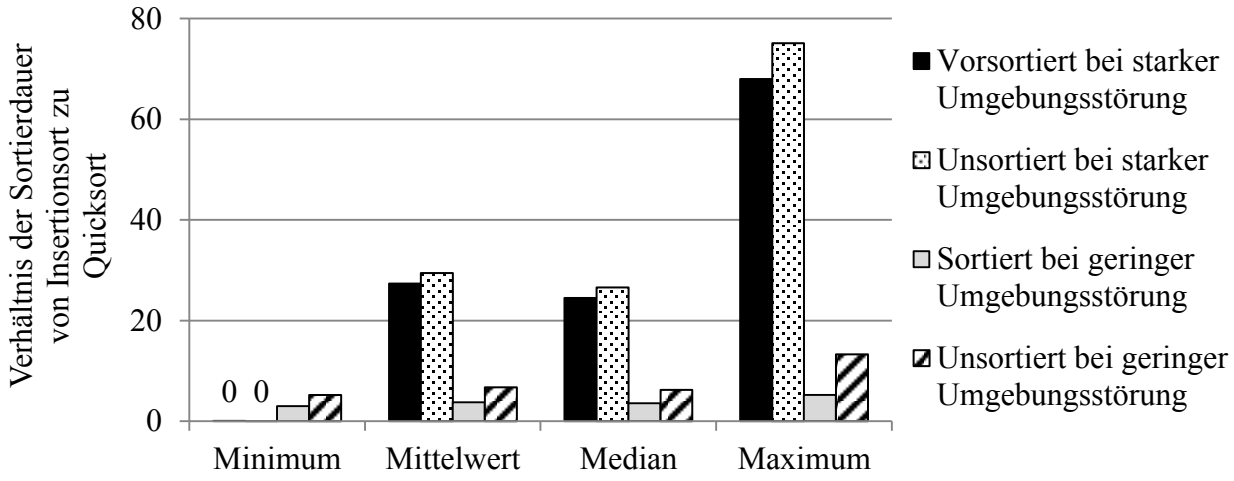

Abbildung 4-21 Vergleich der Leistungsfähigkeit zwischen *Quicksort* und *Insertionsort*.

4.6.4 Anzahl expandierter Baumknoten

Die Anzahl expandierter Baumknoten soll als Maßeinheit für die Güte der in dieser Arbeit entwickelten Bestensuche betrachtet werden. Dieses Gütekriterium zeigt auf, wie zielgerichtet das heuristische Verfahren den Suchbaum durchsuchen konnte.

In Abbildung 4-22 sind die maximal durchgeführten Expansionen für verschiedene Werkstückfamilien dargestellt. Das Ziel der Bestensuche kann bei den betrachteten Fällen als erfüllt angesehen werden, da nur ein Bruchteil des Suchraums durchsucht werden muss, um eine gültige Werkstücklage zu finden.

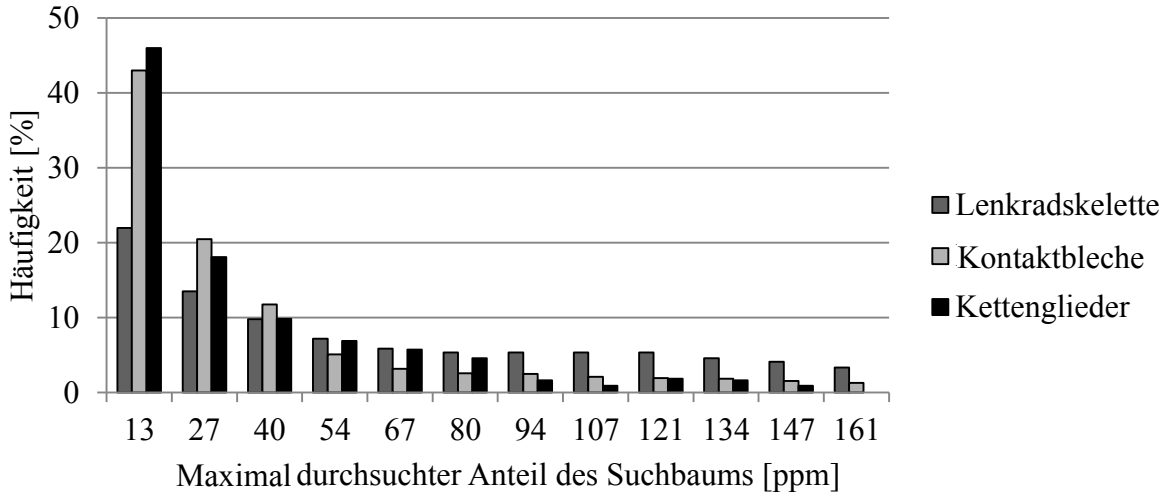

Abbildung 4-22 Maximale Anzahl expandierter Baumknoten bis zum Auffinden einer korrekten Werkstücklage in ppm (Teile pro Million) des gesamten Suchraums. Für Lenkradskelette wurden 180.981 verschiedene Werkstücklagen betrachtet. Bei den Kontaktblechen besteht die Grundgesamtheit aus 63.371 gefundenen Werkstücken und bei der Werkstückfamilie der Kettenglieder wurden 6.024 Werkstücklagen berücksichtigt.

4.6.5 Anzahl gefundener Werkstücke

Die Anzahl an Werkstücken, die innerhalb eines Zyklus gefunden werden, ist ein wichtiger Indikator für die Eignung eines Verfahrens zur Objektlageerkennung und sollte möglichst hoch sein. Abbildung 4-23 zeigt, dass die Anzahl gefundener Werkstücke in einem Suchdurchlauf durchschnittlich drei bis vier beträgt. In der Praxis konnte gezeigt werden, dass diese Anzahl ausreichen kann, um mindestens ein zugängliches Werkstück zu identifizieren und entnehmen zu können. Die Anzahl gefundener Werkstücke durch das vorgestellte Verfahren ist somit in der Lage, die Verfügbarkeit eines automatisierten Zuführsystems zu erhöhen.

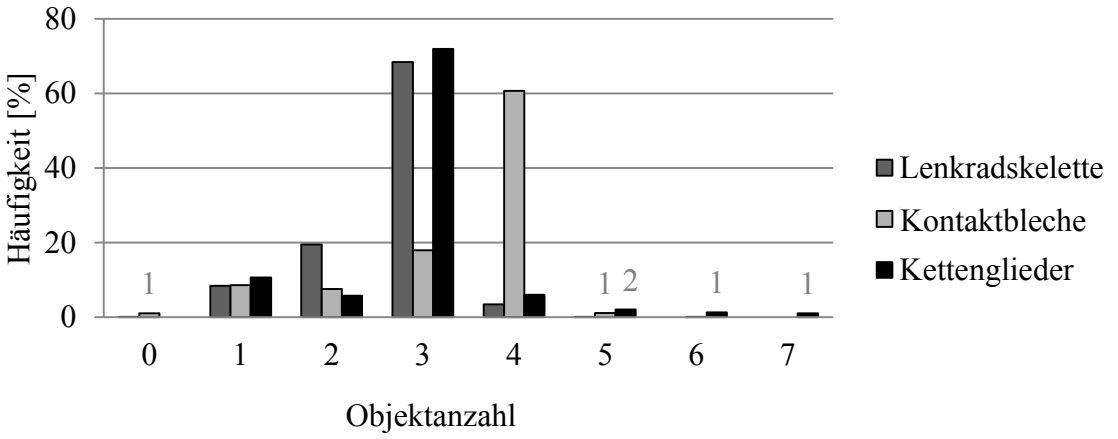

Abbildung 4-23 Anzahl gefundener Werkstücke nach jeweils maximal drei Sekunden Suchdauer bezogen auf die gesamte Laufzeit der Objektlagenerkennung. Für die Werkstückfamilie der Lenkradskelette wurden 100.092 Suchdurchläufe berücksichtigt, bei denen in 68% der Fälle drei Werkstücke lokalisiert wurden. Bei den Kettengliedern liegt dieser Wert bei knapp 72% nach 8.887 Durchläufen. Bezogen auf 23.220 Zyklen bei den Kontaktblechen wurden in 61% der Fälle vier Werkstücke erkannt.

4.6.6 Dauer der Lageerkennung

Die Dauer der Lageerkennung stellt, analog zur Anzahl gefundener Werkstücke, ebenfalls eine wichtige Kenngröße für die Eignung eines Verfahrens zur Objektlageerkennung dar. Die Dauer der Lageerkennung bezieht sich sowohl auf die Werkstück-Lageerkennung als auch auf die Ladungsträger-Lageerkennung, sofern diese bei Ladungsträger-Positionierungenauigkeiten vorgeschaltet wird.

Bei der Auslegung eines automatisierten Zuführsystems soll eine Obergrenze festgelegt werden, die ausreicht, um die Anlage mit der geforderten Taktzeit zu betreiben. Eine Unterschreitung dieser Obergrenze kann sich bei Verwendung eines Pufferspeichers bei der Werkstückübergabe positiv auf die Anlagenverfügbarkeit auswirken.

Dauer der Werkstück-Lageerkennung

In Abbildung 4-24 ist erkennbar, dass die Suchdauer in der überwiegenden Anzahl von Fällen die maximale gegebene Suchdauer von drei Sekunden deutlich unterschreitet. Für die Werkstückfamilie der Lenkradskelette konnte in 48% der Fälle die Suche nach weniger als 500 ms beendet werden. Bei den Kettengliedern liegt dieser Wert bei knapp 38% und bei den Kontaktblechen bei 35%. Je nach Anwendungsfall beträgt die Gesamtzykluszeitdauer zwischen 12 und

27 Sekunden, so dass die Objektlageerkennung hier einen verhältnismäßig geringen Anteil einnimmt und den Anlagentakt nicht unverhältnismäßig stark erhöht.

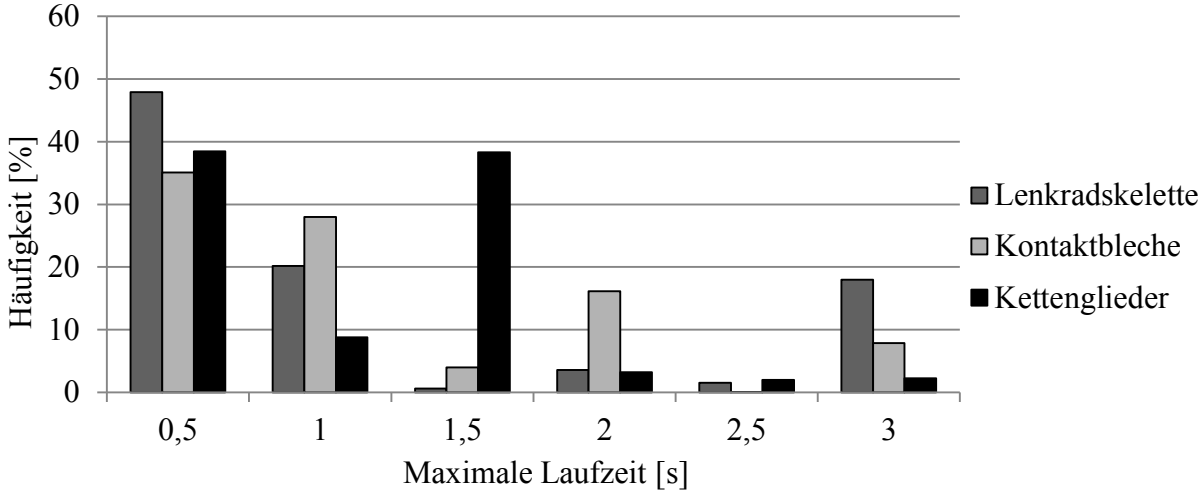

Abbildung 4-24 Suchdauer der Objektlageerkennung bis zum Erfüllen der Abbruchkriterien. Für die Werkstückfamilie der Lenkradskelette wurden 100.092, bei den Kettengliedern 8.887 und bei den Kontaktblechen 23.220 Suchdurchläufe berücksichtigt.

Dauer der Ladungsträger-Lageerkennung

Zusätzlich zur Werkstück-Lageerkennung kann die Ladungsträger-Lageerkennung einen Einfluss auf die Gesamtdauer der Lageerkennung haben.

Bei den realisierten Zuführsystemen der Lenkradskelette und Kettenglieder konnte die Positioniergenauigkeit des Ladungsträgers nicht ausreichend genau gewährleistet werden. Denn die mechanischen Führungsschienen bzw. Endanschläge ermöglichen eine rotatorische Ungenauigkeit von ungefähr bis zu 20° und eine translatorische Verschiebung von etwa 10 cm. Um dies auszugleichen wurde in diesen Fällen der Werkstück-Lageerkennung eine Ladungsträger-Lageerkennung vorgeschaltet.

In Abbildung 4-25 sind die Dauern zur Ladungsträger-Lageerkennung für zwei verschiedene Ladungsträgertypen dargestellt. Die Geometrien von Ladungsträgertyp 1 und 2 unterscheiden sich durch das Vorhandensein von seitlich angebrachten Henkeln sowie der Größe des Ladungsträger-Innenraums. Die durchschnittliche Suchdauer beträgt ca. 150 ms, was durch die vergleichsweise geringe Suchraumgröße erklärt werden kann, da die Ladungsträger lediglich drei Freiheitsgrade besitzen. Die Dauer der Ladungsträger-Lageerkennung hat somit genau wie die Werkstück-Lageerkennung keinen großen Einfluss auf die Gesamttaktzeit der betrachteten automatisierten Zuführsysteme.

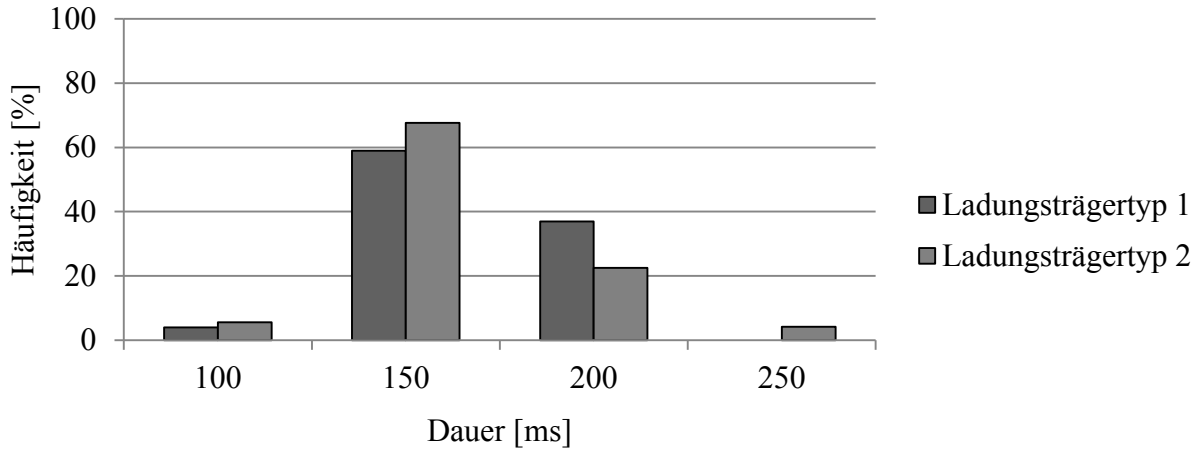

Abbildung 4-25 Dauer der Ladungsträger-Lageerkennung bei Anlagen mit nicht ausreichend gewährleisteter Positioniergenauigkeit des Ladungsträgers. Insgesamt wurden 464 Ladungsträger-Lageerkennungen berücksichtigt.

4.7 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Die verwendeten Evaluierungsfunktionen sind in der Lage, eine gezielte Steuerung der Bestensuche innerhalb des Suchbaums vorzunehmen. Die Bestensuche ist dadurch imstande, den Suchbaum nur zu einem Bruchteil durchzusuchen zu müssen, um eine Werkstücklage zu finden. Die verwendete Hough-Abstimmung hat sich darüber hinaus als geeignet erwiesen, robuste Aussagen über das Vorhandensein von Werkstücken im Ladungsträger treffen zu können.

Das Verfahren kann auf einer handelsüblichen Recheneinheit in einem Zeitfenster zwischen 0,5 und 3 Sekunden durchschnittlich drei bis vier Werkstücke im Ladungsträger lokalisieren. Die Flexibilität und Übertragbarkeit auf verschiedenste Werkstückgeometrien konnte anhand von drei Werkstückfamilien mit insgesamt 15 verschiedenen Werkstücktypen gezeigt werden. Weiterhin konnte das Verfahren auch zur Lagerkennung von Ladungsträgern eingesetzt werden, wobei die Suchdauer mit durchschnittlich unter 200 ms keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamttaktzeit der Anlage hat, die zwischen 12 und 27 Sekunden liegt.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Verfahren zur Objektlageerkennung im industriellen Einsatz angewendet werden kann. Das Einsatzgebiet erstreckt sich nachweislich über verschiedene Arten automatisierter Zuführsysteme, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Objektlageerkennung für artverwandte Aufgabenstellungen ebenfalls eignen kann.

Die realisierten Anlagen wurden vom Auftraggeber für den Dreischichtbetrieb in der Produktion abgenommen. Ein wichtiges Kriterium hierfür stellt die Verfügbarkeit der Anlage dar. Die Anlagenverfügbarkeit beschreibt den Quotienten aus Ausfalldauer und Laufdauer, wobei im Betrachtungszeitraum organisierte und geplante Stillstandszeiten sowie eine geplante Einsatzreduzierung nicht berücksichtigt werden [Spur1986]. Da die einzelnen Komponenten oder Teilsysteme des automatisierten Zuführsystems miteinander verkettet sind, ist die Gesamtzuverlässigkeit das Produkt der Einzelzuverlässigkeiten. Beispielsweise lag die Verfügbarkeit der automatisierten Zuführung von Lenkrädern, die im Rahmen dieser Arbeit realisiert wurde, bei über 98%. Implizit folgt hieraus eine Einzelzuverlässigkeit für die Objektlageerkennung von über 98%.

Im laufenden Betrieb kann es zu vereinzelten Fehlgriffen der Werkstücke kommen. Als Fehlerursache können falsch erkannte Werkstücklagen nicht ausgeschlossen werden, da die eingeführte Prüfgröße z_{Hough} nicht mit absoluter Sicherheit falsche Werkstücklagen ausschließen kann. Eine eindeutige Zuordnung der Fehlerursache zu einem Teilsystem und damit eine mögliche Quantifizierung konnte jedoch aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems und des seltenen Auftretens nicht vorgenommen werden. Die Verwendung von Bereitstellungspuffern bei der Werkstückübergabe, wie Drehspeicher und Rutschbahnen, konnte diese fehlerhaften Zyklen kompensieren, sodass keine nennenswerte Reduktion der Verfügbarkeit feststellbar ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein heuristisches Verfahren zur Objektlageerkennung für automatisierte Zuführsysteme vorgestellt. Die Aufgabe der Objektlageerkennung besteht in der Lokalisierung der Werkstücke, also der Bestimmung aller sechs Freiheitsgrade der als starr angenommenen Körper im Raum. Den vorherrschenden industriellen Anforderungen und Randbedingungen wurde in dieser Arbeit besondere Betrachtung gewidmet. Neben der Prozesssicherheit und Verfügbarkeit standen hierbei die Laufzeitgeschwindigkeit zur Gewährleistung des Anlagentakts und die Übertragbarkeit auf beliebige Geometrien im Fokus.

Die Objektlageerkennung nutzt zur Erfassung der Szene, einem mit chaotisch gelagerten Werkstücken gefüllten Ladungsträger, ein beliebiges Sensorsystem zur Tiefenmessung. Einzige Anforderung aus Sicht der Objektlageerkennung ist die im Verhältnis zur Werkstückgröße ausreichend hohe Messgenauigkeit. Aus den Tiefenmessungen resultiert als sensorische Eingangsdaten eine Punktewolke, die die Grundlage der Objektlageerkennung bildet.

Das entwickelte Verfahren zur Objektlageerkennung basiert auf einer heuristischen Baumsuche, wofür in einem ersten Schritt der Suchraum festgelegt wurde. Die Parametrisierung der Werkstücklagen bildet die Grundlage einer Diskretisierung und Beschränkung des Suchraums, der sich innerhalb des Ladungsträgers befindet. Aus der ursprünglich kontinuierlichen Darstellung resultiert nun eine endliche Menge an möglichen Werkstücklagen, sodass der Suchraum in eine Suchmenge überführt wird.

Zur Reduktion der Suchmenge werden die Elemente, die diskreten Werkstücklagen, über zwei Komponenten ausgedrückt. Die erste Komponente beschreibt einen interessanten Punkt innerhalb des Suchraums. Die zweite Komponente beschreibt schließlich eine Werkstücklage relativ zu einem interessanten Punkt. Ausgehend von der Annahme, dass sich der interessante Punkt auf der Werkstückoberfläche befindet, stellt dieser somit eine Zwangsbedingung an die Werkstücklagen, sodass in der Konsequenz die entstehenden Teilsuchmengen eine wesentlich geringere Komplexität gegenüber der ursprünglichen Suchmenge aufweisen. Weiterhin ist es möglich, die beiden Komponenten sukzessive zu bestimmen, sodass der Einsatz eines Entscheidungsbaums ermöglicht wird.

Ein Entscheidungsbaum stellt eine besondere Form eines Suchbaums dar, bei dem der gesuchten Lösung in jeder Baumebene eine Komponente hinzugefügt wird. In der ersten Baumebene wird

demnach der interessante Punkt bestimmt und in der darauffolgenden Ebene die relative Werkstücklage. Die Repräsentierung der Suchmenge durch einen Entscheidungsbaum stellt bereits eine signifikante Reduktion der Suchmenge dar, die Lösungsfindung kann jedoch durch den Einsatz einer geeigneten Baumsuche effizienter hinsichtlich der Laufzeit gestaltet werden.

Als Suchstrategie der Baumsuche wurde die Bestensuche verwendet. Die Bestensuche zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine heuristische Schätzung zu jedem Baumknoten abgeben kann, wie weit die Entfernung des Baumknotens von einer Lösung ist und denjenigen Weg weiterverfolgt, der am kürzesten erscheint. Der Bestensuche obliegt nicht nur die Aufgabe, den Suchbaum möglichst zielgerichtet zu durchlaufen, sondern auch eine Lösung robust identifizieren zu können. Die Entfernungsmessung der Bestensuche wird über die Evaluierungsfunktion durchgeführt.

Die Evaluierungsfunktion kann jedem Baumknoten einen Evaluierungswert zuweisen. Bei der Evaluierung der ersten Baumebene, der interessanten Punkte, wird die Annahme getroffen, dass eine Lösung in Bereichen des Ladungsträgers, die wenige Abschattungen aufweisen und sensorisch hinreichend gut erfasst werden können, am wahrscheinlichsten anzutreffen ist.

Die Evaluierung der relativen Werkstücklagen erfolgte durch eine Hough-Abstimmung. Die Idee besteht in der Akkumulation der auf niedriger Ebene befindlichen Hinweise und deren Überlagerung. Die verwendeten Merkmale für die Hough-Abstimmung sind Sensormesswerte, die relativ zu einem interessanten Punkt betrachtet werden. Für jede Konstellation eines Sensormesswerts zu einem interessanten Punkt kann eine wahrscheinlichkeitsbasierte Aussage über die mögliche zugehörige Werkstücklage getroffen werden. Durch die Superpositionierung aller Aussagen oder Hinweise kann sich in einer als Akkumulatorraum bezeichneten Datenstruktur ein Maximum entwickeln. Dieses Maximum steht dann für eine Werkstücklage, die von den meisten akkumulierten Hinweisen als am wahrscheinlichsten betrachtet wird. Der statistische Einstichproben-Gauß-Test führt dann zu einer Gütebewertung dieser Werkstücklage. Die so erhaltene Prüfgröße kann unter Berücksichtigung der geforderten Signifikanz über die Annahme einer Werkstücklage entscheiden. Durch den Verzicht auf komplexe geometrie-spezifische Merkmale bei der Hough-Abstimmung ist die Übertragbarkeit auf ein nahezu beliebiges Werkstückspektrum möglich.

Zur Erhöhung der Prozesssicherheit kann es zukünftig gewinnbringend sein, den Fehler zweiter Art im Rahmen des statistischen Tests näher zu untersuchen. Dieser Fehler beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei der getesteten Lage um eine falsche Werkstücklage handeln könnte. Die Kombination aus dem Fehler erster Art und dem Fehler zweiter Art würde somit eine Steigerung der Aussagekraft ermöglichen und potentiell falsche Lokalisierungen reduzieren.

In zukünftigen Forschungsarbeiten sollten auch Erweiterungen zur vollautomatischen Konfiguration des Verfahrens für neue Werkstücktypen vorgenommen werden. Hierzu bietet es sich an, das Verfahren in eine Simulationsumgebung einzubinden, mit der sich Sensoreingangsdaten unterschiedlicher Bereitstellungssituationen generieren und testen lassen können mit dem Ziel, belastbare Aussagen über die Leistungsfähigkeiten des Verfahrens tätigen zu können, bevor ein automatisiertes Zuführsystem aufgebaut wird, und die Dauer der Inbetriebnahme sowie Produktionsanlaufphase zu verkürzen. Die Möglichkeit zum Testen einer Vielzahl verschiedener Szenen kann darüber hinaus auch verwendet werden, um die Vorsortierung der Werkstücklagen über Vorzugslagen zu optimieren. In diesem Zusammenhang wären auch selbstlernende Konfigurationsalgorithmen zu berücksichtigen, obgleich deren Akzeptanz durch Endanwender unklar ist, sofern diese im laufenden Betrieb zum Einsatz kommen und somit das zukünftige Anlagenverhalten unvorhersehbar machen können.

Das vorgestellte Verfahren zur Objektlageerkennung ist konzeptionell zunächst auf starre Körper ausgelegt. Die Erkennung biegeschlaffer Objekte stellt ein vergleichsweise unerschlossenes Forschungsfeld dar, zumindest im Rahmen von industriell realisierten Prozessen. Zukünftige Forschungen könnten untersuchen, inwieweit sich Konzepte dieses Verfahrens auf nicht-formstabile Gebilde übertragen lassen.

Literaturverzeichnis

[Aanaes2012] Aanaes, Henrik; Dahl, Anders Lindbjerg; Pedersen, Kim Steenstrup: Interesting interest points: A comparative study of interest point performance on a unique data set. In: International Journal of Computer Vision 97 (2012), Nr. 1, S. 18-35

[Ahn2004] Ahn, Sung Joon: Least Squares Orthogonal Distance Fitting of Curves and Surfaces in Space, Band 3151 von Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2004

[Alt2002] Alt, Hans Wilhelm: Lineare Funktionalanalysis, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002

[Anil2000] Jain, Anil; Dorai, Chitra: 3D object recognition: Representation and matching. In: Statistics and Computing 10 (2000), Nr. 2, S. 167-182

[Arnold2003] Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst: Handbuch Logistik, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003

[Attneave1954] Attneave, Fred: Some informational aspects of visual perception. In: Psychology Review 61 (1954), Nr. 3, S. 183-193

[Ballard1981] Ballard, Dana H.: Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. In: Pattern Recognition 13 (1981), Nr. 2, S. 111-122

[Balslev2002] Balslev, Ivar; Eriksen, Ren D.: From belt picking to bin packing. In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 4902 (2002), Nr. 1, S. 616-624

[Bauer2007] Bauer, Norbert: Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung: Qualitätssicherung in der Praxis, 1. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007

[Baxanski2011] Baxanski, Igor: Aufbau, Analyse und Optimierung von automatisierten Entnahmesystemen für kleine Rohbauteile aus Schüttgut mit Klein- und Leichtbaurobotern. Stuttgart, Univ., Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Diplomarbeit, 2011

[Bay2008] Bay, Herbert; Tuytelaars, Tinne; Van Gool, Luc: SURF: Speeded Up Robust Features.
In: Computer Vision and Image Understanding 110 (2008), Nr. 3, S. 346-359

[Becker2001] Becker, Peter: Einführung in die Wissensverarbeitung und Data Mining. Vorlesung Wintersemester 01/02, Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg, Fachbereich Angewandte Informatik, 2001

[Bennamoun2002] Bennamoun, Mohammed; Mamic, George L: Object recognition: fundamentals and case studies. London: Springer, 2002

[Besl1992] Besl, Paul J.; McKay, Neil D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (1992), Nr. 2, S. 239-256

[Bicego2005] Bicego, Manuele; Castellani, Umberto; Murino, Vittorio: A hidden Markov model approach for appearance-based 3D object recognition.
In: Pattern Recognition Letters 26 (2005), Nr. 16, S. 2588–2599

[Böhnke2010] Böhnke, Kay; Gottscheber, Achim: Fast Object Registration and Robotic Bin Picking.
In: Research and Education in Robotics - EUROBOT 2009. Communications in Computer and Information Science 82 (2010), S. 23-37

[Castellani2008] Castellani, Umberto; Cristani, Marco; Fantoni, Simone; Murino, Vittorio: Sparse points matching by combining 3D mesh saliency with statistical descriptors.
In: Computer Graphics Forum 27 (2008), Nr. 2, S. 643-652

[Craig1989] Craig, John J.: Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 1989

[Czichos2006] Czichos, Horst: Mechatronik - Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2006, S. 141

[Dal2012] Dal Mutto, Carlo; Zanuttigh, Pietro; Cortelazzo, Guido M.: Time-of-Flight Cameras and Microsoft Kinect. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, 2012

[Dilling1975] Dilling, Hans-Joachim; Rauschenbach, Thomas: Rationalisierung und Automatisierung der Montage, Teil 1 und 2. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975

[Dobrowolski2006] Dobrowolski, Manfred: Angewandte Funktionalanalysis. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006

[Donoser2006] Donoser, Michael; Bischof, Horst: 3D Segmentation by Maximally Stable Volumes (MSVs).
In: International Conference on Pattern Recognition – ICPR, Vol. 1, 20. - 24. August 2006, Hong Kong. IEEE, S. 63-66

[Ebert2012] Ebert, Andreas: Die Intralogistik - eine wettbewerbsfähige Branche.
In: MM Maschinenmarkt (2012), Nr. 46, S. 18-19

[Ettelt2001] Ettelt, Eugen M.: Ansichtenbasierte Objekterkennung mit Hilfe optimierter Musterbäume. München, Technische Universität München, Diss., 2001

[Farber2011] Farber, Rob: CUDA Application Design and Development. Amsterdam et al.: Morgan Kaufmann, 2011

[Fischer2012] Fischer, Jan; Arbeiter, Georg; Bormann, Richard; Verl, Alexander: A framework for object training and 6 DoF pose estimation.
In: ROBOTIK 2012 - 7th German Conference on Robotics: Proceedings, 21. und 22. Mai 2012, München. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2012, S. 513-518

[Flitton2010] Flitton, Gregory; Breckon, Toby; Bouallagu, Najla Megherbi: Object recognition using 3D SIFT in complex CT volumes.
In: British Machine Vision Conference, 31. August - 3. September 2010, Aberystwyth, S. 1-12

[Forsyth2002] Forsyth, David A.; Ponce, Jean: Computer Vision - A Modern Approach. 1. Aufl. New York: Prentice Hall, 2002

[Frome2012] Frome, Andrea; Huber, Daniel; Kolluri, Ravi; Bülow, Thomas; Malik, Jitendra: Recognizing Objects in Range Data Using Regional Point Descriptors.
In: European Conference On Computer Vision, 11. - 14. Mai, Prag. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004, S. 224-237

[Fuchs2008] Fuchs, Sven: Adaption der Bewertung von Zustandshypothesen bei der Objekterkennung: Ansätze für Bewertungsfunktionen und deren Auswirkungen auf die Klassifikationsleistung.
Saarbrücken: Vdm Verlag Dr. Müller, 2008

[Gavrilla1994] Gavrila, Dariu M.; Davis, Is: Fast Correlation Matching in Large (Edge) Image Databases.
In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2368 (1994), Nr. 13, S. 104-116

[Ge2008] Ge, Feng; Liu, Tiecheng; Wang, Song; Stahl, Joachim: Template-Based Object Detection through Partial Shape Matching and Boundary Verification.
In: International Journal of Signal Processing 4 (2008), Nr. 1, S. 148-157

[Glomb2009] Glomb, Przemyslaw: Detection of interest points on 3D data: Extending the harris operator.
In: Computer Recognition Systems 3 - Advances in Soft Computing (2009), Nr. 57, S. 103-111

[Harris1998] Harris, Chris; Stephens, Mike: A combined corner and edge detector.
In: Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, 31. August - 2. September 1988, Manchester. University of Sheffield, 1989, S. 147-151

[Hart2009] Hart, Peter: How the Hough transform was invented.
In: IEEE Signal Processing Magazine 26 (2009), Nr. 6, S. 18-22

[Herbertz2005] Herbertz, Rainer; Hermann, Harald; Ledermann, Thomas; Baudler, Manfred; Betten, Dirk; Brüninghaus, Gerhard; Schauerte, Ingo: Entwicklung und Erprobung eines modularen Handhabungskonzeptes für die umformende Fertigung von Schüttgütern.
In: Schmiede-Journal (2005), S. 28-29

[Hesse2006] Hesse, Stefan: Automatische Montagemaschinen.
In: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006, S. 219-308

[Hesse2006a] Hesse, Stefan: Montagegerechte Produktgestaltung.
In: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006, S. 11-58

[Hesse2011] Hesse, Stefan: Greifertechnik - Effektoren für Roboter und Automaten.
München: Hanser, 2011

[Hetzel2001] Hetzel, Günther; Leibe, Bastian; Levi, Paul; Schiele, Bernt: 3D Object Recognition from Range Images using Local Feature Histograms.
In: Computer Vision and Pattern Recognition 2 (2001), S. 394-399

[Hillenbrand2002] Hillenbrand, Ullrich; Hirzinger, Gerd: Probabilistic Search for Object Segmentation and Recognition.
In: Proceedings European Conference on Computer Vision, 27. Mai - 2. Juni 2002, Kopenhagen. Berlin et al..: Springer, 2002, S. 791-806

[Hirschvogel2006] Hirschvogel, Manfred; Kettner, Peter; Linder, Gerhard; Dahme, Michael; Landgrebe, Dirk; Raedt, Hans-Willi: Kaltmassivumformung: Präzision in großen Serien. 1. Aufl. Hagen: Infostelle Industrieverband Massivumformung e.V., 2006

[Hofmann2011] AMC-Hofmann: Market Report Bin Picking. Heppenheim, 2011 - Firmenschrift

[Holst2004] Holst, Mathias: Geometriebeschreibung mit punktbasierten Modellen, Ersetzungsstrategien und Rendering. Rostock, Univ., Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Diplomarbeit, 2004

[Huynh2009] Huynh, Du: Metrics for 3D Rotations: Comparison and Analysis. In: Journal of Mathematical Imaging and Vision 35 (2009), Nr. 2, S. 155-164

[Ikeuchi1983] Ikeuchi, Katsushi; Horn, Berthold K. P.; Nagata, Shigemi: Callahan, Tom; Feingold, Oded: Picking up an object from a pile of objects. In: Proceedings of the First International Symposium on Robotics Research, 25. August - 2. September 1983, New Hampshire. Cambridge, MIT Press, 1983, S. 139-166

[Jähne2005] Jähne, Bernd: Digitale Bildverarbeitung. 6. überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005

[Jiang1997] Jiang Xiaoyi, Bunke Horst: Dreidimensionales Computersehen. Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern. Bern: Springer, 1997

[Jodin2012] Jodin, Dirk; Trummer, Wolfgang: Zeitaufwand reduzieren – Wissensbasierte Methoden zur Planung von intralogistischen Anlagen und Systemen. In: Fördern und Heben – Projektguide Intralogistik (2012), S. 10-13

[Jurie1999] Jurie, Frederic: Robust Hypothesis Verification: Application to Model-Based Object. In: Pattern Recognition 32 (1999), Nr. 6, S. 1069-1081

[Kaiser2009] Kaiser, Benedikt: Bildverarbeitung für ein generisches Entladesystem. Karlsruhe, Univ., Diss., 2009

[Katanforoush2003] Katanforoush, Ali; Shahshahani, Mehrdad: Distributing Points on the Sphere, I. In: Experimental Mathematics 12 (2003), Nr. 2, S. 199-209

[Katsoulas2004] Katsoulas, Dimitrios: Robust Recovery of Piled Box-Like Objects in Range Images. Freiburg, Univ., Diss., 2004

[Klempert2012] Klempert, Oliver: Neue Technologien vereinfachen die Roboterbedienung.
In: VDI Nachrichten (2012), Nr. 20, S. 11.

[Knopp2010] Knopp, Jan; Prasad, Mukta; Willems, Geert; Timofte, Radu; Van Gool, Luc: Hough Transform and 3D SURF for Robust Three Dimensional Classification.
In: Computer Vision – ECCV 2010. Lecture Notes in Computer Science (2010), Nr. 6316, S. 589-602

[Köber2012] Köber, Jonathan: Zug um Zug zur schlanken Produktion.
In: Logistik für Unternehmen 26 (2012), Nr. 4/5, S. 32-34

[Kuffner2004] Kuffner, James: Effective Sampling and Distance Metrics for 3D Rigid Body Path Planning.
In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 26. April - 1. Mai 2004, New Orleans. IEEE, 2004, S. 3993-3998

[Ledermann2011] Ledermann, Thomas: Partikel-Schwarm-Optimierung zur Objektlageerkennung in Tiefendaten. Stuttgart: Jost-Jetter, 2011 (IPA-IAO Forschung und Praxis; 506) Stuttgart, Univ., Diss., 2011

[Leibe2001] Leibe, Bastian: Segmentierungsfreie Objekterkennung unter Verwendung von Tiefenbildern. Stuttgart, Univ., Institut für Parallele und Verteilte Höchstleistungsrechner, Diplomarbeit, 2001

[Lenarcic2008] Lenarcic, Jadran; Wenger, Philippe: Advances in Robot Kinematics: Analysis and Design. Dordrecht: Springer, 2008

[Leonard2007] Leonard, Simon; Chan, Ambrose; Croft Elizabeth; Little, James J.: Robust Motion Generation for Vision-Guided Robot Bin-Picking.
In: ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 11. - 15. November 2007, Seattle, S. 1-8

[Liebherr2012] Liebherr-Verzahntechnik GmbH: Messe-Produktblatt. Kempten, 2012 - Firmenschrift

[Lindberg1994] Lindberg, Tony: Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales.
In: Journal of Applied Statistics 21 (1994), Nr. 2, S. 224-270

[Lowe2004] Lowe, David: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints.
In: International Journal of Computer Vision 60 (2004), Nr. 2, S. 91-110

[Marr1980] Marr, David; Hildreth, Ellen Catherine: Theory of Edge Detection.
In: Proceedings of the Royal Society of London (1980), Nr. 1167, S. 187-217

[Masuda1996] Masuda, Takeshi; Sakaue, Katsuhiko; Yokoya, Naokazu: Registration and Integration of Multiple Rande Images for 3-D Model Construction. In: ICPR '96 Proceedings of the 1996 International Conference on Pattern Recognition, 29. August 1996, Wien. Washington DC: IEEE Computer Society, 1996, S. 879

[Matas2002] Matas, Jiri; Chum, Ondrej; Urban, Martin; Pajdla, Tomas: Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions. In: Proc. of British Machine Vision Conference, 2. - 5. September 2002, Cardiff, S. 384-396

[Moeslund2007] Moeslund, Thomas B.; Kirkegaard, Jakob: Pose estimation using structured light and harmonic shape contexts. In: Advances in Computer Graphics and Computer Vision, Communications in Computer and Information Science 4 (2007), S. 281-292

[Moravec1977] Moravec, Hans: Towards Automatic Visual Obstacle Avoidance. In: Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 22. - 25. August 1977, Cambridge, S. 584

[Müller2001] Müller, Markus: Entnahmestrategien zur Objektvereinzelung mittels Industrierobotern. Karlsruhe, Univ., Diss., 2001

[Naylor2002] Naylor, Michael: Golden, √2, and Π flowers: A spiral story. In: Mathematics Magazine 75 (2002), Nr. 3, S. 163-172

[Oh2009] Oh, Jong-Kyu; Baek, KyeongKeun; Kim, Daesik; Lee, Sukhan: Development of structured light based bin picking system using primitive models. In: IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, 17-20 November 2009, Seoul. IEEE, 2009, S. 46-52

[Olson1997] Olson, Clark F.: Efficient Pose Clustering Using a Randomized Algorithm. In: International Journal of Computer Vision 23 (1997), Nr. 2, S. 131-147

[Opelt2004] Opelt, Andreas; Fussenegger, Michael; Pinz, Axel; Auer, Peter: Weak Hypotheses and Boosting for Generic Object Detection and Recognition. In: Computer Vision - ECCV 2004, 8th European Conference on Computer Vision, 11. - 14. Mai 2004, Prag. Berlin, Heidelberg: Spinger, 2004, S. 71-84

[Ottmann2012] Ottmann, Thomas; Widmayer, Peter: Algorithmen und Datenstrukturen. 5. Aufl. Heidelberg: Springer, 2012

[Palzkill2008] Palzkill, Matthias: Entwicklung und Implementierung einer Objektlageerkennung in Tiefendaten. Berlin, Univ., Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Diplomarbeit, 2008

[Pott2007] Pott, Andreas: Analyse und Synthese von Werkzeugmaschinen mit paralleler Kinematik. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2007.
Düsseldorf, Univ., Diss., 2007

[Rahardja1996] Rahardja, Krisnawan; Kosaka, Akio: Vision-based bin-picking: Recognition and localization of multiple complex objects using simple visual curves.
In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 4. - 8. November 1996, Osaka, S. 1448-1457

[Rodgers2006] Rodgers, Jim; Anguelov, Dragomir; Pang, Hoi-Cheung; Koller, Daphne: Object Pose Detection in Range Scan Data.
In: CVPR '06 Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 17. - 22. Juni 2006, New York. New York: IEEE, 2006, S. 2445-2452

[Rost2009] Rost, Randi J. et al.: OpenGL Shading Language. Amsterdam: Addison-Wesley Longman, 2009

[Rothlauf2011] Rothlauf, Franz: Design of Modern Heuristics - Principles and Application. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011

[Sachs1992] Sachs, Lothar: Angewandte Statistik, Anwendung statistischer Methoden. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1992

[Safronov2009] Safronov, Kirill: Auswertung von 2D und 3D unstrukturierten Daten für die Objekt- und Lageerkennung. Karlsruhe, Universität Fridericiana, Diss., 2009

[Schroeder2006] Schroeder, Will; Martin, Ken; Lorensen, Bill: Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics. 4. Aufl. New York: Prentice Hall, 2006

[Schröder2008] Schröder, Christoph: Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich.
In: IW-Trends - Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung aus dem Institut der deutschen Wirtschaft 35 (2008), Nr. 3, S. 75-90

[Siciliano2009] Siciliano, Bruno; Sciavicco, Lorenzo, Villani, Luigi; Oriolo, Giuseppe: Robotics: Modelling, Planning and Control.
London: Springer, 2009

[Sick2013] Betriebsanleitung - Lasermesssensor LSM400: Online im Internet: https://www.mysick.com/saqqara/IM0010697.pdf (28.06.2013)

[Siggelkow2002] Siggelkow, Sven: Feature Histograms for Content-Based Image Retrieval. Freiburg, Univ., Diss., 2002

[Skotheim2010] Skotheim, Oystein; Thielemann, Jens T.; Berge, Asbjorn; Sommerfelt Arne: Robust 3D object localization and pose estimation for random bin picking with the 3DMaMa algorithm.
In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7526 (2010), Nr. 1, DOI 10.1117/12.838796

[Spenrath2012] Spenrath, Felix; Spiller, Alexander; Verl, Alexander: Gripping Point Determination and Collision Prevention in a Bin-Picking application.
In: Proceedings for the conference of ROBOTIK 2012, 7th German Conference on Robotics, 21. - 22. Mai 2012, München.
Berlin: VDE, 2012 S. 205-210

[Spur1986] Spur, Günther; Stöferle, Theodor: Handbuch der Fertigungstechnik.
München, Wien: Hanser, 1986

[Stockmann1987] Stockmann, George: Object recognition and localization via pose clustering.
In: Computer Vision, Graphics, and Image Processing 40 (1987), Nr. 3, S. 361-387

[Stotz2011] Stotz, Martin: Adaptive Segmentierung von Tiefenbildern für die 3-D-Objektlageerkennung auf Basis von kombinierten regelgeometrischen Elementen. Stuttgart: Jost-Jetter, 2011 (IPA-IAO Forschung und Praxis; 506) Stuttgart, Univ., Diss., 2011

[Stroh2007] Stroh, Carsten: Realitätsnahe Planetengenerierung. Frankfurt am Main, Univ., Institut für Informatik, Diplomarbeit, 2007

[Strzodka2003] Strzodka Robert, Ihrke Ivo: A graphics hardware implementation of the Generalized Hough Transform for fast object recognition, scale, and 3D pose detection.
In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Analysis and Processing, 17. - 19. September 2003, Mantova, S. 188–193

[Szeliski2012] Szeliski, Richard: Computer Vision: Algorithms and Applications. New York: Springer, 2012

[Tonko1997] Tonko, Martin: Zur sichtsystemgestützten Demontage am Beispiel von Altfahrzeugen, Karlsruhe, Univ., Diss., 1997

[UR2013] Universal Robots - The URScript Programming Language. Online im Internet: http://www.wmv-robotics.de/home_htm_files/scriptmanual_en_1.5.pdf (08.08.2013)

[VDI1990] VDI-Richtlinie 2860 1990-05: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole

[Veltkamp2001] Veltkamp, Remco C.: Shape matching: Similarity measures and algorithms.
In: SMI '01 Proceedings of the International Conference on Shape Modeling & Applications, 7. - 11. Mai 2001, Genua. IEEE, 2001, S. 188-197

[Verl2009] Verl, Alexander; Stotz, Martin; Kühnle, Jens: Neues System zur automatisierten Handhabung ungeordneter Werkstücke: Lösung des Griffs in die Kiste.
In: Schweizer Logistik-Katalog 2009: Das Jahrbuch für Materialfluss und Logistik (2009), S. 122-124

[Viksten2008] Viksten, Frederik; Nordberg, Klas; Kalms, Mikael: Point-of-Interest Detection for Range Data.
In: Proceedings of the 19th International Conference on Pattern Recognition, 8. - 11. Dezember 2008, Tampa. IEEE, 2008, S. 1-4

[Vincze2008] Vincze, Markus; Olufs, Sven; Einramhof, Peter; Wildenauer, Horst: Roboternavigation in Büros und Wohnungen: Stereokamerasysteme.
In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik 125 (2008), Nr. 1-2, S. 25-32

[Warnecke1986] Warnecke, Hans-Jürgen; Lay, Norbert; Volz, Hartwig.: Teilebereitstellung in hochflexiblen Montagesystemen: Teilprojekt B8.
In: Deutsche Forschungsgemeinschaft / Sonderforschungsbereich 158 "Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb": Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb: Ergebnisbericht (1984-1986): Ergebnisbericht für den Forschungszeitraum 1984-1986. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF, 1986, S. 233-261

[Weik1997] Weik, Sebastian: Registration of 3-D Partial Surface Models Using Luminance and Depth Information.
In: International Conference on Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modeling, 12. - 15. Mai 1997, Ottawa, S. 93-100

[Wenz2008] Wenz, Michael: Automatische Konfiguration der Bewegungssteuerung von Industrierobotern. Berlin: Logos, 2008

[Westkämper2009] Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin: Springer, 2009

[Westkämper2010] Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen: Einführung in die Fertigungstechnik. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010

[Wolfson1997] Wolfson, Haim J.; Rigoutsos, Isidore: Geometric Hashing: An Overview. In: IEEE Computational Science and Engineering 4 (1997), Nr. 4, S. 10-21

[Wolter1985] Wolter, Jan D.; Volz, Richard A.; Woo, Anthony C.: Automatic Generation of Gripping Positions for Assembly. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 15 (1985), Nr. 2, S. 204-213

[Wöhler2009] Wöhler, Christian: 3D Computer Vision. Efficient Methods and Applications. New York: Springer, 2009

[Yang2006] Yang, Bo; Hurson, Ali R.: Multimedia Semantics Integration Using Linguistic Model. In: Advances in Knowledge Discover and Data Mining. 10th Pacific-Asia conference, 9. - 12. April, Singapore. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, S. 679-688

[Yu2011] Yu, Tsz-Ho; Woodford, Oliver; Cipolla, Roberto: An Evaluation of Volumetric Interest Points. In: International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, 16. - 19. Mai 2011, Hangzhou. IEEE, S. 282-289

[Zeitler2007] Zeitler, Jürgen; Simon, Günther: Physik für Techniker und technische Berufe. München: Fachbuchverlag Leipzig, 2007

Diese Arbeit stellt ein Verfahren zur Lagebestimmung von in Ladungsträgern chaotisch bereitgestellten Werkstücken vor. Die industrielle Erprobung erfolgt am Beispiel von automatisierten Zuführsystemen.

ISBN 978-3-8396-0784-8

FRAUNHOFER VERLAG