

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Markus Schäfer

**Kollisionsvermeidung für Endeffektoren
mit integriertem LiDAR-System in der MRK**
Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 280



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 280

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

Markus Schäfer, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 01.03.2024
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

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.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9510-4

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand im Wesentlichen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Mein außerordentlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung dieser Arbeit sowie die vielfältigen Möglichkeiten eigene Ideen umzusetzen und das Institutsleben gestalten zu können. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter für die Übernahme des Korreferats sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Jörg Bauer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Zudem möchte ich mich herzlich bei allen Freunden und Kollegen am wbk, den Instituten des KIT, der Fraunhofer-Gesellschaft und der Stanford University für die sehr gute Zusammenarbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt hierbei Franz Jost, David Barton, Paul Ruhland, Daniel Kupzik, Anne-Sophie Rossol, Sven Roth und Marco Friedmann für die gemeinsamen Erlebnisse während der Arbeit und auch darüber hinaus.

Ebenso zum Dank verpflichtet bin ich den studentischen Mitarbeitern, die wesentlich zum Erfolg meiner Dissertation beigetragen haben. Hervorzuheben ist hier das unermüdliche Engagement von Marcel Büsching, Philipp Nicklas, Joshua Locher, Jonas Janzen, Richard Grzempa und Christoph Hellman.

Für die fachlichen und persönlichen Entwicklungsmöglichkeiten danke ich insbesondere Martin May und Ralf Becker sowie der Hans Weisser Stiftung für die Förderung meines Forschungsaufenthalts.

Für ihre bedingungslose Unterstützung vom Studium bis zur Promotion danke ich meinen Eltern. Euer Vertrauen hat mir diese Arbeit erst ermöglicht. Mein größter Dank geht meiner Freundin Rica. Deine Liebe und deine Geduld haben mir in den letzten Jahren Kraft gegeben und entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Berlin, im März 2024

Markus Schäfer

Abstract

The physical collaboration between humans and robots is one approach to combine the flexibility of manual labor on the one hand, and the time and cost efficiency of an automated system on the other. The major risks of this are injuries due to collisions, which must be avoided. During such human-robot collaboration (HRC), the closest point of contact of the robotic system is often the end effector. In addition, the end effector is the fastest part of the moving system and thus a source of great risk for injuries.

Since the most commonly used end effectors are grippers, this thesis addresses collision avoidance for HRC grippers. First various sensor principles are tested and evaluated with the goal of maximizing the detection range of obstacles in the vicinity of the gripper. Furthermore, the prototype of a LiDAR-system is being developed and integrated into a gripper.

A new problem arises from the large detection range: The gripper must inevitably come very close to its environment during a handling process, but cannot distinguish whether a detection is a human, where it would have to stop, or the normal environment, where the process should continue. In this work, a probabilistic approach to risk assessment is presented for this purpose. Based on an occupancy map, the gripper can evaluate how likely every current measurement matches the safe reference or not. Thus it decides whether a situation needs a safety reaction or not.

Depending on the risk assessment, the gripper can take full control of the robot and either switch to a distance-dependent speed monitoring or calculate an alternative robot path to perform an obstacle avoidance movement.

The developed methods and systems are validated on anthropomorphic test objects in various test setups with a Kuka KR180 industrial robot and a prototype gripper with the integrated LiDAR sensor technology.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Struktur und Vorgehen in der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Technik	6
2.1 Mensch-Roboter-Kollaboration	6
2.1.1 Grundbegriffe, Definitionen und Eingrenzungen	7
2.1.2 Klassifizierungen und Betriebsarten der MRK	9
2.2 Bewegungsplanung und -steuerung zur Kollisionsvermeidung	10
2.2.1 Varianten der Pfadplanung	11
2.2.2 Klassische Potenzialfeldmethode (PFM)	14
2.2.3 Varianten der Potenzialfeldmethode	16
2.3 Kollisionsvermeidung mit Greifern in der MRK	16
2.3.1 Gliederung nach Sensorprinzipien	17
2.3.2 Kapazitive Sensorsysteme	18
2.3.3 RADAR-Systeme	21
2.3.4 LiDAR-Systeme	23
2.3.5 Ultraschall-Systeme (SODAR)	26
2.3.6 Sonstige Verfahren zur Umgebungserfassung	28
2.4 Zusammenfassung und Forschungsdefizit	29
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	32
3.1 Zielsetzung	32
3.1.1 Risikofall A: Zusammenstoß	33
3.1.2 Risikofall B: Quetschung	34
3.1.3 Resultierende Fragestellungen	36
3.2 Vorgehensweise nach V-Modell	36
3.2.1 Vorgehensweise - Wahrnehmen der Umgebung	37

3.2.2	Vorgehensweise - Gefahrenabschätzung	38
3.2.3	Vorgehensweise - Kollisionsvermeidung	38
3.3	Systemspezifikation	39
3.3.1	Systemgrenze und allgemeiner Systemaufbau	39
3.3.2	Funktionale Systemaufteilung	41
4	Erfassen der Umgebung	43
4.1	Problemeingrenzung	43
4.2	Auswahl eines geeigneten Sensorprinzips	45
4.2.1	Kapazitive Umgebungserfassung	46
4.2.2	RADAR-basierte Umgebungserfassung	47
4.2.3	LiDAR: Laserscanner	49
4.2.4	LiDAR: IR Time-of-Flight-Sensoren	50
4.2.5	Bewertung und Auswahl Sensorprinzip	52
4.3	Charakterisierung des Sensorprinzips	53
4.3.1	Sensorspezifische Einflussanalyse nach Ishikawa	53
4.3.2	Validierung des Sensorprinzips	56
4.4	Eigener Ansatz zur Umgebungserfassung	63
4.4.1	Mitbewegter Sicherheitsraum	63
4.4.2	Sensoranordnung im Greifer	64
4.4.3	Konstruktiver Aufbau des funktionalen Prototypen	67
4.4.4	Systemarchitektur des funktionalen Prototypen	68
4.5	Zusammenfassung	69
5	Methode zur Gefahrenbeurteilung	71
5.1	Problemeingrenzung	71
5.2	Eigener Ansatz zur Veränderungserkennung	75
5.3	Modell und Berechnung der Referenzkarte	77
5.3.1	Modellierung des Arbeitsraums	77
5.3.2	Datenerfassung für die Referenzkarte	78
5.3.3	Berechnungsmethode für die Referenzkarte	79

5.3.4	ToF-Sensormodell	81
5.3.5	Aggregation zur Karte	87
5.4	Gefahrenabschätzung	88
5.4.1	Probabilistische Modellierung der Veränderung	88
5.4.2	Aggregation der Karteninformationen	89
5.4.3	Vergleich der Belegungswahrscheinlichkeiten	91
5.5	Umsetzungsvarianten des Verfahrens	91
5.5.1	Online-Berechnungsverfahren	92
5.5.2	Schwellwert-Karte	94
5.6	Zusammenfassung	96
6	Kollisionsvermeidung für intelligente Greifer	98
6.1	Problemeingrenzung	98
6.1.1	Annahmen und Randbedingungen	98
6.1.2	Anforderungen aus den Risikofällen	99
6.2	Eigener Ansatz zur Kollisionsvermeidung	100
6.3	Abstandsüberwachung	102
6.3.1	Modellierung des Menschen	103
6.3.2	Bremsweg des Roboters	104
6.3.3	Kritischer Mindestsicherheitsabstand	105
6.4	Geschwindigkeitsregelung	108
6.4.1	Geschwindigkeit-Abstands-Profile	109
6.5	Online Hindernisumfahrung	112
6.5.1	Vorgehen der Hindernisumfahrung	112
6.5.2	Adaption der klassischen Potenzialfeldmethode	114
6.5.3	Adaptierte generalisierte Potenzialfeldmethode	118
6.5.4	Zielerreichung nach Hindernisumfahrung	119
6.6	Systemarchitektur	120
6.7	Zusammenfassung	122

7	Validierung des Gesamtsystems	124
7.1	Software-in-the-Loop-Validierung	125
7.1.1	Simulationsumgebung	125
7.1.2	Simulationsmodell	125
7.2	Validierung Modul Gefahrenabschätzung	127
7.2.1	Gefahrenabschätzung – Szenario 1	127
7.2.2	Gefahrenabschätzung - Szenario 2	132
7.3	Validierung Modul Kollisionsvermeidung	134
7.3.1	Hindernisumfahrung – Szenario 1	135
7.3.2	Hindernisumfahrung – Szenario 2	137
7.4	Validierung Gesamtsystem	139
7.4.1	Risikofall A: Stoßen	139
7.4.2	Risikofall B: Quetschung	150
7.5	Bewertung der Ergebnisse	153
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Ausblick	158
9	Liste eigener Publikationen	160
10	Literaturverzeichnis	I
	Abbildungsverzeichnis	IX
	Tabellenverzeichnis	XIV

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer Aided Design
DoE	Design of Experiments
FoV	Field of View / Blickfeld
FP	false positive
GPFM	Generalisierte Potenzialfeldmethode
HRC	Human Robot Collaboration
I²C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
IR	Infrarot
KRC	Kuka Robot Controller
LED	Light Emitting Diode
LiDAR	Light-Detection-and-Ranging
LUT	Lookup-Tabelle
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
NT	Nearest-Target
OFAT	One Factor at a Time
PFM	Potenzialfeldmethode
PTP	Point-to-Point / Punkt-zu-Punkt
RADAR	Radio-Detection-and-Ranging
RAM	Random Access Memory
RGB	Rot-Grün-Blau-Farbraum
SoC	System-on-Chip
SODAR	Sonic-Detection-and-Ranging
SPAD	Single Photon Avalanche Diode

STO	Safe-Torque-Off
TB	Timing Budget / Zeitbudget
TCP	Tool-Center-Point
ToF	Time-of-Flight / Laufzeit
TP	true positive
UDP	User Datagram Protocol
UNIX	Betriebssystem für Computer
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser
V-REP	Virtual Robot Experimentation Platform

Formelzeichen	Größe	Einheit
Δ	Unschärfe	m
a_H	Verzögerungsrate des Menschen	m/s ²
B	Bounding-Box-Matrix	
b_{max}	Oberer Stützvektor der Bounding-Box	
b_{min}	Unterer Stützvektor der Bounding-Box	
C	Eindringabstand	mm
Δd	Aggregationsbreite der Blickfeld-Diskretisierung	mm
d_i	Scheibensegment des Sensor-Blickfeld	mm
d_{max}	Detektionsreichweite	mm
d_{min}	notwendige Detektionsreichweite für eine rechtzeitige Bremsung vor Kollision	mm
d_{NT}	Kleinster Abstand eines Objekts zum Sensor	mm
d_{real}	Realer Abstand zum Hindernis	mm
d_{rest}	Restabstand im stehenden Inertialsystem	mm
d_Z	Abstand, ab dem eine Potenzialfunktion wirkt	mm
E_{att}	Potenzialfeld mit anziehender Wirkung	J
E_{rep}	Potenzialfeld mit abstoßender Wirkung	J

E_{ges}	Summe aller Potenzialfelder im Arbeitsraum	J
f	Messfrequenz	1/s
F_A	Abgeleitete Kraft zum Potenzialfeld A	N
$F_{R,ij}$	Abstoßende virtuelle Kraft des Sensors S_{ij}	N
F_{R0}	Oberer Grenzwert abstoßender Kräfte	N
F_{res}	Resultierender Kraftvektor	N
\hat{G}_A	Verstärkungskoeffizient im anziehenden Potenzialfeld	
G_R	Verstärkungskoeffizient im abstoßenden Potenzialfeld	
$I_V(\boldsymbol{\eta}_k)$	Funktion der inversen Kinematik	
k	Interpolationstakt	
\mathbf{K}_{TCP}	Koordinatensystem des Tool-Center-Points	
\mathbf{K}_{Welt}	Koordinatensystem des Robotersystems	
$I(x)$	Logit-Transformation der Wahrscheinlichkeitsdichte von x	
$L(X)$	Logit-Transformation der Wahrscheinlichkeit von X	
l_m	Kantenlänge eines Voxels m	mm
\mathbf{M}	Kartenmatrix im Weltkoordinatensystem	
m_n	Voxel n der Karte M	
\mathbf{n}_{next}	normalisierter Differenzvektor zum nächsten Endpunkt	
o_n	Belegungszustand des Voxel m_n	
O_V	Feed-Override des Roboters	
$O_{v,Soll}$	Soll-Feed-Override des Roboters	
$P(m_n)$	Belegungswahrscheinlichkeit des Voxels m_n	
$P(o_n q_{1:k})$	a-posteriori-Wahrscheinlichkeit	
$P(o_n q_{k-1})$	a-priori-Wahrscheinlichkeit	
$P(X)$	Wahrscheinlichkeit für das Ereignis X	
$p(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsvariable x	
$P(X Y)$	Bedingte Wahrscheinlichkeit für X bei Y	
P_{corr}	korrigierte Belegungswahrscheinlichkeit	
$P_{oc}(m_n)$	Belegungswahrscheinlichkeit des Voxel n	

Q	Messdatum	
q_{ij}	Messwert des Sensors s_{ij}	mm
Q_k	Messdatenvektor zum Takt k	
q_k	Messwert aus Einzelmessung zum Takt k	mm
\hat{q}_{ij}	Vektor mit Messwerten q_{ij} ohne Selbstdetektion	
q_{min}	kleinster Messwert je Messzyklus	mm
R	Reflexionsgrad	
S_H	Anhalteweg des Menschen	m
S_{ij}	Sensor i von Modul j	
s_{ij}	Orientierungsvektor von Sensor i von Modul j	
SiL	Software in the Loop	
S_{min}	Sicherer Mindestabstand	mm
S_R	Anhalteweg des Roboters	m
S_{SEN}	Sensitivität	
S_{SPZ}	Spezifität	
$T_{Torso,W}$	Testobjekt Torso mit weißer Oberfläche	
$T_{Torso,S}$	Testobjekt Torso mit schwarzer Oberfläche	
T_{Finger}	Testobjekt Finger	
$T_{Hand,W}$	Testobjekt Hand mit weißer Oberfläche	
$T_{Hand,S}$	Testobjekt Hand mit schwarzer Oberfläche	
t_{Puls}	Pulsdauer	ns
T_R	Anhaltedauer des Roboters	s
U	Umgebung	
U_M	Umgebung zum Zeitpunkt der Kartenerstellung	
U_q	aktuelle Umgebung	
U_q	Umgebung zum Zeitpunkt der Messung q	
v_H	Gehgeschwindigkeit des Menschen	m/s
v_{MRK}	Sichere MRK-Geschwindigkeit nach ISO 15066	mm/s
v_R	Geschwindigkeit des TCP als Skalar	m/s

$v_{R,Soll}$	Soll-Geschwindigkeit des TCP als Skalar	m/s
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit zwischen Greifer und Hindernis	m/s
W	Werkstückkorrekturmatrix	mm
$\dot{x}_{TCP,SOLL}$	kartesische Soll-Geschwindigkeit des TCP	m/s
\dot{x}_{TCP}	kartesische Momentan-Geschwindigkeit des TCP	m/s
x_{TCP}	aktueller Positionsvektor des TCP	m
x_{next}	nächster Positionsvektor einer PTP-Trajektorie	m
Z_D	Positionsunsicherheit des Menschen	mm
Z_R	Positionsunsicherheit des Roboters	mm
α	Winkelparameter ab der Mittelachse des Blickfelds	°
α_{FOV}	Öffnungswinkel des Sensor-Blickfelds	°
γ	relative Orientierung der Sensornormale zur Trajektorie	°
$\Delta\gamma$	Winkeldiskretisierung des Sensorkegels	°
δ_{SSR}	Signalamplitude (SSR = Signal Return Rate)	
η_k	Soll-Ausweichrichtung (normiert)	
Φ	Menge der Eigenschaften der Umgebung	
θ	Gelenkwinkel des Robotergelenks i	°
θ'	Winkelgeschwindigkeit des Robotergelenks i	°/s
θ''	Beschleunigung des Robotergelenks i	°/s ²
λ	Wellenlänge	nm
ξ	Wahrscheinlichkeits-Grenzwert	
σ	Standardabweichung	
τ	Hashfunktion zum Abbilden der LUT	
φ	Reflexionswinkel der Objekt Oberfläche	°
μ	Zugehörigkeitsfunktion im Sensor-Blickfeld	
$L(o_n)$	Logit-Transformation	
\mathcal{N}	Standardnormalverteilungsdichtefunktion	
\mathcal{C}	Menge aller Sensorblickfelder	
\mathcal{U}	Menge aller möglichen Umgebungen	

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Globalisierung hat in den vergangenen Jahrzehnten zu einem internationalen Güterverkehr und damit verstärktem Wettbewerb zwischen Herstellern verschiedenster Märkte geführt. Produzierende Unternehmen stehen unter hohem Druck, ihre Produkte effizient und kostengünstig zu fertigen, um konkurrenzfähig zu sein. Dies gilt insbesondere für Hochlohnländer wie z.B. Deutschland. Gleichzeitig steigt die Nachfrage nach kundenindividuellen Gütern, was die Stückzahlen baugleicher Produkte enorm senkt. Im Extremfall ist jedes ausgelieferte Produkt ein Unikat. Eine vollautomatisierte Produktionslinie lässt sich in diesem Kontext nur schwer amortisieren. Eine manuelle Fertigung andererseits kann die benötigten Stückzahlen nicht immer ermöglichen. In diesem produktionstechnischen Spannungsfeld ist eine hybride Lösung gesucht, die die Flexibilität von Mitarbeitern bei schwierigen Aufgaben und zugleich die Vorteile von Maschinen wie z.B. Robotern hinsichtlich Präzision und Effizienz bietet.

Die direkte Arbeitsteilung zwischen einem hochflexiblen Mitarbeiter und einem hocheffizienten Roboter ist ein solcher Ansatz und wird Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) genannt. Das Ziel ist es, die besten Eigenschaften der beiden Partner miteinander zu verbinden. Roboter, die für diese Anwendungen zugelassen sind, werden MRK-Roboter genannt und von klassischen Industrierobotern unterschieden.

Spätestens mit dem Markterfolg der Firma *Universal Robots AS* wurde diese Art von Robotern günstig verfügbar und die Stückzahl industriell eingesetzter MRK-Roboter ist gemäß der *International Federation of Robotics IFR* seitdem kontinuierlich gestiegen¹. Allein im Jahr 2021 wurden 39.000 Einheiten installiert (siehe Abbildung 1). Dies zeigt: Der Bedarf für kollaborative Anwendungen ist vorhanden, dennoch ist die Mehrzahl der verkauften Einheiten mit 92% Industrieroboter.

Das Konzept von MRK-Robotern ist auf die Minimierung von physischen Gefahren für den Menschen ausgelegt. Sie sind im Vergleich zu klassischen Industrierobotern verhältnismäßig ungefährlich. Weniger Masse im Vergleich zu Industrierobotern reduziert den Bremsweg und den bei einem Zusammenstoß übertragenen Impuls. Geringere Steifigkeit und die Kraftbegrenzung einzelner Achsen reduzieren die Quetschgefahr.

¹ https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf [23.10.2022]

Doch dieses Konzept bringt auch einige Nachteile mit sich. So fällt die Nutzlast deutlich geringer aus und auch die Reichweiten sind begrenzt. Aufgrund der Kollisionsgefahr dürfen diese Roboter zudem nur sehr langsam verfahren werden. MRK-Roboter sind also konzeptionell darauf ausgelegt bei Kollisionen biomechanisch ungefährlich für den Mitarbeiter zu sein.

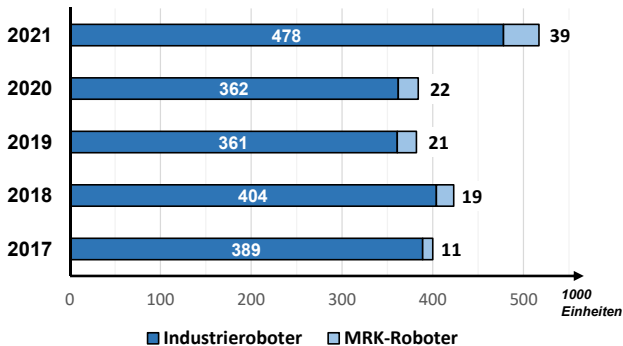


Abbildung 1: Jährlich installierte Roboter nach Klasse gemäß IFR Report 2022¹

Wenn kollisionsbedingte Gefahren mit dem Mensch bereits präventiv vermieden werden, können zukünftig größere und leistungsfähigere Roboter eingesetzt werden. Es entstehen mehr Anwendungsmöglichkeiten und Potenziale für Produktivitätssteigerungen und Kostensenkungen. *Ein Ziel dieser Arbeit ist daher, größere und leistungsfähigere Roboter für die MRK zu befähigen.*

Der Endeffektor als Gefahrenquelle in der MRK

Während verschiedene Hersteller bereits umgerüstete Industrieroboter für die Kollaboration mit Menschen anbieten, sind die Endeffektor-Werkzeuge häufig noch eine Gefahrenquelle für Verletzungen. Die eingesetzten Systeme am Flansch sind oftmals nicht auf die besonderen Anforderungen in MRK-Applikationen angepasst. Dabei ist der Endeffektor der physisch nächstgelegene Kontaktpunkt bei der Zusammenarbeit mit dem Menschen. Somit ist er einer der gefährlichsten Teile des Robotersystems. Darüber hinaus ist der Endeffektor der schnellste Teil des bewegten Systems und hat damit hohe kinetische Energie. Im Fall eines Zusammenstoßes mit einem Mitarbeiter geht vom Endeffektor eine große Verletzungsgefahr aus, die es zu minimieren gilt. Ihm kommt demnach eine besondere Rolle in der Gefährdungsbeurteilung der Roboteranwendung zu.

Der mit Abstand häufigste Anwendungsfall für Roboter sind Handhabungsaufgaben. Im Jahr 2021 wurden nach Erhebungen der *International Federation of Robotics IFR* 43% aller verkauften Roboter für diesen Zweck installiert². Zu den am häufigsten eingesetzten Endeffektoren gehören demnach Greifer, welche für Handhabungsvorgänge eingesetzt werden.

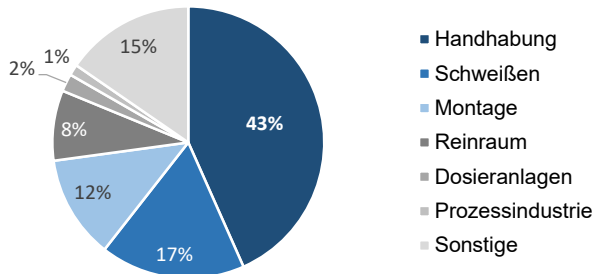


Abbildung 2: Verteilung der jährlich installierten Robotereinheiten nach Anwendung²

Der Greiferspezialist *Schunk Greif- und Spanntechnik GmbH* hat im Jahr 2017 erstmals einen Greifer-Prototyp mit integrierter Sensorik speziell für die MRK vorgestellt³. Diese ermöglicht es, die Anwesenheit einer menschlichen Hand in einigen Zentimetern Abstand zu erfassen und bei Detektion einen Leichtbau-Roboter zu stoppen. Ähnliche Systeme wurden in den folgenden Jahren von weiteren Herstellern vorgestellt.

Um leistungsfähigere und schwerere Roboter für die MRK zu befähigen, müssen diese rechtzeitig vor einer Kollision abbremsen können. Größere Systeme haben aber mehr kinetische Energie, die umgewandelt werden muss. Damit ist der Bremsweg meist länger als der von den Sensoren mögliche Detektionsabstand. Größere Arbeitsräume der Roboter benötigen zudem eine höhere Geschwindigkeit, um kosteneffizient zu sein. Im Hinblick auf den Endeffektor sollte daher der Detektionsabstand einer Annäherungssensorik möglichst groß sein. *Ein Teilziel der Arbeit ist daher eine Erhöhung der Detektionsreichweite von MRK-Greifern im Vergleich zum Stand der Technik.*

Ein solches Überwachungssystem erfasst die Umgebung im Arbeitsraum des Roboters. In engen Roboterzellen befinden sich neben dem Menschen weitere, statische

² https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf [23.10.2022]

³ https://schunk.com/de_de/aktuell/highlights/markt-technik/article/3068-smarte-haende-fuer-die-mensch-roboter-kollaboration/ [26.10.2018]

Hindernisse, welche keine Gefahr darstellen wie z.B. Maschinenteile oder Ladungsträger. Diese werden schon bei der Programmierung der Roboterbewegung berücksichtigt. Ein Greifer kommt dieser Umgebung spätestens beim Aufnehmen bzw. Ablegen von Werkstücken zwangsläufig nahe. Eine Annäherungssensorik muss daher unterscheiden, ob es sich bei der erfassten Umgebung um einen Menschen handelt: ob also eine Verletzungsgefahr besteht oder nicht. *Um dieses Problem zu lösen, ist ein Teilziel der Arbeit die Entwicklung eines Verfahrens zur Gefahrenabschätzung in MRK-Greifern.*

Um die Sicherheit von MRK-Anwendungen zu erhöhen und im besten Fall den Prozess aufrecht zu erhalten, rückt ein weiterer Aspekt in den Fokus. In Gefahrensituationen sollte das System flexibel auf die Bewegung des Menschen reagieren können. Bewegt sich ein Mensch kontinuierlich auf den Roboter zu, sollte dieser anhalten und bei weiterer Annäherung z.B. zurückweichen. Steht ein Mensch unabsichtlich im Weg des Roboters sollte der Roboter auf Basis der Informationen des Greifers in der Lage sein, seinen Prozess anzupassen und das Hindernis zu umfahren. *Das dritte Teilziel dieser Arbeit ist es daher, den Roboter durch einen intelligenten Greifer zu befähigen, Kollisionen mit Menschen aktiv zu vermeiden.*

1.2 Struktur und Vorgehen in der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus acht Kapiteln, welche logisch aufeinander aufbauen. Zunächst werden im zweiten Kapitel die technischen und regulatorischen Grundlagen für das Verständnis der Arbeit aus dem Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration erklärt. Es werden verschiedene Sensorprinzipien für die Abstandserfassung erläutert und wichtige Prinzipien der Robotik kurz zusammengefasst. Abschließend wird der Stand der Technik und Forschung für Greifsysteme im Kontext der MRK zusammengefasst und bewertet.

Im dritten Kapitel werden die Zielsetzung der Arbeit weiter in detaillierte Problemstellungen konkretisiert und die betrachteten Risikofälle definiert, die als Ausgangsbasis für die abgeleiteten Anforderungen und Berechnungsverfahren dienen. Das technische Vorgehen zur Lösungsfindung wird anhand des V-Modells beschrieben und in drei inhaltliche Teillösungen gegliedert.

Die Kapitel vier bis sechs beschreiben die inhaltliche Ausarbeitung zur Lösung der jeweiligen Teilprobleme. In Kapitel vier wird die Frage nach einem geeigneten Sensor-

konzept zum Schutz vor Kollisionen mit einem Endeffektor betrachtet. Nach der Auswahl eines geeigneten Sensorprinzips wird ein konkretes Konzept für die Integration einer Sensorik in einen Greifer vorgestellt. Folgend wird in Kapitel fünf eine Berechnungsmethode entwickelt, die unterscheidet, ob eine potentielle Gefahr in Form einer Kollision droht oder nicht. Das sechste Kapitel beschäftigt sich mit der Frage der Reaktion auf eine richtig detektierte Gefahr. Es werden, neben der durch den Greifer kontrollierten Geschwindigkeitsregelung bis zum Halt, auch zwei Methoden der Hindernisumfahrung für das Sensorkonzept adaptiert und umgesetzt.

In Kapitel sieben werden die als Software implementierten Berechnungsmethoden in verschiedenen Szenarios einer Simulationsumgebung umfangreich getestet und die Leistungsgrenzen bestimmt. Anschließend wird der Greifer-Prototyp mit dem Sensorsystem und den entwickelten Methoden in Versuchen mit dem Robotersystem validiert. Abschließend fasst Kapitel acht die Lösungsansätze und die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen. Im Ausblick werden nächste Schritte aufgezeigt, die im Hinblick auf weitere Forschungsarbeiten und eine industrielle Nutzung auf diese Arbeit folgen sollten.

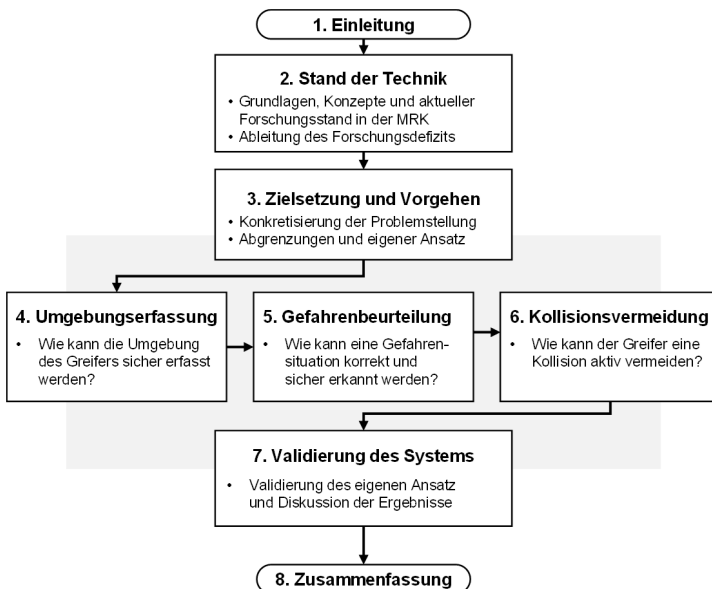


Abbildung 3: Übersicht über die Aufteilung der vorliegenden Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel schafft die Grundlagen für das Verständnis der Arbeit und fasst den aktuellen Stand der Technik und Forschung für Greifer in der MRK zusammen.

Einleitend werden die zentralen Konzepte aus dem Gebiet der Mensch-Roboter-Kollaboration erläutert und notwendige Definitionen getroffen. Darauf aufbauend werden die Grundlegenden Konzepte zur Bewegungsplanung und -steuerung von Robotern im Kontext der Kollisionsvermeidung erläutert. Anschließend werden bekannte Ansätze für die Kollisionsvermeidung in der MRK mit Fokus auf Greifer diskutiert.

Für Sicherheitskonzepte, die keinen Bezug zu Greifern bzw. Endeffektoren in der Mensch-Roboter-Kollaboration haben, wird auf die Literatur verwiesen. Einen guten Überblick bieten (Müller & Franke et al. 2019) und kompakter (Zacharaki & Kostavelis et al. 2020).

Abschließend wird in Abschnitt 2.4 der Stand der Technik zur Kollisionsvermeidung mit Greifern in der MRK zusammengefasst und bewertet.

2.1 Mensch-Roboter-Kollaboration

Industrieroboter jeglicher Art eint, dass sie Bewegungen unter z.T. hohen Belastungen schnell und präzise ausführen. Bis vor wenigen Jahren konnten sie während dieser Arbeit allerdings nur wenige Informationen über Ihre Umgebung erfassen oder verarbeiten. Um Menschen vor Unfällen mit diesen, quasi „blinden“, Robotern zu schützen, wurden beide mit Hilfe von trennenden Schutzeinrichtungen wie Zäunen oder Lichtschranken streng voneinander separiert.

Seit der Entwicklung von kleineren, einfach zu programmierenden Robotern mit integrierten Sicherheitsfunktionen kann diese Trennung unter strengen Auflagen aufgehoben werden. Diese direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ermöglicht z.B. flexiblere Applikationen, eine weitere Entlastung des Menschen und Automatisierungslösungen mit geringen Kosten für kleine Stückzahlen. Diese Art der Zusammenarbeit wird Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) genannt.

2.1.1 Grundbegriffe, Definitionen und Eingrenzungen

2.1.1.1 Industrieroboter

In dieser Arbeit wird unter dem Begriff (Industrie-)Roboter ein System bestehend aus einer steuerbaren Kinematik zum Ausführen präziser Bewegungen und einer dazugehörigen (Roboter-) Steuerung zum Programmieren der Bewegungsvorgänge verstanden (Haun 2013). Der Betrachtungsrahmen wird für diese Arbeit auf die weit verbreiteten, stationären Knickarmroboter eingeschränkt, welche aus elektrisch regelbaren Gelenken (Achsen) und Verbindungselementen bestehen.

Das Robotersystem verfügt zusätzlich über mindestens einen Endeffektor, welcher als Wirkelement für die Interaktion mit der Umgebung dient. Weitere Peripherie, wie z.B. zusätzliche Programmiergeräte („SmartPad“), Kabel oder andere Roboteraufbauten werden nicht detailliert betrachtet.

2.1.1.2 MRK-Roboter

Eine Untergruppe der Industrieroboter sind MRK-Roboter, welche je nach Publikation auch „Leichtbauroboter oder kollaborierende Roboter“ genannt werden. Diese erfüllen besondere Sicherheitsnormen bzgl. der Zusammenarbeit mit dem Menschen gemäß der Norm für kollaborierende Roboter (DIN ISO/TS15066). In dieser Arbeit wird folgend der Begriff *MRK-Roboter* verwendet.

2.1.1.3 Endeffektoren

Der Endeffektor eines Roboters ist das funktionale System, in dem die Wechselwirkung mit der Umgebung erfüllt wird. Typische Endeffektoren sind Werkzeuge wie z.B. Bearbeitungsspindeln oder Schweißzangen, Messinstrumente z.B. für das optische Vermessen von Oberflächen oder Greifsysteme, welche das Werkstück aufnehmen. Letztere sind potenziell ungefährlicher in der Zusammenarbeit mit dem Menschen, weshalb Handhabungsprozesse sich am meisten für MRK-Anwendungen eignen. (Wolf & Schunk 2016)

2.1.1.4 Greifer-Typen

Greifer können in verschiedene Gruppen unterschieden werden. Eine gebräuchliche Art der Unterscheidung ist das Wirkprinzip beim „Spannen“ des Werkstücks und „Halten“ des Werkstücks (VDI2860:1990-05). Die verbreitetsten Wirkprinzipien sind form- und kraftschlüssiges Greifen. Hierbei kann zusätzlich nach Anzahl der Kontaktflächen

pro Greifelement unterschieden werden. Die Kombination aus Wirkflächenanzahl und Wirkprinzip kann zu einem Greiftyp zusammengefasst werden.

Das kraftschlüssige Spannen eines Werkstücks mittels mindestens zweier Wirkflächen wird als Klemmgriff bezeichnet. Analog wird das formschlüssige Spannen in gleicher Konfiguration als Formgriff bezeichnet. In Anlehnung an das menschliche Greifen wurden die Wirkflächenkomponenten hierfür als Finger bezeichnet. Über eine Greifkinematik können diese bewegt werden und Kräfte übertragen.

Kraftschlüssiges Spannen mit nur einer Kontaktfläche pro Wirkelement wird als Haftgriff bezeichnet. Dieser Greiftyp wird häufig als System aus mehreren Wirkelementen wie z.B. Sauggreifern für flächige Bauteile verwendet. Das System besteht in diesem Fall aus mehreren Wirkelementen und einem Trägerelement, welches Kräfte und z.B. Medien leiten kann.

In dieser Arbeit wird stellvertretend der Typ Finger-Greifer verwendet. Das System aus Greifkinematik, Fingern und ggf. Kupplungselementen wird hier vereinfacht als Greifer oder Greifsystem bezeichnet.

2.1.1.5 MRK-spezifische Greifer

Als MRK-spezifische Greifer werden Greifer bezeichnet, die die zahlreichen Normen bzgl. des Einsatzes in MRK-Anwendungen erfüllen. Ein Greifer im MRK-Einsatz darf z.B. für den Fall eines Zusammenstoßes mit dem Menschen keine gefährdenden Spitzen oder scharfen Kanten aufweisen (DIN ISO/TS15066), weshalb Endeffektoren häufig mit Kunststoffhüllen verkleidet werden. Dies gilt sowohl für Finger- als auch für Flächen-Greifer.

Die Greifer werden entweder vom Hersteller, wie z.B. bei der *SCHUNK Co-Act Serie*, bereits MRK-zertifiziert ausgeliefert oder können vom Anwender mit externen Schutzmodulen, z.B. von der *Blue Danube Robotics GmbH* nachgerüstet verwendet. MRK-zertifiziert bedeutet in diesem Kontext, dass eine technische Überwachungsorganisation die Konformität mit technischen Richtlinien und Standards bescheinigt hat, um typischen Risikofällen vorzubeugen. Im MRK-Einsatz besteht beispielsweise das Risiko, dass der Greifer eine am Werkstück anliegende menschliche Hand einspannt. Daher müssen Fingergreifer eine integrierte Begrenzung der Greifkraft enthalten, um eine Quetschung der Finger zu vermeiden.

2.1.2 Klassifizierungen und Betriebsarten der MRK

Neben allgemein geltenden Sicherheitsnormen wie z.B. der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG sind für MRK-Anwendungen die Normen DIN EN ISO 10218 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen“ und die DIN TS 15066 „Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter“ maßgeblich. Sie bieten Richtlinien für den Aufbau und den Betrieb von kollaborierenden Robotern, lassen jedoch auch bewusst Interpretationsspielraum bei der genauen Ausgestaltung der Sicherheitsmechanismen. (DIN10218-1; DIN ISO/TS 15066; EU 2006/42/EG)

Es werden vier verschiedene Betriebsarten unterschieden, welche sich in der Art der Risikovermeidung für den Menschen unterscheiden und in Abbildung 4 dargestellt werden (DIN10218-1).

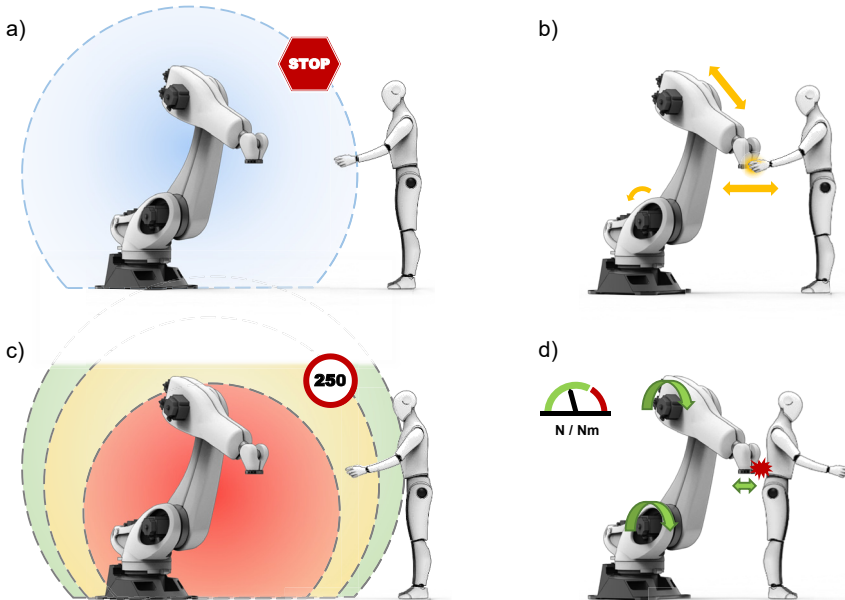


Abbildung 4: Unterschiedliche Betriebsarten der Mensch-Roboter-Kollaboration

a) Sicherheitsbewerteter überwachter Halt

„Der Roboter muss anhalten, wenn sich eine Person im Kollaborationsraum befindet. [...] Der Roboter kann den Automatikbetrieb wiederaufnehmen, wenn die Person den Kollaborationsraum verlässt.“ (DIN10218-1)

b) Handführung

Bei aktivierter Handführung wird die Bewegung des Roboters ausschließlich durch einen Mitarbeiter gesteuert. In diesem Fall reagieren die Antriebe des Roboters auf ein haptisches Eingabegerät am Roboter, z.B. einen integrierten Kraft-Momenten-Sensor. Durch das Aufbringen einer Kraft kann der Mitarbeiter den Roboter mit sicherheitsüberwachter Geschwindigkeit im Raum bewegen. (DIN10218-1)

c) Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

„Der Roboter muss eine festgelegte Geschwindigkeit und einen festgelegten Abstand zur Bedienperson einhalten. Diese Funktionen können integriert sein oder durch die Kombination externer Eingangssignale realisiert werden. Das Erkennen des Ausfalls, die festgelegte Geschwindigkeit oder den festgelegten Abstand einzuhalten, muss zu einem Sicherheitshalt führen [...]“ (DIN10218-1)

d) Leistungs- und Kraftbegrenzung

Leistungs- und Kraftbegrenzung des Roboters bedeuten, dass ein Sicherheitshalt ausgelöst werden muss, wenn ein überwachter Grenzwert überschritten wird. Diese Funktion verhindert, dass der Roboter sich nach einer Kollision weiter bewegt. Überwacht werden typischerweise die Drehmomente in den Achsen, aber auch Kräfte am Endeffektor oder Druckanstiege bei pneumatischen Robotern.

(DIN10218-1)

2.2 Bewegungsplanung und -steuerung zur Kollisionsvermeidung

Jedem kollisionsfreien Bewegungsvorgang einer Roboterkinematik liegt eine Bewegungsplanung zugrunde. Diese kann entweder manuell von einem Mensch vorgenommen worden sein oder rechnerisch bestimmt werden. Nachfolgend werden die wichtigsten Grundlagen erläutert und in Kontext der MRK eingeordnet.

Die Position des Roboters für die Bewegungsplanung ist über eine Konfiguration der Freiheitsgrade der Kinematik beschrieben. Für einen Knickarmroboter sind dies z.B. die Achskoordinaten. Die Gesamtheit aller möglichen Konfigurationen bildet den Konfigurationsraum. Ergebnis der Bewegungsplanung ist eine Abfolge von Konfigurationen

von der Startposition bis zur Endposition. Dieser Vorgang auch Pfadplanung genannt, weil ein Pfad in einem Graph möglicher Konfigurationen beschrieben wird. (Siciliano & Khatib 2016)

Die Bewegungssteuerung bzw. -regelung stellt während des Ausführens der Bewegung sicher, dass die Positionen unter Einhaltung differentieller Anforderungen, wie z.B. Grenzwerte für Beschleunigungen oder Geschwindigkeiten, erreicht werden. Die Lösung dieses Differentialgleichungssystems führt zu einer glatten Bewegungskurve, welche Trajektorie genannt wird. Aus dem Differentialgleichungssystem kann eine Interpolation kontinuierlich Eingangssignale für z.B. eine Positionsregelung einer Roboterachse berechnen.

2.2.1 Varianten der Pfadplanung

Während für den Mensch die kollisionsfreie Bewegungsplanung im Raum intuitiv einfach zu lösen ist, ist die Berechnung eines solchen Pfads für Roboter mathematisch komplex, weshalb sich über die Jahre sehr viele verschiedene Ansätze dafür entwickelt haben. Die rechnerischen Verfahren können nach verschiedenen Prinzipien unterschieden werden, wobei in der Praxis häufig Kombinationen Anwendung finden (siehe Abbildung 5).

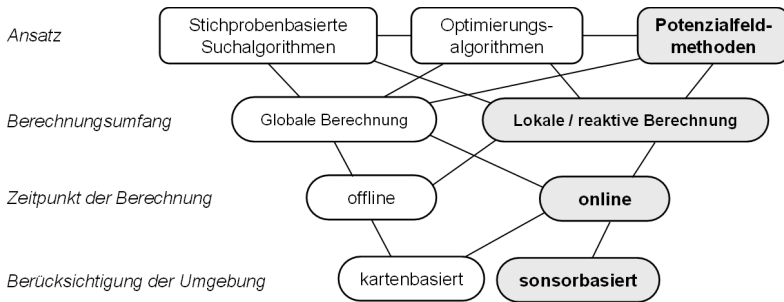


Abbildung 5: Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Ansätze der Pfadplanung und in dieser Arbeit verwendete Kombination (blau hinterlegt)

Mathematischer Ansatz

An dieser Stelle werden die grundlegenden mathematischen Ansätze zur Pfadplanung sehr kompakt erläutert und nach (Siciliano & Khatib 2016) eingeordnet.

- **Stichprobenbasierte Suchalgorithmen**

Diese Art der Pfadplanung rastert den Arbeits- oder Konfigurationsraum des Roboters mit zufällig gewählten Punkten und sucht anschließend sinnvolle Pfade zwischen den Punkten.

- **Potenzialfeldmethoden**

In dieser Art der Pfadplanung werden Anforderungen in Form von künstlichen Potenzialfeldern im Arbeitsraum modelliert. Durch Überlagerung mehrerer Potenzialfelder entsteht ein Optimierungsproblem für die Suche nach einem Pfad durch das Potenzialfeld mit möglichst geringen Kosten. (Krogh & Thorpe 1986)

- **Optimierungsalgorithmen**

Die gefundenen Pfade werden in beiden Fällen mithilfe von Optimierungsalgorithmen bewertet, indem Anforderungen in eine Kostenfunktion modelliert werden. Somit kann z.B. der kürzeste oder schnellste Pfad gefunden werden.

Lösungsumfang

Der Berechnungs- bzw. Lösungsumfang des Verfahrens beschreibt, ob der Pfad vollständig bis zum Ziel, oder nur iterativ der nächste Schritt berechnet wird.

- **Global**

Ist die Umgebung vollständig bekannt und beschrieben, kann eine globale Lösung, im Sinne eines Pfads, bis zur Zielposition berechnet werden.

- **Lokal/generativ**

Ist die Umgebung nicht vollständig bekannt oder verändert sich, kann die Lösung mit dem Fortschritt der Bewegung durch den Raum in einem lokalen Bereich generativ berechnet werden. In diesem Fall gibt es keinen vordefinierten Pfad zum Ziel, sondern der Roboter sucht sich generativ Stück für Stück seinen Weg zum Ziel. Es wird also eine zeitvariante Steuergröße berechnet, die eine bessere Lage zum Ziel ermöglicht. Dieser Ansatz bietet sich an, wenn die Berechnung einer globalen Lösung sehr lange dauert und somit keine parallele Bewegung möglich wäre.

Zeitpunkt der Berechnung

- **Offline-Planung**

Wenn die Umgebung als statisch angenommen werden kann, ist eine Berechnung vor Beginn des Betriebs möglich. Voraussetzung ist jedoch eine vollständige Beschreibung der Hindernisse in der Umgebung.

- **Online-Planung**

Insbesondere bei dynamischen Hindernissen muss die Situation stets neu bewertet werden, weshalb die Pfadplanung bzw. -anpassung zur Laufzeit, also während der Bewegung, stattfindet. Dies erfordert jedoch echtzeitfähige Algorithmen, d.h. Berechnungsverfahren, deren Laufzeit eine deterministische Maximalzeit nicht überschreitet

Repräsentation der Umgebung

Für die Berechnung einer kollisionsfreien Bewegung im Raum sind zwangsläufig Informationen über die im Arbeitsraum vorliegenden Hindernisse notwendig. Diese können auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden:

- **Kartenbasierte Pfadplanung** - Karten sind eine Abbildung der Umgebung in Modellen, die für eine Pfadplanung genutzt werden können. Grundsätzlich können Karten in Form von Plänen mit Features wie z.B. Linien oder Räumen, als topologische Karte in Form eines Graphen oder auch als Gitternetz mit belegten und freien Sektionen (engl. Occupancy Grids) aufgebaut sein. Vorteil einer kartenbasierten Planung ist die Möglichkeit einen optimalen Pfad zu finden, was ggf. jedoch viel Rechenzeit beansprucht. Nachteilig ist der Aufwand zum Erstellen einer korrekten Karte, welche die Umgebung ausreichend genau abbildet. (Hesse & Malisa 2016)
- **Sensorbasierte Pfadplanung**
Im Unterschied zur aufwändigen, kartenbasierten Pfadplanung können Sensordaten auch direkt zur Pfadplanung eingesetzt werden. Hierbei werden aus den Sensordaten relevante Informationen extrahiert und direkt zur Wegfindung genutzt. Dies bietet sich insbesondere bei unbekanntem oder veränderlichen Umgebungen an. (Lu & Xu 2018)

Zusammenfassung: Pfadplanung im Kontext der MRK

Im Kontext der Mensch-Roboter-Kollaboration und insbesondere der Kollisionsvermeidung kann die Position des Menschen erst während der Bewegung erfasst werden. Daher ist ein Ansatz mit Online-Pfadplanung notwendig. Im Kontext dieser Arbeit wird zudem die Umgebung lokal um den Greifer von Sensoren erfasst, weshalb eine generative Lösung gesucht wird. Ein geeigneter Ansatz sind somit Potenzialfeldmethoden, welche folgend genauer beschrieben werden.

2.2.2 Klassische Potenzialfeldmethode (PFM)

In dieser Art der Pfadplanung werden Anforderungen in Form von künstlichen Potenzialfeldern in den Arbeitsraum modelliert. Zur Veranschaulichung soll ein zweidimensionales Beispiel im Raum mit zwei Hindernissen T_1 und T_2 dienen. Der Ansatz sieht vor, die Zielposition als globales Minimum eines Potenzials im Arbeitsraum zu definieren, vergleichbar mit einem Magnetfeld, welches eine anziehende Wirkung hat. Dies kann sowohl im Konfigurationsraum als auch im kartesischen Arbeitsraum geschehen.

Es sei \mathbf{x}_{next} der kartesische Positionsvektor der nächsten Zielkonfiguration. Dann wird nach (Khatib 1985) ein parabolisches Potenzial E_{att} definiert, welches ausgehend von der Zielposition eine anziehende Wirkung hat (siehe Formel 2-1). Wird nun das Gradientenfeld ∇E_{att} gebildet, entspricht das Ergebnis einer Kraft F_A , die den Roboter proportional zum euklidischen Abstand in Richtung Zielposition zieht (Formel 2-2).

$$E_{att}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} G_A \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{next})^2 \quad \text{Formel 2-1}$$

$$-\nabla E_{att}(\mathbf{x}) = F_A(\mathbf{x}) = -G_A \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{next}) \quad \text{Formel 2-2}$$

Analog werden bekannten Hindernissen abstoßende Potenzialfelder zugeordnet. Eine mögliche Ansatzfunktion nach (Khatib 1985) ist durch Formel 2-3 gegeben. Hierbei ist G_R ein Proportionalitätsfaktor, um die verschiedenen Potenziale zueinander gewichten zu können. Zudem wird über d_z der Einflussradius des Potenzials begrenzt. Die Bildung eines Gradientenfelds hat analog eine abstoßende Kraft F_R auf den Roboter zur Folge (Formel 2-4).

$$E_{rep}(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot G_R \cdot \left(\frac{1}{(\mathbf{x} - \mathbf{x}_{next})} - \frac{1}{d_z} \right)^2 \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{next})^n & \forall \Delta \mathbf{x} < d_z \\ 0, & \forall \Delta \mathbf{x} \geq d_z \end{cases} \quad \text{Formel 2-3}$$

$$-\nabla E_{rep}(\mathbf{x}) = F_R(\mathbf{x}) \quad \text{Formel 2-4}$$

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Potenzialfelder für das gegebene Beispiel mit zwei Hindernissen. Hierbei soll der Pfad von der aktuellen Position \mathbf{x}_{TCP} zum nächsten Ziel \mathbf{x}_{next} gefunden werden.

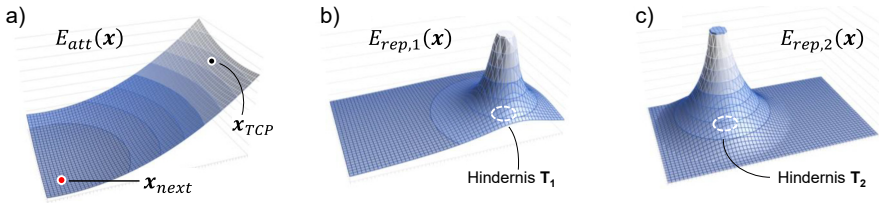


Abbildung 6: Beispielhafte Potenzialfelder für: a) anziehendes Potenzial des Ziels, b) und c) abstoßende Potenziale von Hindernissen

Durch Überlagerung der drei Potenzialfelder entsteht ein Optimierungsproblem, in welchem iterativ der Pfad vom Startpunkt zu einem Minimum über das sich ergebende Vektorfeld ermittelt werden kann (siehe Formel 2-5).

$$E_{ges}(x) = E_{att}(x) + \sum_i E_{rep,i}(x) \tag{Formel 2-5}$$

$$-\nabla E_{ges}(x) = F_{ges}(x) \tag{Formel 2-6}$$

Mit jeder Iteration wird ein Kraftvektor F_{ges} berechnet, der den Roboter in Richtung des steilsten Gefälles zieht. Das Prinzip wird in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

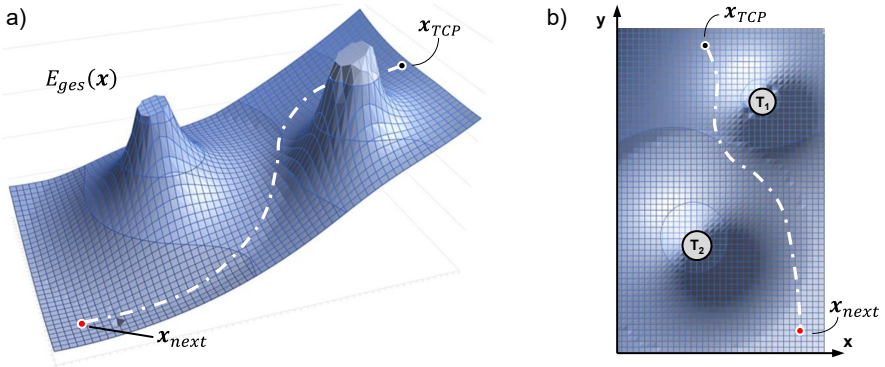


Abbildung 7: Beispielhaftes resultierendes Potenzialfeld und generierter Pfad in a) 3D-Ansicht und b) Draufsicht

Die Lösung kann bei statischen Hindernissen global vorab oder bei dynamischen Hindernissen parallel zur Laufzeit berechnet werden. Ein großer Vorteil der Methode liegt

in der geringen benötigten Rechenleistung, weshalb dieser Ansatz weit verbreitet ist. (Koren & Borenstein 1991)

2.2.3 Varianten der Potenzialfeldmethode

Im Laufe der Zeit wurden viele weitere Varianten der Potenzialfeldmethode veröffentlicht, die verschiedene Nachteile der klassischen Methode kompensieren. Stellvertretend sollen an dieser Stelle drei für die Arbeit relevante Erweiterungen vorgestellt werden.

- **Generalisierte Potenzialfeldmethode (GPFM)**

Die generalisierte oder auch multimodale Potenzialfeldmethode nach (Tivolve 1990) fügt der zuvor beschriebenen Variante noch einen weiteren, geschwindigkeitsabhängigen Term hinzu. Es werden somit virtuelle Kräfte aus zwei Moden erzeugt: die konservativen Kräfte aus Potenzialfeldgradienten und bewegungsabhängige Kräfte nach Lagrange.

- **Potenzialfeldmethode für bewegte Ziele**

Ein weiterer Nachteil der klassischen Methode ist die Anwendbarkeit bei dynamischen Zielen. In einer Erweiterung nach (S.S. Ge & Y.J. Cui 2002) wird die Potenzialfunktion um die Relativgeschwindigkeit zwischen Roboter und Ziel ergänzt, um auch bewegliche Ziele zu erreichen.

- **Elastische Bänder**

Um die Vorteile verschiedener Ansätze zu kombinieren, wurde von (Brock & Khatib 2002) die Methode ‚Elastische Bänder‘ (engl. elastic strips) entwickelt. In dieser werden offline und online Pfadplanung für Roboter mit vielen Freiheitsgraden kombiniert. Hierbei wird zunächst ein kollisionsfreier Pfad offline geplant und im Betrieb anhand von eingehenden Sensordaten mittels Potenzialfeldern in Echtzeit gedehnt bzw. verzerrt.

Essenziell für alle beschriebenen Ansätze zur kollisionsfreien Pfadplanung sind fehlerfreie Informationen über die Umgebung. Im Kontext dieser Arbeit sollen Kollisionen zwischen Mensch und Greifer vermieden werden, weshalb nachfolgend auf die Umgebungserfassung zur Kollisionsvermeidung in Greifern eingegangen wird.

2.3 Kollisionsvermeidung mit Greifern in der MRK

In der Betriebsart „Leistungs- und Kraftbegrenzung“ können Kollisionen zwischen Mensch und Roboter weiterhin stattfinden. Lediglich die Auswirkungen von Kollisionen

werden reduziert. Bei der Handhabung z.B. scharfkantiger Werkstücke besteht dennoch Verletzungsgefahr. Der nächste Schritt ist daher die Kollisionsvermeidung.

Um Kollisionen mit dem Greifer vollständig zu vermeiden, werden abstandsüberwachende Sicherheitssysteme zur Umgebungserfassung eingesetzt, um zu reagieren, bevor ein Kontakt stattfindet. Um einen Überblick über die aktuellen Ansätze aus dem Forschungsgebiet der Kollisionsvermeidung im Kontext von Greifern zu geben, bietet es sich an, die Ansätze nach dem Sensorprinzip des Sicherheitssystems zu gliedern.

Nachfolgend werden daher jeweils die Grundlagen der eingesetzten Messtechnik und anschließend der aktuell bekannte Stand der Technik zur Kollisionsvermeidung mit Greifern auf Basis dieses Sensorprinzips vorgestellt.

2.3.1 Gliederung nach Sensorprinzipien

Die zu ermittelnden Informationen der Sicherheitssensorik für die Kollisionsvermeidung sind der Abstand bzw. die Lage und Orientierung aller potenziellen Kollisionsobjekte im Raum. Diese abstandsüberwachenden Sicherheitssysteme können entweder außerhalb des bewegten Greifers oder im Robotersystem integriert arbeiten.

Extern arbeitende Systeme überwachen den Arbeitsraum aus einer oder mehr Perspektiven im Raum. Ein Beispiel sind optische Kamerasysteme, welche über dem Arbeitsbereich aufgehängt werden (engl. Vision-Systeme). Diese Ansätze haben jedoch insbesondere für Handhabungsaufgaben den Nachteil, dass Verdeckungen durch Vorrichtungen und Mitarbeiter selbst auftreten können, sodass Gefahrensituationen nicht zuverlässig erfasst werden. Auf Grund dessen ist es vorteilhaft, Annäherungs- bzw. Abstandssensoren zur Detektion von Objekten direkt am bzw. *im Greifer* anzubringen. Diese Arbeit fokussiert sich daher im Weiteren auf Greifer-integrierte Systeme. In der Praxis sollten externe und integrierte Überwachungssysteme zusammen eingesetzt werden, um die Sicherheit zu erhöhen.

Für ein integriertes System wird die Umfeldsensorik direkt im Endeffektor realisiert. Das zentral überwachte System ist der Greifer inkl. dem Werkstück. Je nach verwendetem Sensorsystem werden unterschiedliche Messdaten erfasst, aus denen die benötigten Informationen errechnet werden. Nachfolgend sind die wichtigsten Sensorprinzipien dargestellt und gegliedert (Abbildung 8).

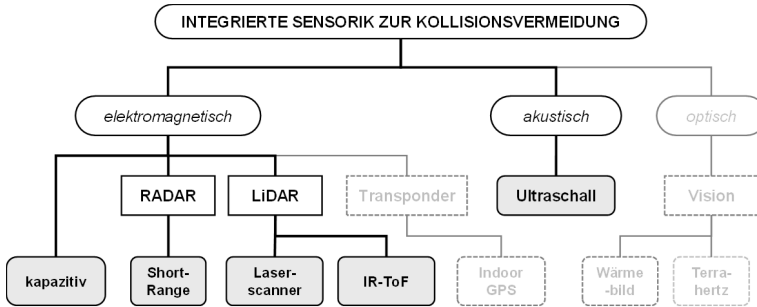


Abbildung 8: Gliederung integrierter Sensorprinzipien für die MRK

Sensoren, welche Orts- und Lageinformationen ermitteln, werden grundsätzlich nach physikalischem Messprinzip eingeteilt. Für die Abstandsmessung basieren viele Ansätze auf der Messung des Verhaltens elektromagnetischer Wellen. In Kapitel 2.3.2 werden Arbeiten auf Basis kapazitiver Messungen in elektromagnetischen Feldern vorgestellt. Darauf folgend werden in Kapitel 2.3.3 aktuelle Ansätze auf Grundlage von Radiowellen (RADAR) bzw. auf Grundlage von Lichtwellen (LiDAR) in Kapitel 2.3.4 erläutert. Darüber hinaus existieren Ansätze zur Abstandserfassung mittels akustischer Verfahren. Der aktuelle Stand der Technik zu diesen, auf Ultraschallwellen basierenden Verfahren (SODAR), ist in Kapitel 2.3.5 zusammengefasst. Eine Kurzübersicht sonstiger Verfahren inkl. optischer Sensorprinzipien findet sich in Kapitel 2.3.6.

2.3.2 Kapazitive Sensorsysteme

Kapazitive Sensorsysteme sind in vielen Anwendungen in der Robotik weit verbreitet, um das Vorhandensein eines Objekts zu detektieren. Das Prinzip beruht auf der Messung einer Kapazitätsänderung, sobald sich ein Objekt im elektrischen Feld einer Schaltung befindet. Durch die Annäherung des Objekts an eine Schaltung mit mehreren Kondensatoren verändert sich die kapazitive Ladung im Vergleich zu einem Referenzpotenzial. Abbildung 9 zeigt dieses Prinzip vereinfacht: Aufgrund der Annäherung des Menschen verändern sich die Feldlinien und die Gesamtkapazität C_{ges} des Systems.

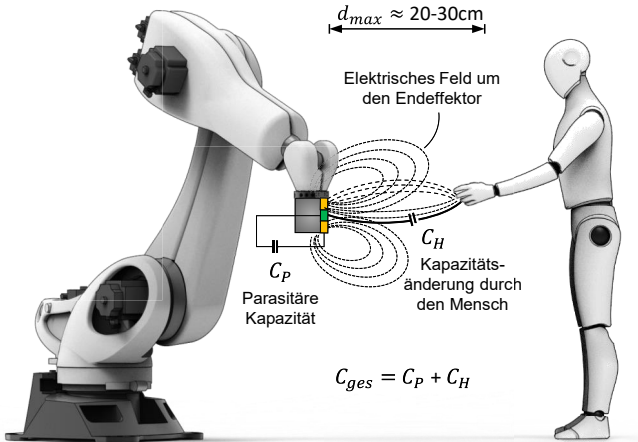


Abbildung 9: Kapazitive Umgebungserfassung in einer MRK-Anwendung

Um die Kapazität zu messen, wird ein Schwingkreis aus mehreren Kondensatoren und mindestens einer Spannungsquelle aufgebaut und die zyklische Entladezeit der Gesamtkapazität gemessen. Je nach Messansatz verändert die Annäherung des Objekts die Dauer zum Laden bzw. Entladen der kompletten Schaltung. Ein Vorteil der kapazitiven Messtechnik ist die hohe Abtastfrequenz von mehreren Kilohertz, da die Ladungszeiten sehr klein sind. Typisch sind Abtastraten von 5 bis 32 kHz. (Parthier 2016)

Daraus ergeben sich drei wichtige Eigenschaften für die Anwendung in der MRK: a) Die Ladungsänderung ist abhängig von dem Material des (Stör-)Objekts, welches als Dielektrizitätskonstante in die Messung eingeht. b) Aus der Messung lässt sich nur eine Annäherung eines Objekts detektieren, nicht der absolute Abstand. c) Nähert sich ein Objekt sehr langsam an oder ist das Objekt nur klein, wird die Ladungsänderung im Verhältnis zum normalen Messrauschen nicht erkannt und das Objekt nicht detektiert.

Der maximale Detektionsabstand ist damit ebenfalls durch die messbare Ladungsänderung der Kapazität begrenzt. Je größer das elektrische Potenzial zwischen zwei Elektroden eines Kondensators, desto weiter reichen dessen Feldlinien in die Umgebung. D.h. die maximale Detektionsreichweite ist hauptsächlich bestimmt durch die aufgespannte Fläche einer Elektrode. In der Literatur finden sich Abschätzungen über die maximal erreichbare Detektionsreichweite. Die maximale Reichweite ist nach aktuellen

technischen Maßstäben ca. 1,2-mal dem Elektrodendurchmesser⁴. Präzisere Abschätzungen müssten mittels elektrischer Feldsimulation getroffen werden.

2.3.2.1 Ansätze und Anwendungen in der MRK

Das grundsätzliche Konzept, die Annäherung eines Menschen an einen Roboterarm zu überwachen, wurde bereits in den frühen Neunzigerjahren durch die *NASA (National Aeronautics and Space Administration)* vorgestellt und patentiert (Vranish & McConnel 1992). Seitdem wurden sowohl in Forschung, als auch im industriellen Bereich bereits Systeme mit kapazitiven Annäherungssystemen präsentiert und in Anwendungsfällen vorgestellt. Das Konzept der kapazitiven Roboterhaut wurde unter anderem innerhalb der *Kuka Roboter GmbH* weiterentwickelt, zum Patent angemeldet und wird heute von der *MRK-Systeme GmbH* vertrieben (Koeppel & Engelhardt et al. 2005), (Heiligensetzer & Steininger 2011). Zu erwähnen ist, dass die Feldlinien bei der beschriebenen Lösung auch den End-Effektor umfassen. Quantitative Eigenschaften wie z.B. die mögliche Detektionsreichweite konnten nicht ermittelt werden.

Als erstes Unternehmen präsentierte die *Fa. Schunk Greif- und Spannsysteme GmbH* auf der Hannover Messe 2018 einen Greifer mit integrierter Annäherungstechnologie. Über drei unabhängig ausgewertete Elektroden wird die Annäherung einer menschlichen Hand in bis zu 20cm Abstand erfasst⁵. Die *Fa. Robert Bosch GmbH* präsentierte 2014 mit dem APAS-System einen zertifizierten MRK-Baukasten, der auch einen einfachen Greifer beinhaltet. Dieser ist wie der gesamte Roboter mit einer patentierten, kapazitiv messenden Hülle ummantelt, die bis zu mehrere Zentimeter in die Umgebung misst (Frangen & Rueb et al. 2011).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass kapazitive Messsysteme in MRK-Greifern bereits zur Anwendung kommen und vergleichsweise ausgereift sind. Die erreichbaren Detektionsreichweiten sind jedoch auf einige Zentimeter beschränkt. Eine Datenverarbeitung von Abstandswerten zur aktiven Kollisionsvermeidung wurde in keiner der Publikationen beschrieben. Ebenso kann auf Basis kapazitiver Messwerte keine Unterscheidung über eine mögliche Gefahr getroffen werden.

⁴ <http://www.cypress.com/AN92239> [09.04.2021]

⁵ https://schunk.com/de_de/aktuell/highlights/markt-technik/article/3068-smarte-haende-fuer-die-mensch-roboter-kollaboration/ [31.10.2018]

2.3.3 RADAR-Systeme

Die RADAR-Technologie (Radio Detection And Ranging) ist in der Sicherheitstechnik bisher noch unterrepräsentiert, eignet sich jedoch ebenfalls dazu, die Anwesenheit eines Menschen in industriellen Anwendungen zu erfassen⁶. Das Prinzip beruht auf der elektromagnetischen Wellenausbreitung, indem ein Signal von einer Senderantenne (Transmitter) ausgesendet, von einem Objekt reflektiert und von einer Empfängerantenne (Transceiver) detektiert wird. Berechnet wird die Laufzeit über die Phasenverschiebung mittels der Maxwell-Gleichungen. Vereinfacht dargestellt in Abbildung 10: Eine Senderantenne sendet kontinuierlich Radiowellen aus (blau), die vom Körper mit einer veränderten Frequenz reflektiert werden (rot)

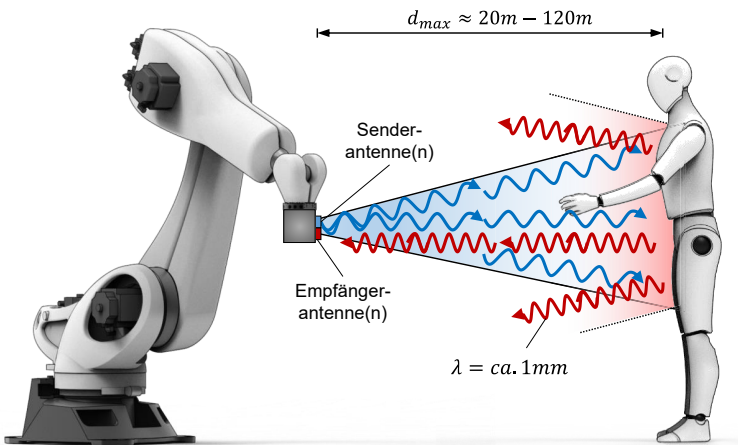


Abbildung 10: Prinzip der RADAR-Messung in einer MRK-Anwendung

RADAR-Systeme werden typischerweise in den für industrielle Zwecke freigegebenen Frequenzbändern von 24GHz bis 81GHz betrieben. Aufgrund der im Vergleich zu Licht langen Wellenlänge eignen sich diese Systeme hervorragend für die Distanzmessung auf große Entfernungen von z.B. bis zu 120m im Automotive-Umfeld und sogar noch mehr in der Luftfahrt. Für industrielle Anwendungen hingegen werden sogenannte *mm-Wave*-Systeme mit möglichst kurzen Wellen von ca. 1mm Wellenlänge und ca. 20m

⁶ https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/using-mmwave-sensors-for-intelligent-safety-guards-in-factory-automation [08.04.2021]

Detektionsreichweite genutzt. Für die Entfernungsschätzung wird die empfangene Signalform über eine Fourier-Transformation umgerechnet. Ein Peak in der Amplitude des Frequenzspektrums entspricht der Entfernung des Objekts. Über die Größe des Peaks kann zudem die Objektoberfläche geschätzt werden.⁷

Moderne Systeme bestehen nicht aus einem, sondern aus mehreren Transmittern und Empfängern im Layout der Antenne. Über Triangulation der verschiedenen Signale kann somit eine Winkelbestimmung durchgeführt und die grobe Richtung der Annäherung berechnet werden. Zudem wird nicht auf einer konstanten Frequenz, sondern über ein Frequenzspektrum zeitlich gespreiztes Signal (Chirp) gesendet. Je größer der Chirp, desto besser die mögliche Abstandsauflösung. Für industrielle Ultra-Short-Range Systeme können, je nach Auslegung der Antenne, Auflösungen von wenigen Millimetern erreicht werden, die das System tauglich für Anwendungen in der MRK machen (Pauli & Götzel et al. 2017).

Neben der Signalmodulation ist die Antenne das leistungsbestimmende Element in der RADAR-Sensorik hinsichtlich Blickfeld und Detektionsvermögen. Das Design und die Auslegung von on-Chip Radiofrequenzantennen ist aber ein hochkomplexer Prozess, der stets an die konkrete Anwendung angepasst werden muss. Hintergrund ist u.a. die starke Eigenerwärmung der Leiterplatte aufgrund der hohen Sendeleistung und dem damit einhergehenden Verzug der Transmitter und Transceiver zueinander⁸.

2.3.3.1 Ansätze und Anwendungen in der MRK

In einem Beitrag der *ABB Corporate Research* haben (Zlatanski & Sommer et al. 2018) ein RADAR-System entwickelt, welches an der Basis eines Roboters angebracht wird und einen in den Arbeitsraum eindringenden Menschen in bis zu 12m Abstand erfassen kann. Die erreichbaren Genauigkeiten waren mit 5,5cm lateral sehr gut. Dennoch ist dieser erste Ansatz für die MRK gemäß den Autoren mehr als Ergänzung bzw. Substitution für 2D-Laserscanner zu betrachten. Ziel war der sicherheitsüberwachte Halt des Roboters, keine Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung.

In einer Arbeit von (Stetco & Ubezio et al. 2020) wurde ein frequenzmodulierter RADAR-Chip entworfen und untersucht. Der Einzelsensor wurde am TCP eines *UR10* MRK-Roboters angebracht und konnte den Abstand zu einem menschlichen Körper

⁷ <https://www.ti.com/lit/wp/spyy006/spyy006.pdf?ts=1701581780433> [08.04.2021]

⁸ <https://www.ti.com/lit/an/swra672/swra672.pdf> [08.04.2021]

und dessen Annäherungsgeschwindigkeit sehr erfolgreich erfassen. Die Detektionsreichweite lag im besten Fall zwischen 1m und 1,20m. Darüber hinaus wurde ein Sensormodell entworfen, welches den entwickelten Sensor in einer Simulation abbilden kann.

In (Geiger & Waldschmidt 2019) wurde ebenfalls ein kurzwelliger RADAR-Chip mit einer bandartigen Antenne entworfen und ein Ansatz für den Einsatz an Roboterarmen erprobt. Der Sensor konnte erfolgreich ein statisches Objekt in 1m Entfernung erkennen. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Anwendungen sind in Zukunft geplant. Als nachteilig wird hervorgehoben, dass das Messverfahren unterhalb von 30cm blind ist. Eine Kollisionsvermeidung oder Integration in Greifer wird nicht postuliert.

2.3.4 LiDAR-Systeme

LiDAR-Systeme (Light Detection And Ranging) basieren auf der Laufzeitmessung und sind der Kategorie der optoelektronischen Schutzeinrichtungen zuzuordnen (DIN EN ISO13855). Ausgehend von einer Quelle werden Lichtwellen ausgesendet und die Zeit bis zum Wiedereintritt der reflektierten Welle auf einem Sensor wird gemessen. Bei Lichtwellen-basierten Verfahren werden mehrere grundsätzliche Systeme unterschieden.

2.3.4.1 Laserscanner

Beim Laserscanning wird die Umgebung sequenziell mit einem Laserstrahl gerastert, indem der gebündelte Photonenstrahl z.B. über Spiegel den Abstand je Orientierung zur Strahlquelle misst (Abbildung 11). Häufig werden gepulste Laserdioden im infraroten Wellenlängenbereich (905nm) verwendet, es gibt aber auch kurzwelligere Alternativen im blauen oder grünen Spektralbereich. (Siciliano & Khatib 2016)

Die Detektionsreichweite von Laserscannern ist mit bis zu 100m sehr gut. Nahfeldsysteme wie der *SICK nanoScan*⁹ erreichen im Bereich von 3m bis 10m eine sehr gute Abstandsgenauigkeit von bis zu 2cm und Winkelauflösung von 0.17°. Da jede Messung je Orientierungsschritt einzeln und nacheinander durchgeführt werden muss, sind Scanner-Systeme jedoch sehr langsam. Im Verhältnis zu einem Greifer sind Laserscanner recht groß, auch wenn in den letzten Jahren z.B. durch die *Firma Velodyne LiDAR* deutlich kleinere Systeme auf den Markt gebracht wurden.

⁹ https://cdn.sick.com/media/pdf/0/80/980/dataSheet_NANS3-CAAZ30AN1_1100334_de.pdf [09.06.2020]

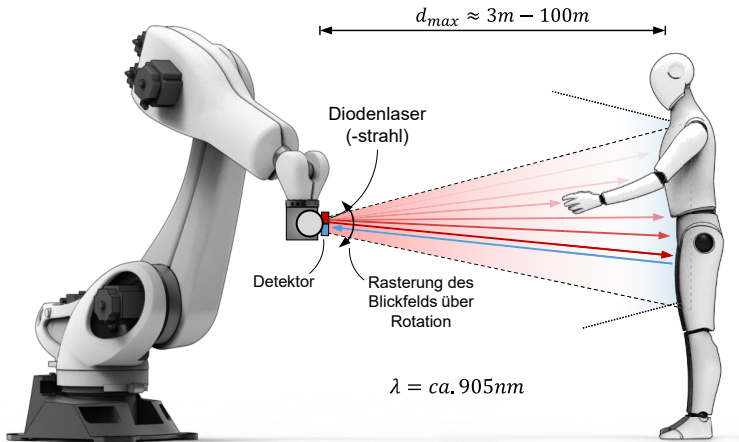


Abbildung 11: Prinzip des Laserscanners in einer MRK-Anwendung

Ansätze und Anwendungen in der MRK

In der MRK werden Laserscanner typischerweise in der Betriebsart „Sicherheitsüberwacher Halt“ eingesetzt und als bodennahe 2D-Systeme verwendet. Sie lösen den Sicherheitshalt des Roboters aus, wenn ein Mensch den Arbeitsraum betritt. Ein Einsatz von Laserscannern zur Kollisionsvermeidung in End-Effektoren ist bisher nicht bekannt.

2.3.4.2 Laufzeitsensoren und -Kameras

Laufzeitsensoren und -kameras (abgekürzt ToF, Time of Flight) senden ebenfalls Lichtwellen aus und messen die Zeit bis zum Empfang der Reflektion. Der Unterschied zu Laserscannern ist, dass ToF-Sensoren die Photonen nicht gebündelt, sondern gestreut in einem Licht-Puls in den Raum emittieren. In Abbildung 12 ist dargestellt, wie eine Laserdiode (VCSEL) einen Lichtpuls aus Photonen sendet (blau). Die Laufzeit der reflektierten Photonen bis zum Wiedereintritt in eine Photodiode (SPAD) wird gemessen und in eine Distanz umgerechnet.

Ähnlich dem Radar werden von reflektierten Photonen nicht nur die Laufzeiten in Nanosekunden, sondern auch der Einfallswinkel des reflektierten Photons detektiert. Die Separation unterschiedlicher Photonen erfolgt über eine Pulsweitenmodulation beim Emittieren. Ergebnis der Messung ist ein Tiefenbild mit Abstandsinformationen je Pixel

des lateral diskretisierten Sichtfelds. Es werden Kameras und Einzelsensoren unterschieden: erstere besitzen eine zusätzliche Optik, letztere besitzen nur Emittter und Photodetektor ohne Linsen. (Hansard & Lee et al. 2012)

ToF-Sensoren bzw. Kameras erreichen eine Detektionsreichweite von bis zu 10m und eine Auflösung von wenigen Zentimetern in Abhängigkeit der Signalstärke. Aufgrund des direkten Messprinzips müssen die Messdaten nicht mit aufwändig trainierten Vision-Algorithmen verarbeitet werden wie z.B. bei Stereo-Kameras. Stattdessen können alle Abstandsinformationen der Umgebung direkt verarbeitet werden.

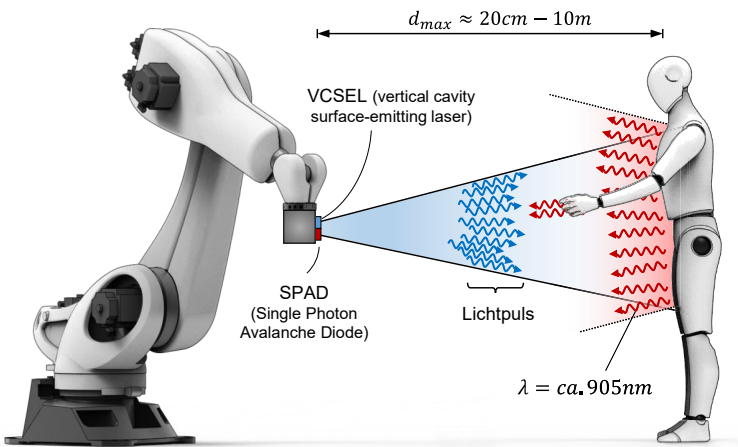


Abbildung 12: Prinzip des Time-of-Flight-Sensors in einer MRK-Anwendung

Der benötigte Bauraum hängt stark vom verwendeten System ab. Einzelsensoren sind sehr klein und können auf Leiterplatten eingesetzt werden. Performantere Systeme, speziell Kameras mit Optik, benötigen mehr Bauraum und teilweise zusätzliche Kühlgehäuse für die Prozessoren (Hansard & Lee et al. 2012).

Ansätze und Anwendungen in der MRK

ToF-Kameras werden bereits seit mehreren Jahren erfolgreich zur Lokalisierung, Kartografie und Navigation mobiler Roboter eingesetzt (Haun 2013). Im Zuge der Mensch-Roboter-Interaktion sind auch bereits Untersuchungen zur Gestensteuerung oder Objekterkennung vorgenommen worden. Die wenigen, bekannten Ansätze ToF-Sensoren

auf dem Roboter oder im Greifer direkt zur Kollisionsvermeidung zu integrieren, werden folgend zusammengefasst.

In Arbeiten von (Kumar & Savur et al. 2018) und (Kumar & Arora et al. 2019) wurden IR-ToF-Sensoren in Ringen zu jeweils 8-Einzelsensoren an den Armen eines UR10 MRK-Roboters angeordnet, um dessen nahe Umgebung zu überwachen. Wenn eine Annäherung detektiert wird, verringert der Roboter die Geschwindigkeit. Es konnte gezeigt werden, dass Annäherungen detektiert werden und das Konzept grundsätzlich funktioniert. In einer weiteren Arbeit (Kumar & Sahin 2019) wurde gezeigt, dass die Sicherheit mit mehr Sensoren gesteigert werden kann, ohne den kompletten Arbeitsbereich permanent zu überwachen. Hierfür wurden die Ringe mit 16 Einzelsensoren ausgestattet und die Messwerte kombiniert. Zu erwähnen ist, dass hierbei bereits eine Quantisierung der Messkegel mittels Octrees vorgenommen worden ist. Eine Interpretation der Messwerte über mögliche Gefahren wurde nicht verfolgt.

In (Adamides & Modur et al. 2019) wurden weitere Untersuchungen mit einem MRK-Roboter durchgeführt, die die Messgenauigkeit von ToF-Sensoren auch unter Rotation (in der Literatur bekannt als Bewegungsunschärfe, engl. Motion Blur) charakterisieren und deren gute Ergebnisse bestätigen.

In (Himmelsbach & Wendt et al. 2019) und (Himmelsbach & Wendt 2020) wird eine Lösung vorgestellt, in welcher ToF-Sensoren der Firma *Terabee SAS* an einem *KUKA iiwa* MRK-Roboter platziert wurden, um den Abstand zwischen Endeffektor und Umgebungsobjekten zu überwachen. Die Sensoren sind fähig bis zu 3m Abstand zu messen, werden aber in den Versuchen nur an statischen weißen, flächigen Objekten im Abstand von maximal 600mm validiert. Eine Interpretation der Messergebnisse zur Gefahrenabschätzung und eine Kollisionsvermeidung sind in diesem Ansatz nicht beschrieben.

2.3.5 Ultraschall-Systeme (SODAR)

SODAR-Systeme (Sonic Detection And Ranging), häufiger bekannter als Ultraschallsensoren, messen die Laufzeit einer akustischen Welle im Ultraschallbereich ausgehend von einer Sonotrode als Sender bis zum Eintreffen der reflektierten Welle an einem Mikrofon (siehe Abbildung 13). Damit unterscheidet sich das Verfahren maßgeblich zu RADAR und LiDAR, weil keine elektromagnetischen sondern longitudinale Schallwellen in der Luft genutzt werden, welche sich deutlich langsamer als Lichtwellen ausbreiten.

Die erreichbaren Messfrequenzen sind mit maximal 20Hz niedriger als bei elektromagnetischen Verfahren. Darüber hinaus können Sensoren oft nicht im Dauerbetrieb arbeiten, da eine Abklingrate der Schallwellen in der Umgebung berücksichtigt werden muss. Ebenso wird der gleichzeitige Einsatz mehrerer Sensoren erschwert, da es zu sogenanntem Cross-Talk, der gegenseitigen Beeinflussung von Signalen, kommen kann. Die Möglichkeit dies durch Wellenmodulation zu vermeiden, wie es z.B. bei LiDAR-Verfahren gemacht wird, besteht nur in sehr begrenztem Rahmen. Vorteilhaft ist, dass auch transparente Materialien wie z.B. Glas detektiert werden können, da die Reflektion nicht maßgeblich von den optischen Reflexionseigenschaften abhängt. Die erreichbaren Detektionsreichweiten reichen bis zu 2m und sind für eine Anwendung in der MRK geeignet.

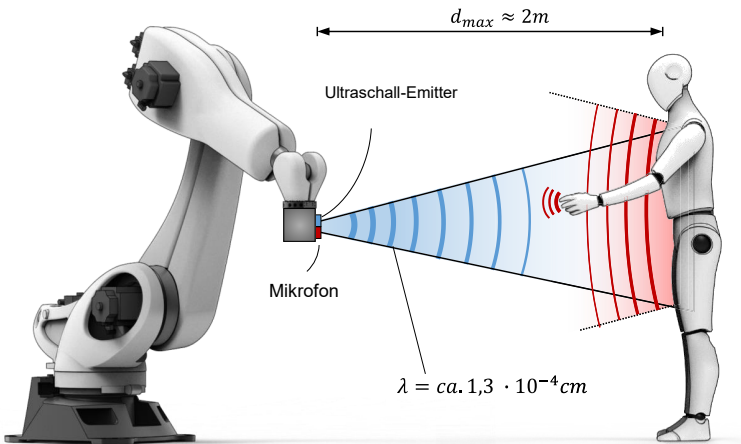


Abbildung 13: Prinzip von Ultraschallsensoren in einer MRK-Anwendung

2.3.5.1 Ansätze und Anwendungen in der MRK

Ultraschallsensoren in der MRK wurden unter anderem in einer Arbeit von (Ostermann 2014) untersucht, in welcher sie kreisförmig am Endeffektor eines Roboters angebracht wurden, um die Annäherung eines Menschen zu erfassen. In dieser Arbeit konnte bereits nachgewiesen werden, dass eine Detektion sehr gut möglich ist. Die weitere Nutzung der Sensorwerte für eine Kollisionsvermeidung durch Ausweichen wurde nicht untersucht.

(Tong & Hu et al. 2021) haben für den Anwendungsfall MRK eine Sensorhaut für Roboter entwickelt, welche in bis zu 300mm Abstand eine menschliche Hand detektieren können. In einer Arbeit von (Anand & Rahul et al. 2017) wurde ein Ultraschall-Sensor in ein Roboter-Steuerungsframework eingebunden. Es wurde ein Konzept des mitbewegten, virtuellen Zauns vorgeschlagen, bei dem die Robotergeschwindigkeit auf 100 mm/s reduziert wird, wenn der Mensch sich näher als 80cm von einer Grundplatte entfernt befindet. Eine Validierung des Konzepts wurde zunächst nur in einer Simulation vorgenommen.

2.3.6 Sonstige Verfahren zur Umgebungserfassung

Es gibt technisch noch viele weitere Möglichkeiten sich annähernde Objekte in der Umgebung eines Endeffektors zu erfassen, die meisten leiden jedoch unter spezifischen Schwächen, welche sie für die Anwendung in der MRK ausschließen. Sie sollen deshalb an dieser Stelle, zur Vollständigkeit, nur sehr kurz erläutert und ausgeschlossen werden:

Optische Verfahren (Vision-, Wärmebild- und Terahertz-Kameras)

Vision- (Bildverarbeitung im sichtbaren Wellenlängenbereich), Infrarot-Wärmebild- und Terahertz-Kameras, leiden unter hohen Latenzzeiten aufgrund der komplexen Algorithmen zur Objekterkennung. Darüber hinaus stehen eine hohe Anfälligkeit gegenüber Umgebungseinflüssen und der hohe Kalibrieraufwand dem Einsatz solcher Technologien als Echtzeit-Sicherheitssystem entgegen.

Transponderbasierte Verfahren

Bei transponderbasierten Verfahren werden alle Objekte, inkl. Menschen, z.B. mit Bluetooth-Sendern ausgestattet, um deren Position im Raum zu bestimmen und den euklidischen Abstand zu berechnen. Einen guten Überblick über verfügbare Technologien sowie deren Vor- und Nachteile ist in (Syberfeldt & Mikel et al. 2016) gegeben. Aus Gesichtspunkten der Sicherheit sind die Ungenauigkeiten bei der Messung noch zu groß. Einerseits müssten an allen menschlichen Extremitäten Sender in der Schutzkleidung getragen werden, die sehr verlässlich gekoppelt und ausfallsicher sind. Andererseits ist das Verletzungsrisiko sehr hoch, wenn ein Transponder ausfällt oder nicht die passende Schutzausrüstung verwendet wird. Darüber hinaus können schnelle Bewegungen aufgrund hoher Latenzzeiten nicht rechtzeitig erfasst werden.

Biochemische Sensoren

Biochemische Sensoren können die Anwesenheit eines Menschen über dessen chemische Signatur (z.B. Schweißgeruch bzw. durch Bakterien verursachte Buttersäure-Ester) bei ausreichender Nähe gut erfassen. Jedoch sind die Messzeiten dieser Verfahren mit z.T. mehreren Minuten deutlich zu lang für Sicherheitsanwendungen und der Abstand kann nicht sicher abgeschätzt werden.

2.4 Zusammenfassung und Forschungsdefizit

Der vorliegende Stand der Forschung und Technik gibt einen Überblick über die bestehenden Ansätze zur Kollisionsvermeidung in der MRK mit Fokus auf Endeffektoren bzw. Greifern. Ausgehend von den Grundlagen und Definitionen der Mensch-Roboter-Kollaboration in Abschnitt 2.1 wurden im vorangegangenen Kapitel die bekannten technischen Konzepte zur Umsetzung einer Kollisionsvermeidung gegliedert nach Sensorprinzip vorgestellt.

Bewertet wurden die Merkmale bzw. Eigenschaften der vorgestellten Konzepte bezogen auf die Teilaspekte aus der Motivation dieser Arbeit. Je voller der Kreis, desto mehr Merkmale erfüllt die Arbeit bezgl. folgender Aspekte:

- a) Die Anforderungen des Anwendungsfalls ‚Handhabung‘ und die konzeptionelle Möglichkeit der Integration in einen Greifer
- b) Eine Detektionsreichweite, die große Industrieroboter für die MRK befähigt
- c) Die Unterscheidung, ob es sich bei dem erfassten Objekt um eine Gefahr, z.B. einen Mitarbeiter, oder die normale Umgebung in der Roboterzelle handelt
- d) Die Befähigung des Endeffektors bzw. Greifers aktiv eine Kollision zu vermeiden, indem der Roboter Signale vom Greifer für eine Ausweichbewegung erhält.

Die nachfolgende Tabelle 1 fasst die wichtigsten Arbeiten in einem Harvey-Ball-Ideogramm zusammen und gibt einen Vergleich hinsichtlich der technischen Konzepte.

Im Wesentlichen konzentrieren sich die bekannten Ansätze auf die Entwicklung bzw. Reifmachung von Einzelsensoren. Konkrete Konzepte, die auch den Prozess der Handhabung mit Greifern betrachten, bleiben die Ausnahme. Weiterhin basieren viele der Konzepte vorwiegend auf der Verwendung von Leichtbau-Robotern. Die Befähigung

gung von Industrierobotern steht nur bei einem kleinen Teil der Ansätze im Fokus. Insbesondere die Kombination aus Konzepten für MRK-Greifer an Industrierobotern ist bisher nicht ausreichend untersucht.

Tabelle 1: Übersicht der relevantesten Arbeiten

	a) Anwendungsfall Handhabung	b) Detektionsreichweite für Industrieroboter?	c) Unterscheidung zw. Mensch und Umgebung	d) Kollisionsvermeidung im Greifer?
Heiligensetzer & Steininger 2011				
Koepe & Engelhardt et al. 2005				
Schunk GmbH & Co. KG 2018				
Frangen & Rueb et al. 2011				
Zlatanski & Sommer et al. 2018				
Stetco & Ubezio et al. 2020				
Geiger & Waldschmidt 2019				
Kumar & Savur et al. 2018				
Kumar & Arora et al. 2019				
Kumar & Sahin 2019				
Adamides & Modur et al. 2019				
Himmelsbach & Wendt et al. 2019				
Himmelsbach & Wendt 2020				
Ostermann 2014				
Tong & Hu et al. 2021				
Anand & Rahul et al.				

Keine der bekannten Ansätze beschäftigt sich zudem mit der Unterscheidung zwischen Mensch und Umgebung sowie der daraus folgenden Gefahrenbeurteilung. Es existieren lediglich Ansätze bzgl. der Modellierung der Sensorinformationen zu einer Karte,

wie sie z.B. von (Ostermann 2014) oder (Kumar & Sahin 2019) postuliert wurden. Jedoch wird das Sensormodell bzw. die Rasterung der Sensordaten nicht verwendet, um eine Gefahrenabschätzung vorzunehmen, sondern um eine Simulation mit Daten anzureichern. Die Bewertung einer Gefahrensituation im Sinne der Unterscheidung zwischen Mensch und Umgebung findet in keiner der gefundenen Arbeiten statt. Diese Funktionalität ist im Kontext von MRK-Greifern nicht ausreichend untersucht. Ein Ziel dieser Arbeit muss daher sein, dieses Defizit zu schließen.

Eine aufgrund der Messdaten integrierte Ausweichbewegung wurde in keiner der Arbeiten vorgenommen. Es wurden jedoch Sicherheitszonen bezogen auf die Mindestabstände definiert und in vielen Fällen wird ein sicherheitsüberwachter Halt als einfaches I/O-Signal vom Greifer gesendet. In fortschrittlicheren Ansätzen wie z.B. (Stetco & Ubezio et al. 2020) wird vom Sensor bereits ein Geschwindigkeitssignal je Abstand ausgegeben.

Jedoch sind keine Ansätze bekannt, in welchen ein Greifer aktiv die Steuerung der Roboterkinematik zur Kollisionsvermeidung übernimmt und ein Hindernis umfährt. Dennoch muss erwähnt werden, dass die Kollisionsvermeidung in Form einer Online-Pfadplanung bereits in sehr vielen Veröffentlichungen in der Robotik-Literatur postuliert wurde. Das Defizit besteht an dieser Stelle in einem Konzept zur Teilung der Verantwortung in einem verteilten Steuerungssystem mit intelligenten Komponenten wie dem Greifer. Folglich sollte ebenfalls untersucht werden, wie der Greifer seine erfassten Daten interpretieren und in die Kollisionsvermeidung mit dem Roboter einbringen kann.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits deutlich, dass die unmittelbare Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter unter strengen sicherheitstechnischen Restriktionen erhebliche Vorteile bietet. Um größere und leistungsfähigere Roboter zur MRK zu befähigen, ist nach der passiven Kraft- bzw. Implusbegrenzung bei einem Zusammenstoß die nächste zielführende Maßnahme die aktive Vermeidung von Kollisionen zwischen Mensch und Robotersystem.

3.1 Zielsetzung

Als Werkzeug ist der Endeffektor häufig der physisch nächstgelegene, schnellste und damit gefährlichste Bereich des Robotersystems. Ihm kommt demnach eine besondere Rolle in der Gefährdungsbeurteilung der Roboteranwendung zu. Diese Arbeit widmet sich daher der Kollisionsvermeidung zwischen Mitarbeitern und dem Endeffektor in der MRK am Beispiel von Greifern. Die Zielsetzung dieser Dissertation ist ein Konzept aus Sensorik und Berechnungsmethoden, das die Funktionalität des Greifers erweitert und zudem große Industrieroboter zur MRK befähigt. In den folgenden Abschnitten wird diese Zielsetzung weiter präzisiert und Anforderungen sowie Annahmen spezifiziert. Im Anschluss wird das Vorgehen zum Erreichen der Zielstellung erläutert.

Das System in einer MRK-Anwendung muss zu jedem Zeitpunkt die gestellten Sicherheitsfunktionalitäten aus der Risikobeurteilung einhalten. Hinzu kommt die Akzeptanz des Mitarbeiters mit dem neuen „Kollege Roboter“ zusammen zu arbeiten, welche sich auch auf die Mitarbeitermotivation auswirkt. Die sicherheitskritische Randbedingung für die zu untersuchende Anwendung „Handhabungsvorgang“ ist die Vermeidung von Kollisionen zwischen Mensch und Maschinensystem. Im Kontext dieser Arbeit bedeutet dies, dass zu jedem Prozesszeitpunkt *ein Mindestsicherheitsabstand zwischen Greifer und Mensch eingehalten werden muss*.

Eine Berechnung, ob der Abstand zwischen Greifer und Mensch tatsächlich der Kürzeste ist, wird in dieser Arbeit nicht verfolgt. Hierfür wird auf entsprechende Literatur, z.B. von (Glogowski & Böhmer et al. 2021) oder (Lemmerz & Kuhlenkötter 2022) verwiesen.

Wie oben beschrieben, fokussiert sich diese Arbeit auf das Teilsystem Endeffektor und dessen Eigenschaften, um den Menschen vor Stoß- und Quetschverletzungen zu

schützen. Das Konzept wird für einen der am häufigsten eingesetzten Typen von Endeffektoren in der MRK ausgelegt, den Greifer. Da es sich um eine Sicherheitsanwendung handelt, müssen zunächst die relevanten Risikofälle definiert werden, die das System berücksichtigt. Die in dieser Arbeit betrachteten Risikofälle in der MRK mit Robotern großer Reichweite und Traglasten werden in Anlehnung an die (DIN ISO/TS15066) folgendermaßen definiert:

3.1.1 Risikofall A: Zusammenstoß

Der Roboter bewegt den Greifer frei auf einem vorprogrammierten Pfad im geteilten Arbeitsraum mit dem Mensch. Der Mensch befindet sich mit dem Körper auf der Trajektorie oder bewegt sich in die in Richtung der Trajektorie des Greifers. Ohne Reaktion des Robotersystems würde ein *Zusammenstoß* mit dem Greifer oder dessen Werkstück evtl. mit Verletzungsfolge entstehen. Diese Kollision gilt es zu vermeiden.

Das Inertialsystem für den betrachteten Fall ist die Position von Mensch und Greifer im Raum über die Zeit. Da die Anzahl möglicher Bewegungen unendlich groß ist, wird die Gefahr eines Zusammenstoßes im freien Raum nach (DIN10218-1) exemplarisch als Risikofall A definiert. Abbildung 14 zeigt die Szene vereinfacht.

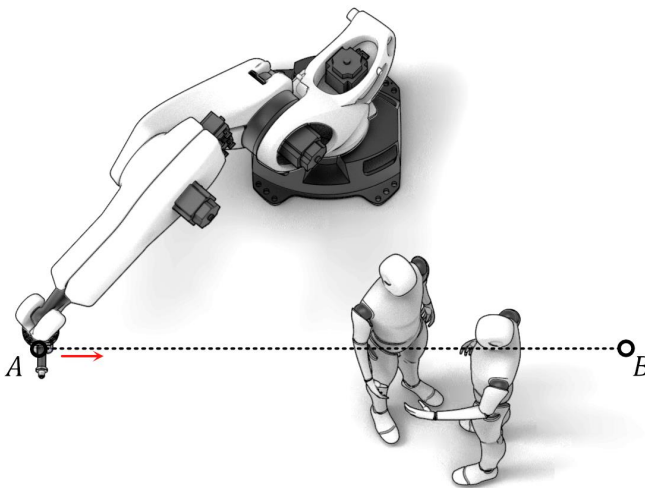


Abbildung 14: Risikofall A – Freie Kollision mit stehenden Mitarbeitern

Risikofall A: Zwei Menschen und ein Industrieroboter befinden sich im gemeinsamen Arbeitsraum in der Umgebung U . Der Greifer inkl. Werkstück wird als Teil eines Verkettungsprozess entlang der Trajektorie bewegt. Als Trajektorie dient beispielhaft eine einfache lineare Bewegung vom Punkt A zum Punkt B. Die Körper der Menschen befinden sich permanent oder temporär auf der Trajektorie.

Ohne das Erkennen des Menschen als Hindernis würde das Robotersystem am Endeffektor ungebremst mit der Geschwindigkeit v_R mit dem Mensch zusammenstoßen. Im schlimmsten Fall wird der Mitarbeiter bei diesem Betriebsunfall verletzt. Aber auch ohne Verletzung würden das Vertrauen und die Akzeptanz des Mitarbeiters in die MRK geschwächt.

Aufgrund des Masse- und Kraftunterschieds würde das System den Mitarbeiter nach dem Zusammenstoß weiterhin wegdrücken, bis der Zielpunkt erreicht ist. Befindet sich zwischen Zielpunkt und Umgebung nicht ausreichend Platz für den Menschen, wird dieser eingequetscht. Dieses Risiko wird im zweiten Fall betrachtet.

3.1.2 Risikofall B: Quetschung

Industrieroboter können sehr hohe quasistatische Kräfte aufbringen. Der zweite Risikofall ist demzufolge die Quetschung von Körperteilen mit dem bewegten System. Als trauriges Beispiel dient ein Unfall aus dem Jahr 2015, bei dem ein Mensch getötet wurde. Ein Industrieroboter hat den Brustkorb des Mitarbeiters an einer Metallvorrichtung zerquetscht¹⁰. Die in Abbildung 15 dargestellte Anordnung wird daher stellvertretend für diese Fälle definiert.

Der Roboter führt einen Handhabungsvorgang aus und soll ein entnommenes Werkstück in einen Ladungsträger einlegen. Hierfür muss die Trajektorie Γ von Punkt A über B bis C abgefahren werden. Die Abschnitte sind im Beispiel lineare Bewegungen. Der Mensch befindet sich auf der Trajektorie und bemerkt den Roboter nicht, z.B. weil er gerade ein Werkstück zur Prüfung entnehmen will.

Ohne das Erfassen des Menschen würde der Mensch zwischen Greifer und Magazin eingeklemmt und gequetscht. Bei großen Robotern ist eine Prellung wahrscheinlich.

¹⁰ <https://www.hna.de/lokales/kreis-kassel/baunatal-ort312516/roboter-toetet-arbeiter-vw-werk-5191637.html>
[01.07.2020]

Wird ein scharfkantiges Werkstück transportiert, steigt das Risiko von Schnittverletzungen.

In die Gelenke integrierte Kraft-Momenten-Sensoren können dies unterbinden, sie vermeiden jedoch nicht den initialen Kontakt. Wird ein Mitarbeiter mehrmals am Tag auch nur leicht eingequetscht, ist eine Verringerung der Akzeptanz zu erwarten. Mit einer Umfelsesensorik kann die Anwesenheit des Körpers erfasst werden und der Roboter kann rechtzeitig geeignete Maßnahmen einleiten.

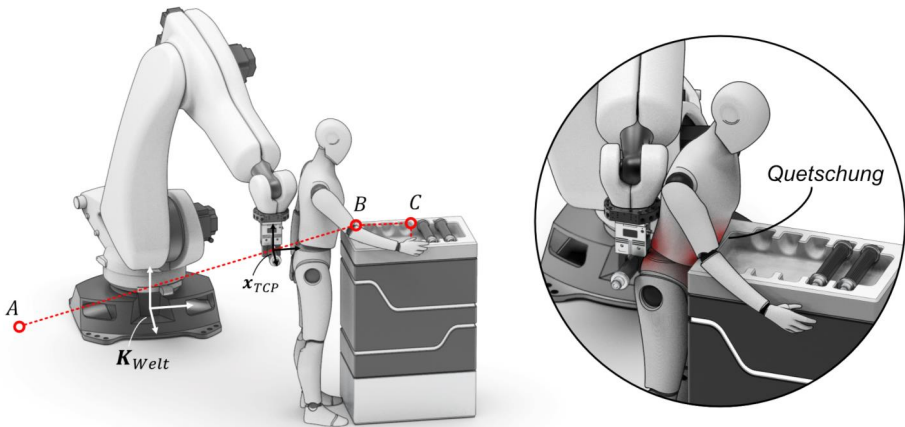


Abbildung 15: Szenario Risikofall B – Quetschung des Mitarbeiters

Notwendige Gefahrenabschätzung für Greifer

Zunächst erscheint es widersprüchlich die Quetschung als weiteren Fall zu betrachten: Unterschreitet ein Hindernis den Mindestabstand muss der Roboter stoppen, egal ob Risikofall A oder B. Für den Greifer ergibt sich aber eine besondere Problemstellung: Zum Greifzeitpunkt muss immer Kontakt mit der Umwelt hergestellt werden! Das System kann nicht aufgrund einer Abstandsmessung, die den Mindestabstand unterschreitet, kurz vor der Aufnahme des Werkstücks einfach stehenbleiben.

Wird die Umfelderfassung ausschließlich auf Anwesenheit eines Objekts ausgelegt, würde das System aufgrund der Nähe der Umgebung fälschlicherweise stoppen und nie zum Werkstück kommen. Das Szenario erfordert daher nicht nur die sichere Detektion der Anwesenheit eines Objekts, sondern auch die Unterscheidung, ob es sich um eine *Gefahrensituation* oder eine *bekannte, sichere Situation* handelt.

3.1.3 Resultierende Fragestellungen

Zusammengefasst ergeben sich folgende Herausforderungen und damit Fragestellungen für den Prozess der kollisionsfreien Handhabung im MRK Betrieb:

1. *Erfassen der Umgebung*

Wie kann die relative Annäherung einer Person aus der Umgebung an den sich bewegenden Greifer prozesssicher, in ausreichendem Abstand und schnell genug erfasst werden, sodass eine Kollision vermieden werden kann?

2. *Gefahrenabschätzung*

Mit welcher Methode kann rechnerisch abgeschätzt werden, ob eine sichere Situation oder eine Gefahrensituation vorliegt?

3. *Kollisionsvermeidung*

Mit welcher vom Greifer ausgelösten Reaktion kann eine Kollision sicher vermieden werden und zugleich der Prozess fortgesetzt werden?

3.2 Vorgehensweise nach V-Modell

Ausgehend von der Zielsetzung und den beschriebenen Fragestellungen ist leicht ersichtlich, dass nur ein System mit mechanischen, elektrotechnischen und informationstechnischen Anteilen die gewünschten Anforderungen erfüllen kann. Das Vorgehen dieser Dissertation orientiert sich daher neben wissenschaftlichen Grundsätzen an der VDI Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für cyber-physische Systeme“ (VDI2206). Kern der Methodik ist das in Abbildung 16 dargestellte V-Modell, welches für die Problemstrukturierung bis zur abschließenden Systemintegration eingesetzt wird.

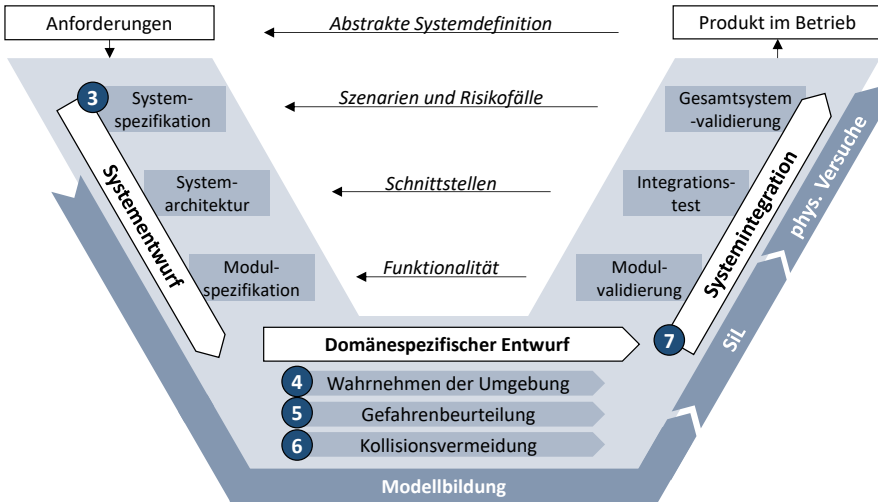


Abbildung 16: V-Modell als Vorgehensstruktur zur Lösungsfindung

Ausgehend von den Anforderungen aus der Zieldefinition und der Systemspezifikation in diesem Kapitel werden die drei identifizierten Fragestellungen und deren funktionale Teilsysteme in den folgenden Kapiteln vier bis sechs konkretisiert und die jeweiligen Lösungsansätze umgesetzt. Abschließend folgt ab Kapitel sieben die schrittweise Systemintegration der Teilsysteme zum Gesamtsystem und die Validierung als Funktionsnachweis.

3.2.1 Vorgehensweise - Wahrnehmen der Umgebung

In Kapitel 4 wird das Teilsystem mit der Fragestellung zum „Wahrnehmen der Umgebung“ (Perception) behandelt. Im ersten Schritt werden die Spezifikationen an ein Sensorsystem zum Erfassen der Umgebung hinsichtlich der Sicherheit in der späteren Anwendung weiter detailliert. Klassisch werden im Folgenden in der Ideengenerierung möglichst viele Lösungsoptionen basierend auf physikalischen Messprinzipien analysiert und entworfen. Die Analyse erfolgt zweistufig: Da es ein unverhältnismäßiger Zeitaufwand wäre, alle denkbaren Sensoren zu testen, wird im ersten Schritt eine literaturbasierte Bewertung vorgenommen. Diese wird mit Erkenntnissen aus Vorversuchen kombiniert.

Das anschließend ausgewählte Sensorsystem wird mechanisch für die Integration in Greifern angepasst. Die Auskonstruktion der Lösungsidee mündet in ein modulares System, welches in Greifer integriert werden kann.

Für die zu entwerfenden mathematischen Modelle muss eine Charakterisierung der Einflussparameter der Sensorik und der Umwelteinflüsse durchgeführt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Berechnungsverfahren ein, welche die weiteren Fragestellungen beantworten. Für die virtuelle Entwicklung individueller Greifer können diese Ergebnisse in einer Simulation genutzt werden.

3.2.2 Vorgehensweise - Gefahrenabschätzung

In Kapitel 5 werden die aus der Umgebungserfassung gewonnenen Daten in einer „*Gefahrenabschätzung*“ verarbeitet und evaluiert. Konkret wird eine mathematische Methode entwickelt, welche abschätzt, ob eine sichere oder eine gefährdende Situation vorliegt.

Während des Erfassens der Umgebung wird die physische Realität stets auch verfälscht, da Messungen immer fehlerbehaftet sind. Für einen sicheren Betrieb der Roboterzelle ist es daher notwendig, das Vertrauen in die Messung zu kennen. Aus diesem Grund wird eine Methode entwickelt, welche auf Grundlage der Wahrscheinlichkeitstheorie die Abweichung der aktuell vorliegenden Situation zu einer sicheren Referenz bewertet.

Die Hauptbestandteile des Kapitels sind demnach die Herleitung der probabilistischen Berechnungsmethode für den gegebenen Anwendungsfall und die notwendigen Modellierungen. Die entwickelten Berechnungsvorschriften werden anschließend über eine Simulation abgesichert und bewertet. Die physische Validierung erfolgt anschließend in den Versuchen mit dem Gesamtsystem. Ergebnis von Kapitel fünf ist die rechnerische Abschätzung, ob eine gefährliche Situation vorliegt und eine Reaktion des Greifers eingeleitet werden muss oder nicht.

3.2.3 Vorgehensweise - Kollisionsvermeidung

In Kapitel 6 werden Methoden für den Greifer entwickelt, welche die Kollision zwischen dem Robotersystem und einem Mitarbeiter vermeiden. Dies betrifft insgesamt drei Stufen der Vermeidung.

In der ersten Stufe muss ein schnelles Vorgehen gefunden werden, wie der Greifer auf Basis der Datengrundlage der Umgebungserfassung aus Kapitel 4 einen Sicherheitsstopp auslösen kann. Dieser triviale Fall kann als Notbremsung betrachtet werden, sollte ein Mitarbeiter unausweichlich auf Kollisionskurs sein. Dennoch sind die notwendigen Abschätzungen und Modelle innerhalb der Methode wichtig, da sie die Grundlage für die weiteren Stufen darstellen.

Die zweite Stufe betrachtet die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung. Hierbei werden Geschwindigkeitsprofile für die Zusammenarbeit mit dem Roboter abgeleitet und implementiert. Auch diese müssen wieder im Kontext der zur Verfügung stehenden Daten von sowohl Sensorik als auch Robotersteuerung betrachtet werden.

Die dritte und anspruchsvollste Stufe ist die aktive Hindernisumfahrung, bei welcher der Greifer die Roboterkinematik um ein Gefahrenobjekt herum steuert bzw. zurückweicht. Im Kern muss eine Berechnungsmethode entwickelt werden, welche mit der zu definierenden Sensorik und dem Robotersystem eine solche Pfadgenerierung zur Laufzeit ermöglicht.

Ergebnis von Kapitel 6 ist eine Methode für die Greifersteuerung, welche je nach Situation in der Roboterzelle entweder einen Sicherheitshalt auslöst, die Geschwindigkeit reduziert und bzw. oder die Kontrolle über den Roboter übernimmt und ausweicht.

3.3 Systemspezifikation

Im Folgenden werden das betrachtete System und die Grenzen der Betrachtung definiert. Anschließend wird genauer auf das relevante Teilsystem Greifer eingegangen und aus dessen Funktionalität auf einzelne Module aufgeteilt.

3.3.1 Systemgrenze und allgemeiner Systemaufbau

Die zu entwickelnden Methoden zur Vermeidung von Kollisionen zwischen Greifer und anderen Objekten, insbesondere dem Menschen, betreffen für Handhabungsvorgänge das gesamte, am Prozess beteiligte Robotersystem. Folgerichtig kann nicht nur der Greifer selbst betrachtet werden, sondern es muss auch das umliegende Inertialsystem einbezogen werden. Folgende Elemente sind in Abbildung 17 dargestellt und werden in dieser Arbeit betrachtet sowie sprachlich unterschieden:

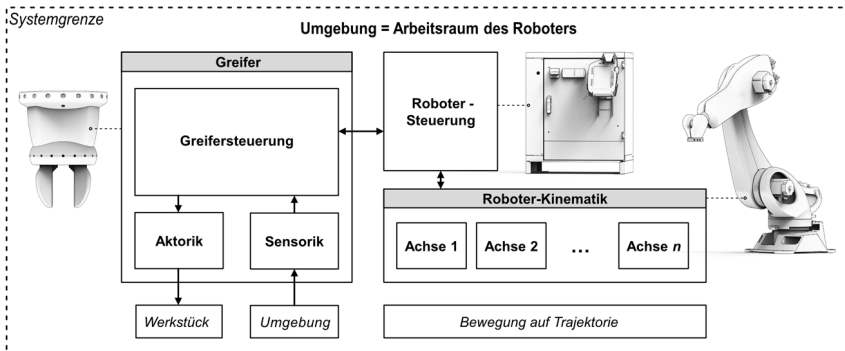


Abbildung 17: Betrachtete Elemente innerhalb der Systemgrenze

- **Gesamtsystem**

Als Gesamtsystemgrenze wird die „Roboterzelle“ gewählt. Diese besteht aus dem geteilten Arbeitsraum sowohl des Roboters als auch des Mitarbeiters und beinhaltet die darin befindlichen Objekte. Der technisch zentrale Teil ist das Robotersystem, bestehend aus der Roboterkinematik, der Robotersteuerung (in einem separaten Schaltschrank) und dem Endeffektor, welcher in dieser Arbeit ein Greifer ist.

- **Roboterkinematik**

Die Roboterkinematik (z.T. auch verkürzt als Roboter bezeichnet,) besteht aus zueinander beweglichen Achsen, welche i.A. wiederum jeweils einen Aktor und mehrere Sensoren zur Positionsregelung besitzen. In dieser Arbeit wird ein positionsgeregelter Knickarmroboter mit sechs Drehachsen und Synchronmotoren, welchen ein Getriebe nachgeschaltet ist, verwendet. Diese Roboterart ist weit verbreitet, womit der Ansatz dieser Arbeit sehr leicht auf weitere Modelle übertragbar ist. Robotertypen mit Portalbauweise oder Parallelkinematiken werden nicht betrachtet.

- **Robotersteuerung**

Betrachtet wird die Steuereinheit der Roboterkinematik, welche die Programmierung eines Bewegungsablaufs und die Positionsregelung zum Abfahren dieses Bewegungsablaufs im Betrieb ermöglicht.

- **Greifer**

Für den betrachteten Fall der Handhabung wird ein Greifer (Typ: Parallel-Fingergreifer) als Endeffektor angenommen. Dieser greift über eine Aktorik für die Greiferfinger ein Werkstück.

- **Greifersteuerung**

Der Greifer hat als intelligente Komponente ein eigenes, programmierbares Subsystem Greifersteuerung, welches mit der Robotersteuerung kommuniziert.

(Anmerkung: Der Begriff Steuerung wird hier stellvertretend für elektronische Komponenten wie iPCs, Mikrocontroller oder eine speicherprogrammierbare Steuerung verwendet.)

- **Sensorik**

Darüber hinaus muss für die Kollisionsvermeidung die physische Nähe von Objekten im Umfeld des Greifers wahrgenommen werden, dargestellt als Subsystem Sensorik. Es sollen prinzipiell möglichst alle Hindernisse mit denen eine Kollision passieren könnte detektiert werden, insbesondere der Mensch. Diese Konkretisierung ist wichtig, da sie direkte Auswirkungen auf die Anforderungen der zu verwendenden Sensorik hat.

Damit sind alle im System befindlichen Subsysteme und deren Funktionen abstrakt spezifiziert. Im nächsten Schritt wird nun die funktionale Aufteilung des zu entwerfenden Teilsystems Greifer weiter ausgeführt.

3.3.2 Funktionale Systemaufteilung

Für eine Handhabungsanwendung wird der verwendete Industrieroboter i.d.R. nicht grundsätzlich verändert, lediglich die Peripherie wird an die Aufgabe angepasst. Daher wird der Roboter, abgesehen von üblichen kleineren Anbauten, hier als unveränderlich angenommen. Demgegenüber wird das Endeffektor-Teilsystem, insbesondere Greifer, stets individuell an die jeweilige Greifaufgabe angepasst. Für die Kollisionsvermeidung ist dies relevant, da das gegriffene Werkstück ebenfalls eine Störkontur ist, die berücksichtigt werden muss. Die benötigten Funktionen werden daher komplett in den Endeffektor, am Beispiel Greifer, integriert. Damit der Ansatz einfach auf möglichst viele Effektoren übertragen werden kann, wird die Gesamtfunktion weiter modularisiert.

Analog zur Aufteilung der Problemstellung in drei Bereiche in Abschnitt 3.1.3 wird auch das System grundsätzlich in drei funktionale Blöcke unterschieden: Die Wahrnehmung der Umgebung, die Bewertung der Messungen anhand weiterer Informationen und die Berechnung einer Reaktion auf die aktuell gemessene Situation. Die Funktionen und Wirkzusammenhänge sind im Blockschaltbild in Abbildung 18 dargestellt.

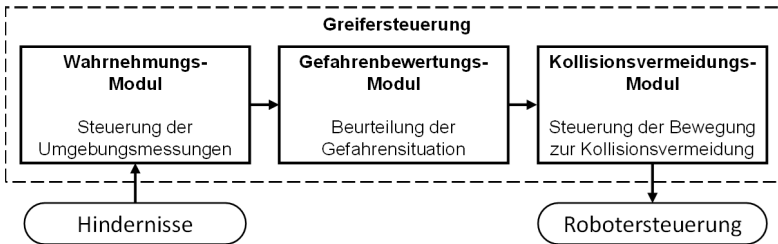


Abbildung 18: Funktionale Systemaufteilung in drei Module

Das Wahrnehmungs-Modul (in Anlehnung an die in der Literatur verbreitete Kategorie „Perception“) umfasst die Abstandsmessung zur Umgebung um den Greifer mittels einer Sensorik. Ziel ist es, den realen Zustand um den Endeffektor möglichst genau zu erfassen. Die gewonnenen Daten werden an das Gefahrenbewertungs-Modul übermittelt und dort ausgewertet. In dieser Evaluierung fließt das Wissen über die Anwendung ein, denn jeder Messwert ist wertlos ohne die korrekte Interpretation im Kontext der Zielstellung. In diesem Fall ist das Ziel die Entscheidung, ob der Zustand sicher, d.h. es steht keine Kollision bevor, oder unsicher ist. Letzteres bedeutet, dass der Greifer reagieren muss, indem er z.B. seine Trajektorie verändert. Diese Funktion wird im Kollisionsvermeidungs-Modul realisiert. Da der Endeffektor durch den Roboter geführt wird, ist eine kontinuierliche Kommunikation der beteiligten Steuerungen notwendig, um die Aufgabe gemeinsam zu erfüllen. Es handelt sich also um ein verteiltes (Steuerungs-)System. Die drei beschriebenen Module werden in den Kapiteln vier bis sechs ausführlich behandelt.

4 Erfassen der Umgebung

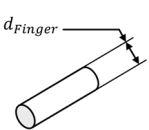
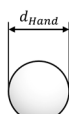
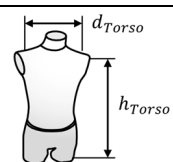
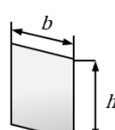
Aus der Systemspezifikation kann die zu erfüllende Funktion für das Wahrnehmungs-Modul allgemein als „Wahrnehmen der Annäherung an bzw. der Anwesenheit von Objekten um einen Greifer“ definiert werden. Für das Einsatzszenario *Handhabung im MRK-Betrieb* lassen sich daraus detaillierte Anforderungen an die gesuchte Sensorik ableiten.

4.1 Problemeingrenzung

Zunächst stellt sich für eine Sensorauswahl offensichtlich die Frage, was erfasst werden soll. Da es sich um eine Anwendung in der Mensch-Roboter-Kollaboration handelt, ist das sicherheitsrelevante Objekt der Mensch bzw. dessen anthropometrische Extremitäten. Dessen Annäherung muss mit hoher Zuverlässigkeit detektiert werden.

Typischerweise handelt es sich um die Hände bzw. Arme. Bei großen Industrierobotern ist aber auch der Kopf und Oberkörper des Mitarbeiters relevant. Um konkrete Testfälle ableiten zu können, werden die folgenden Testobjekte in Tabelle 2 definiert. Die Dimensionierung orientiert sich an einem 95-Perzentil Mann nach (DIN33402-2), in welcher alle Körpermaße von Erwachsenen in Deutschland zwischen 18 und 65 Jahren erfasst sind. Der Kopf wird nicht separat betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass er im Fall einer kritischen Annäherung besser erfasst wird als eine Hand, da er größer ist.

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Testobjekte

Finger	Hand	Torso	Platte
			

- Der Finger wird als Testobjekt T_{Finger} in Form eines Zylinders mit einem Normdurchmesser von 14mm nach (DIN EN ISO13855) und mit einer Länge von 100mm definiert.
- Die Hand wird als Testobjekt T_{Hand} geometrisch vereinfacht als Kugel mit 100mm Durchmesser definiert. Grundlage aus (DIN33402-2) ist die Handbreite mit Daumen.

- Der Torso wird als T_{Torso} eines 95-Perzentil Menschen ebenfalls in Anlehnung an (DIN33402-2) definiert. Dort wird mit einer Körpertiefe von 38,0cm und einer Hüftbreite von 38,5cm modelliert. Das reale Testobjekt hat die Form eines Torsos mit ca. 39,5cm Breite. In mathematischen Modellen und Abbildungen dieser Arbeit wird daher vereinfacht ein Zylinder mit 40cm Durchmesser angenommen. Durch diese Vereinfachung kann die Orientierung des Menschen vernachlässigt werden.
- Zusätzlich zu den anthropomorphischen Objekten wird eine ebene Platte als Testobjekt zum Bestimmen der Reflexionseigenschaften je Winkel eingeführt. Die Maße der Platte sind so gewählt, dass sie der projizierten Oberfläche des Torsos entsprechen.

Die Testobjekte unterscheiden sich zudem in ihrem Reflexionsgrad. Da der exakte Reflexionsgrad von Oberflächen experimentell nur schwer bestimmt werden kann, wurden verschiedene Klassen der Objekte unterschieden:

- a) Metallisch spiegelnde Objekte mit sehr hohem Reflexionsgrad R nahe 1 mit dem Index „M“ (z.B. $T_{Hand,M}$).
- b) Objekte mit weißen Oberflächen und damit hohem Reflexionsgrad $> 0,88$ mit dem Index „W“ (z.B. $T_{Hand,W}$).
- c) Objekte mit schwarzen Oberflächen und damit niedrigem Reflexionsgrad $< 0,17$ mit dem Index „S“ (z.B. $T_{Hand,S}$).

Anforderungen und Randbedingungen

Für das gesuchte Sensorprinzip lassen sich damit wichtige Anforderungen ableiten:

- **Detektionsvermögen**

Das Detektionsvermögen D_{MRK} elektronischer Sensoren ist die Kenngröße für das kleinste Objekt, welches von einem berührungslosen, annäherungserkennenden Sensor erfasst wird. Das Detektionsvermögen hängt in der Regel vom Detektionsabstand ab. Daher ist es nicht einfach möglich zu fordern, dass die kleinste Extremität bei maximalem Abstand detektiert wird. Vielmehr ist zu unterscheiden, welches Detektionsvermögen für die MRK bei welchem Abstand erfüllt wird.

- **Detektionsabstand**

Der Detektionsabstand d_{max} ist die Kenngröße für den Abstand, in dem ein Objekt

erstmal von einem berührungslosen Annäherungssensor erkannt wird. Allgemein gilt: Je kleiner das Objekt, desto geringer der Detektionsabstand berührungslos messender Systeme. Um eine möglichst lange Reaktionszeit zu haben, ist ein möglichst großer Detektionsabstand wünschenswert.

- **Messgenauigkeit**

Die Messgenauigkeit σ_s ist eine Leistungsanforderung, je genauer, desto besser. Sie wird in Form der Standardabweichung als Sensoreigenschaft ermittelt.

- **Abtastfrequenz**

Die Frequenz f , mit der die Sensorik arbeitet, sollte möglichst hoch sein, um die Totzeit zwischen Auftreten des Risikofalls und der Ausführung der Reaktion so gering wie möglich zu halten.

- **Bauraum**

Das für Sensoren benötigte Bauraumvolumen V_B kann sich im Betrieb als große Störkontur herausstellen. Gerade bei Greifanwendungen muss häufig ein Bauteil aus engen Verhältnissen wie z.B. tief in Maschinenräumen oder aus dicht angeordneten Werkstücken im Magazin entnommen werden. Die Sensorik sollte daher möglichst klein sein und eine geringe Störkontur beim Eintauchen darstellen.

- **Blickfeld eines Sensors**

Das Sichtfeld FoV (engl. Field of View) eines Sensors beschreibt die räumliche Ausdehnung des Detektionsfelds. Im Fall von wellenbasierten, z.B. elektromagnetischen, Sensoren handelt es sich um Öffnungswinkel ausgehend von einer Strahlenquelle. Je nach Sensor ergibt sich ein kegelförmiges oder rechteckiges Feld.

4.2 Auswahl eines geeigneten Sensorprinzips

Anhand der abgeleiteten Kriterien wird nachstehend ein Auswahlprozess zur Lösungsfindung durchgeführt. Die Neuentwicklung eines Sensors steht nicht im Fokus dieser Arbeit. Vielmehr soll ein geeignetes Prinzip für die Anwendung in MRK-Greifern gefunden und adaptiert werden. Die Analyse der im Stand der Technik vorgestellten Sensorprinzipien erfolgt einerseits literaturbasiert z.B. auf Basis von technischen Datenblättern oder Fachliteratur, andererseits auf Basis der Ergebnisse von Hellmann (A_Hell-

mann 2016) und eigenen Vorversuchen (Schäfer & Büsching et al. 2019) mit verschiedenen Sensor-Chipsystemen am Institut. Die Bewertung für den Einsatz im Greifer erfolgt anhand einer Nutzwertanalyse.

Im Unterschied zu den beschriebenen, allgemeinen Eigenschaften aus dem Stand der Technik wird in der folgenden Analyse der Bezug auf die Eignung zum Erreichen der formulierten Anforderungen aus Abschnitt 4.1 dieser Arbeit erörtert.

4.2.1 Kapazitive Umgebungserfassung

Wie bereits im Stand der Technik dargelegt, vermessen kapazitive Sensoren zur Annäherungsdetektion die Ladungsänderung gegenüber einem elektrischen Referenzpotenzial, im Idealfall eine Erdung. Genau diese Voraussetzung ist für bewegte Komponenten wie z.B. Greifer bereits kritisch. Es bedeutet, dass alle metallischen Elemente über die Kinematik hinweg geerdet werden müssen, was über Flansche und bewegte Gelenke zusätzlichen Aufwand bedeutet.

- **Detektionsvermögen:** Bezogen auf das Detektionsvermögen ist die Abhängigkeit vom Material des sich annähernden Objekts zu berücksichtigen. Menschliche Gliedmaßen, wie z.B. die Hand können gut erfasst werden, da der hohe Wasseranteil starken Einfluss auf die Kapazitätsänderung hat. Im Umkehrschluss können allerdings metallische Gegenstände der Umgebung nur sehr schwierig erfasst werden.
- **Detektionsreichweite:** Der größte Nachteil kapazitiver Sensoren ist die Detektionsreichweite. Da die maximale Reichweite nach Stand der Technik etwa 1,2-Mal dem Elektrodendurchmesser entspricht, ist leicht ersichtlich, dass für einen Greifer die Elektrodenfläche nur in sehr seltenen Fällen groß genug wäre um den benötigten Sicherheitsabstand für große Industrieroboter zu erreichen.
- **Messfrequenz:** Die größte Stärke kapazitiver Sensoren ist die hohe Frequenz der Messung. Typische Werte liegen zwischen 20kHz und 3MHz, was ausreichend für eine Sicherheitsanwendung ist.
- **Messgenauigkeit:** Unabhängig von der Detektionsreichweite lässt sich festhalten, dass kapazitiv nur die Anwesenheit eines Objekts im elektrischen Feld detektiert wird. Ohne detailliertes Vorwissen über das Objekt kann nicht der absolute Abstand ermittelt werden. Die Messgenauigkeit ist somit nicht bewertbar im Sinne einer Streuung, sondern im Sinne einer Wahrscheinlichkeit der Erfassung eines

Objekts und damit nur eingeschränkt nutzbar für den Einsatz in einer Gefahrenbeurteilung.

- **Bauraum und Integration:** Die Elektroden sind in der einfachsten Ausführung lediglich Schlaufen aus leitfähigem Draht oder Folie. Eine Integration in den Greifer ist damit sehr einfach und in kleinem Bauraum möglich. Nachteilig ist dabei jedoch, dass bei Einsatz einer einzigen Elektrode keine Information über die relative Richtung der Annäherung aus der Messung entnommen werden kann. Erst mit einer Schaltung aus mehreren Elektroden kann die Umgebung segmentiert werden, sodass zumindest die grobe Richtung aus der sich ein Objekt annähert, erkannt wird. Hierbei sind allerdings komplizierte Maßnahmen zu treffen, die Interferenzen zwischen den einzelnen Elektroden entgegenwirken.

Bewertung: Kapazitive Sensorik in MRK-Greifern

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass kapazitive Messverfahren gut geeignet sind, um Objekte im nahen Umfeld um einen Greifer zu detektieren, die sich schnell annähern. Größere Detektionsreichweiten sind für kleine Greifer aufgrund der Begrenzung durch die Elektrodengröße nicht realisierbar. Zudem ist es nur sehr schwierig möglich, eine Richtungsinformation zu erhalten, was eine Grundvoraussetzung für ein mögliches Ausweichen des Roboters ist.

4.2.2 RADAR-basierte Umgebungserfassung

Bei leistungsfähigen RADAR-Systemen muss vom Mitarbeiter zu jedem Zeitpunkt ein Mindestabstand eingehalten werden, um die Sicherheit des Mitarbeiters zu gewährleisten. Hintergrund ist die EU-Richtlinie (2014/53/EU), welche Mindestabstände von RADAR-Transmittern vorgibt, um gesundheitliche Schäden aufgrund der hohen Sendeleistung von Radiowellen zu limitieren. In einem MRK-Einsatz kann intensive Strahlung daher zum Gesundheitsrisiko werden.

- **Detektionsabstand:** RADAR-Systeme sind sehr gut für die Messung großer Distanzen geeignet. Für den Einsatz im Greifer sind Detektionsreichweiten von 20m im Verhältnis zu einer Roboter-Reichweite von weniger als 3m mehr als ausreichend. Im Gegenteil: Die lange Wellenlänge hat zur Folge, dass es einen Mindestabstand gibt, um valide Messungen zu erhalten.

- Messfrequenz: Die erreichbaren Messfrequenzen von 15MHz ermöglichen eine sehr schnelle Erfassung von bewegten Objekten und sind damit sehr gut geeignet für die MRK.
- Messgenauigkeit und Detektionsvermögen: Die Auflösung von Ultra-Short-Range Systemen kann theoretisch wenige Zentimeter betragen, jedoch konnten diese Werte in Vorversuchen mit dem Chipsystem *IWR1443* von *Texas Instruments SI* in produktionstechnischer Umgebung für kleine Objekte nicht bestätigt werden. Zwar konnte das Testobjekt Torso sicher erfasst werden, aber eine Hand wurde nur selten korrekt erkannt. Die Streuung der Werte betrug einige Zentimeter.
- Bauraum und Integration: Die Antenne pro RADAR-Sensor erfordert etwa eine Fläche von 5cm^2 (am Beispiel des *IWR 1443* Chipsystems) und ist damit in sehr wenig Bauraum integrierbar. Jedoch muss die starke Eigenerwärmung der Leiterplatte im Betrieb von bis zu 3 Watt berücksichtigt werden. Um die Einheit vor Verschmutzung zu schützen, muss das System gekapselt werden, was die Wärmedissipation zusätzlich erschwert. Ein RADAR-System unter Dauerlast im MRK-Betrieb wird demnach sehr warm und ist damit potenziell ausfallgefährdet.
- Sichtfeld: Wird die Antenne korrekt ausgelegt, sind gute Genauigkeiten und ein Sichtfeld von bis zu 160° möglich. Der Aufwand ein Antennensystem zu entwickeln und an verschiedene Greifer anzupassen, ist aber als sehr hoch zu bewerten.

Bewertung: RADAR-Sensorik in MRK-Greifern

Zusammengefasst sind RADAR-basierte Messverfahren zur Umgebungserfassung in Greifern gut geeignet, benötigen jedoch große Expertise in der Schaltkreis- und Antennenauslegung um die theoretischen Messeigenschaften auch im Anwendungsfall zu erreichen. Im Bereich unter 2m Entfernung um einen Greifer ist die Messauflösung aufgrund der großen Wellenlängen limitiert. Mit Messvarianz würden somit hohe Streuungen im Größenbereich von bis zu 20cm entstehen. Die Stärken der Technologie liegen eher bei größeren Distanzen von bis zu 50m.

4.2.3 LiDAR: Laserscanner

Laserscanner werden in der Robotik bereits häufig als externes Sicherheitssystem eingesetzt, deswegen soll ebenfalls bewertet werden, ob ein Einsatz in Greifern möglich ist. Als Beispielsystem dient der *nanoScan 3* der Fa. *Sick AG*¹¹.

- Detektionsreichweite und Detektionsvermögen: Nahfeldsysteme, wie der *SICK nanoScan*, erreichen 3m bis 10m Detektionsreichweite bei sehr guter Auflösung. Aufgrund dieser hohen Auflösung sind menschliche Gliedmaßen und Körper sehr gut erfassbar.
- Messgenauigkeit: Mit einer Genauigkeit von bis zu 2cm und einer Winkelauflösung von 0.17° kann ein sehr präzises Bild der Umgebung erstellt werden. Dies ist die größte Stärke von Laserscannern.
- Messfrequenz: Laserscanner arbeiten vergleichsweise langsam, da die Umgebung sequenziell mit einem einzigen Laserstrahl über Spiegel den Abstand je Orientierung zur Strahlquelle gerastert wird. Beim untersuchten System liegt die Messfrequenz unter 14Hz, was speziell für sich schnell annähernde Objekte wie in der MRK kritisch ist.
- Bauraum und Integration: Die größte Hürde ist der benötigte Bauraum für die Greiferintegration. Die Komponenten sind bereits in den kleinsten Ausführungen sehr groß und bilden eine kompakte, voluminöse Einheit, die im Gegensatz zu SoC-Systemen (System-on-Chip) nicht flexibel in ein Kunststoffgehäuse integriert werden können.
- Sichtfeld: Das Sichtfeld ist mit einem gerasterten Bereich von bis zu 275° sehr gut, jedoch in den meisten Fällen auf eine Ebene beschränkt. Darüber hinaus wird jede Messung je Orientierung einzeln und nacheinander durchgeführt. Somit kann ein Schutzbereich nicht permanent in alle Richtungen gleichzeitig überwacht werden.

Bewertung: Laserscanner in MRK-Greifern

Zusammenfassend können die Vorteile der hohen Präzision in der Umgebungserfassung nicht die Nachteile der schwierigen Integration in einen Greifer und die langsame Messfrequenz überwiegen. In kompakten Greifern können diese Systeme aktuell noch nicht zum Einsatz kommen.

¹¹ https://cdn.sick.com/media/pdf/0/80/980/dataSheet_NANS3-CAAZ30AN1_1100334_de.pdf [09.06.2020]

4.2.4 LiDAR: IR Time-of-Flight-Sensoren

Aus dem Stand der Technik ist bereits bekannt, dass IR ToF-Sensoren gute Ergebnisse in der Umgebungserfassung erzielen können. Als Beispielsystem für die konkrete Bewertung dient die Sensorbaureihe *VL53L0/1x* der Fa. *ST Microelectronics Inc.*

- **Detektionsvermögen:** Die untersuchten IR ToF-Sensoren verfügen als Detektor über eine „Single Photon Avalanche Diode“ (SPAD), welche bereits bei der Reflexion von wenigen Photonen ein Signal auslösen können. Demnach können auch kleine Objekte, wie z.B. eine Hand, gut erfasst werden.
- **Detektionsreichweite:** ToF-Sensoren erreichen eine gute Detektionsreichweite von bis zu 3 Metern. Die Auflösung ist eher nachteilig zu bewerten, weil das Sichtfeld nur grob gerastert werden kann. Aufgrund des einfachen Messprinzips entfallen komplexe Berechnungen und es können alle Abstandsinformationen der Umgebung direkt verarbeitet werden.
- **Messgenauigkeit:** Die erreichbare Messgenauigkeit von ToF-Sensoren ist gut, hängt jedoch von der Reflexionsfläche des Objekts ab. Je mehr Photonen gemessen werden können, desto präziser ist die Messung. Bei guten Bedingungen können Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erreicht werden.
- **Messfrequenz:** Es wird das komplette Sichtfeld mit einer Messung erfasst, was im Vergleich zum Laserscanner eine deutliche Zeitersparnis bringt und Messfrequenzen von bis zu 50Hz ermöglicht.
- **Bauraum und Integration:** Einzelsensoren sind sehr klein und können auf Leiterplatten eingesetzt werden, performantere Systeme, speziell Kameras mit Optik, benötigen mehr Bauraum und teilweise zusätzlich Kühlgehäuse. Die untersuchten ToF-Sensoren haben eine sehr kleine Baugröße. Aufgrund dieser Eigenschaft können sie ohne Probleme in einen Greifer integriert werden.
- **Sichtfeld:** Das kegelförmige Sichtfeld ist vergleichsweise klein mit einem Öffnungswinkel von 20° . Allerdings können mehrere Sensoren zu einem Array kombiniert werden, was das Sichtfeld weiter aufspannt.

Bewertung: IR ToF-Sensoren in MRK-Greifern

Die Hauptvorteile von ToF-Sensoren sind die gut geeignete Detektionsreichweite für die Anwendung MRK und die sehr hohe Flexibilität hinsichtlich der Integration von kleinen Einzelsensoren in einen Greifer. Nachteilig sind die Empfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen und die damit verbundenen Schwankungen in der Messgenauigkeit.

4.2.4.1 Laufzeitverfahren SODAR

Auch der untersuchte Ultraschallsensor verwendet ein Laufzeitverfahren zur Distanzmessung. Die marktführenden Referenzsysteme der Fa. *Mayser* waren für diese Arbeit nicht verfügbar, weshalb die eigenen Vorversuche an einem Sensor vom Typ *HC-SRF04* durchgeführt wurden.

- **Detektionsreichweite:** In eigenen Vorversuchen konnte eine Detektionsreichweite von ca. 45cm erreicht werden. Die maximale Reichweite ist durch die Messdauer in Verbindung mit der Schallgeschwindigkeit limitiert. Die Wellen bewegen sich zu langsam in der Luft, um während der Messdauer eine größere Strecke zurück zu legen.
- **Messfrequenz:** Der Sensor sendet zyklisch ein akustisches Signal mit einer Frequenz von 40kHz aus und wartet anschließend eine definierte Zeit, ob eine Reflektion der Welle am Mikrofon eintritt. Der Messtakt beträgt 20Hz und ist damit vergleichsweise gering. Erschwerend kommt hinzu, dass parallel keine anderen Sensoren messen können. Der Grund sind Interferenzen, da die Schallwellen sich im Raum gegenseitig beeinflussen.
- **Detektionsvermögen und Messgenauigkeit:** Im Nahfeldbereich bis 500mm können Objekte wie eine menschliche Hand gut erkannt werden. Darüber hinaus ist keine Aussage über das Detektionsvermögen von eventuell größeren Objekten möglich. Bei diesen geringen Distanzen konnte eine Genauigkeit von wenigen Millimetern erreicht werden.
- **Bauraum und Integration:** Analog zum laserbasierten ToF-Sensor sind auch die Ultraschallsensoren ein System-on-Chip-System. Sie sind wenige Zentimeter groß und können ohne Probleme in einen Greifer integriert werden.
- **Sichtfeld:** Die Schallwellen breiten sich ausgehend von der Quelle in alle Raumrichtungen aus. Ein klar abgegrenztes Sichtfeld kann nicht beschrieben werden, da die Grenzen fließend sind und vom Mikrofon sowie Umwelteinflüssen bestimmt werden.

Bewertung: Ultraschallsensoren in MRK-Greifern

Zu den Stärken der Ultraschallsensoren gehören der geringe Bauraum und die damit verbundene Flexibilität bei der Integration. Da sich aber einzelne Ultraschallsensoren

gegenseitig beeinflussen, kann diese Eigenschaft kaum genutzt werden, um einen Sicherheitsraum aus mehreren Sensoren aufzubauen. Dies führt zum größten Nachteil: der geringen Messfrequenz, welche eine Anwendung in der MRK stark einschränkt.

4.2.5 Bewertung und Auswahl Sensorprinzip

Die systematische Bewertung der zuvor diskutierten Sensorprinzipien erfolgt über die etablierte Methode der gewichteten Nutzwertanalyse nach VDI Richtlinie 2225 (VDI2225). Das Ergebnis ist in Abbildung 19 dargestellt und im Folgenden begründet.

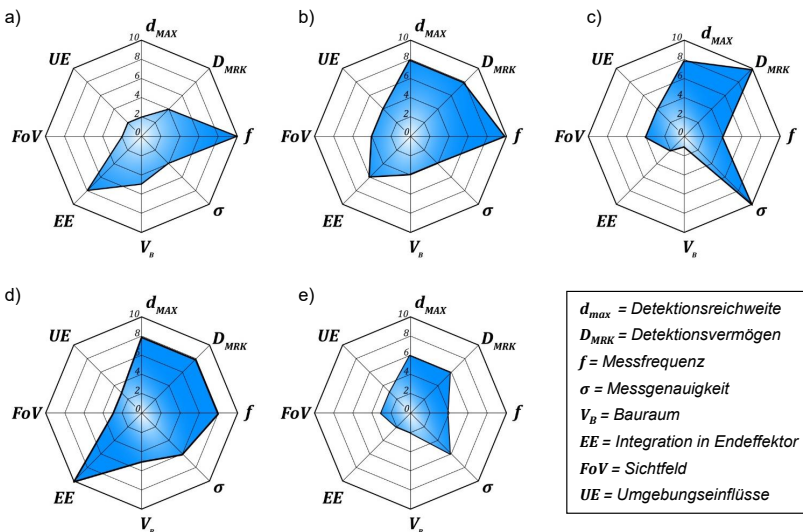


Abbildung 19: Nutzwertanalyse der Sensorprinzipien an den ausgewählten Chipsystemen: a) kapazitiv, b) RADAR, c) Laserscanner, d) IR-ToF-Sensor und e) Ultraschall

Den höchsten Erfüllungsgrad für die Zielsetzung einer Greifer-integrierten Umgebungsdetektion weisen die Time-of-Flight Einzelsensoren (d) mit 78,5% auf. Gegenüber Ultraschallsystemen (e) ist die höhere erzielbare Messfrequenz ohne Abklingzeit von Vorteil. Gegenüber den mit 73% ebenfalls gut geeigneten RADAR-Systemen (b) ist die etwas bessere Genauigkeit im relevanten Bereich bis 2m und die deutlich einfachere Integration in den Greifer ausschlaggebend. Einzelsensoren haben gegenüber Laserscannern (c) den Vorteil der deutlich höheren Flexibilität aufgrund des sehr kleinen Bauraums. Kapazitive Systeme (a) erreichen nicht die notwendigen Reichweiten und scheiden daher als Lösung aus.

Aus diesen Gründen werden für den weiteren Verlauf der Arbeit infrarotbasierte ToF-Sensoren verwendet, welche zur Gruppe der LiDAR Systeme gehören. Im nächsten Schritt müssen diese Sensoren noch für die Anwendung validiert und charakterisiert werden.

4.3 Charakterisierung des Sensorprinzips

Nach der Auswahl des grundlegenden Sensorprinzips ToF-Einzelsensoren für die Zielstellung müssen die genauen Prozessparameter bestimmt werden. Hierfür werden in einer Einflussanalyse relevante Sensorparameter identifiziert, ein statistisches Versuchsdesign (DoE) erstellt und anschließend die Versuchsergebnisse evaluiert. Ziel des Kapitels ist die Charakterisierung der Sensorik zum Finden der optimalen Prozessparameter und die Bestimmung der Eigenschaften für ein probabilistisches Sensormodell.

4.3.1 Sensorspezifische Einflussanalyse nach Ishikawa

Die identifizierten Einflüsse auf eine Abstandsmessung sind nachfolgend in einem Ishikawa-Diagramm (Abbildung 20) zusammengefasst. Die Einflüsse sind klassisch nach den fünf Hauptgruppen (Mess-)Methode, Maschine, Mensch, Material und Milieu gegliedert. Die Hauptgruppen werden nachfolgend diskutiert.

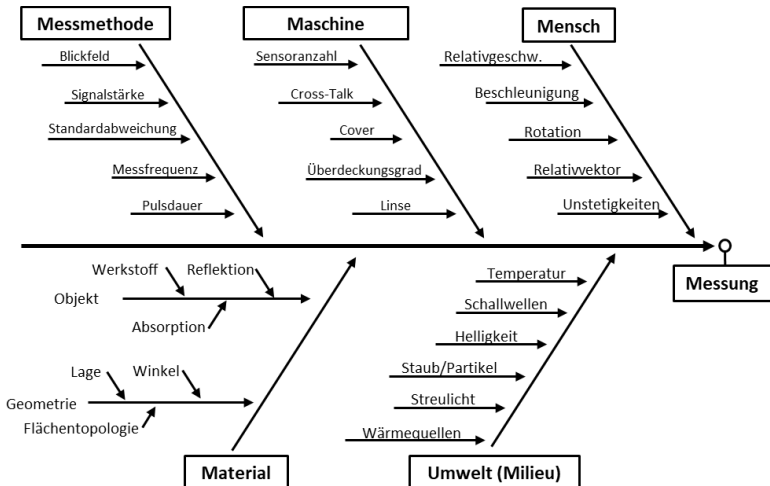


Abbildung 20: Ishikawa-Diagramm mit Einflüssen auf eine Abstandsmessung

4.3.1.1 Einflüsse der Messmethode

Um die Parameter des Messvorgangs genauer zu verstehen, ist ein detaillierteres Wissen des Prozessablaufs erforderlich. Die gewählte Sensorbaureihe (*STM VL53L0/1x*) basiert auf vertikal emittierenden Halbleiter-Lasern (engl. vertical cavity surface-emitting laser; kurz: VCSEL). Mittels eines Rechtecksignals aus der Stromquelle wird ein Lichtpuls erzeugt, der bis auf wenige Pikosekunden genau bestimmt werden kann (Malzahn 2014). Ein Sensorparameter ist daher die *Pulsdauer* (*Pulse Period; PP*) in Nanosekunden. Als Forschungshypothese gilt zu überprüfen: Je länger der Puls, desto mehr Photonen werden emittiert und desto genauer sollte das Messergebnis und die Messreichweite sein.

Die an der Oberfläche der Umgebung auftreffenden Photonen werden zum Teil reflektiert und beim Wiedereintritt am Sensorempfänger von einem Array aus 16 Photodioden erfasst. Durch die Verwendung von Single Photon Avalanche Dioden (SPAD) kann auch bei nur geringem Reflexionsgrad, und damit geringer Signalamplitude, die Ankunftszeit eines Photons auf Pikosekundenebene bestimmt werden. (Migdall & Polyakov et al. 2013)

Mittels eines Schwellwerts für die Signalamplitude δ_{SRR} (*Signal Return Rate*) in MCPS (MegaCountsPerSecond) wird beeinflusst, wie viele Photonen für eine valide Messung mindestens reflektiert werden müssen. Zu untersuchen ist insbesondere, wie sich dieser Parameter auf unterschiedliche Objekte auswirkt.

Bei jeder Messung werden Impulse der Wellenlänge λ mit 940nm erzeugt, bis entweder der mittlere Messwert eine ausreichend geringe Varianz aufweist oder ein Zeitlimit erreicht ist. Der erste Prozessparameter ist daher das Zeitlimit in Form der Messfrequenz f . Hardwareseitig sind im Chipsatz digitale Vor- und Nachbearbeitungsprozesse inkludiert. D.h. bei z.B. einer Frequenz von 20Hz ist die Pulsdauer nur sehr kurz, aber der gesamte Messzyklus dauert 50ms. Es ist zu erwarten, dass ein genaueres Messergebnis mit einer größeren Anzahl Pulsen erreicht werden kann. Für eine sicherheitskritische Anwendung ist aber eine möglichst kurze Dauer von Vorteil. Hier gilt es einen Kompromiss zu finden.

Der Schwellwert für eine erfolgreiche Messung ist die Standardabweichung σ , welche auf 18mm festgelegt ist. (In nachfolgenden Sensorgenerationen ist dieser Wert ebenfalls einstellbar. Für die untersuchten *VL53L0x* wurde mit einem konstanten Wert operiert.)

4.3.1.2 Material

Neben den Messparametern sollen die wichtigsten Einflüsse des Materials des Zielobjekts diskutiert werden. Hierbei spielt der *Reflexionsgrad* R der Oberfläche eine große Rolle. Wird wenig Licht reflektiert, kann der Abstand schlechter erfasst werden. Dies ist bei schwarzen Flächen kritisch, daher werden diese im Vergleich zu stark reflektierenden Oberflächen getestet. Gemäß Sensorspezifikation ist das Messverfahren zwischen den Grenzwerten von einem 17%, grau reflektierenden ($R=0,17$) und einem 88%, weiß reflektierendem Objekt ($R=0,88$) konstant einsetzbar, weshalb nur die Grenzkonfigurationen für die Versuche verwendet werden.

Weiterhin entscheidet der *Reflexionswinkel* φ des Objekts, welcher Anteil des Lichtpulses zurück zum Empfänger gelangt. Daher muss ermittelt werden, bis zu welchem Grenzwinkel je Material ein Objekt detektiert wird.

4.3.1.3 Mensch

Da sowohl der Greifer am Roboter als auch der Mensch während des Prozess in Bewegung sein können, muss die *Relativgeschwindigkeit* v_{rel} ebenfalls berücksichtigt werden. Bewegen sich Sensor und Mensch aufeinander zu, ist zum Ende der Messung der Abstand bereits wieder geringer geworden. Zu untersuchen ist, in welchem Maß dies die Messung beeinflusst und wie groß der Fehler ist. Aufgrund der sehr geringen Laufzeiten im Nanosekundenbereich für den Lichtpuls werden die Beschleunigung und die Rotation während der Fahrt nicht genauer untersucht.

4.3.1.4 Umwelteinflüsse (Milieu)

Kritische Einflüsse der Umwelt auf die Messleistung wurden lediglich in Vorversuchen ausgeschlossen, da in einer industriellen MRK-Applikation weiterstehend kontrollierbare und konstante Bedingungen herrschen. Der häufigste Kritikpunkt bei infrarotbasierten Messverfahren ist die Lichtempfindlichkeit. Für die vorhandenen Sensoren haben (Tsuji & Kohama 2019) Versuche durchgeführt, welche keinen signifikanten Einfluss im Bereich zwischen 10 und 10000 Lux Lichtstärke für verschiedene Beleuchtungsquellen zeigten. Eigene Vorversuche unter Kerzenlicht, aufgrund des hohen Anteils infraroter Strahlung, kamen zum gleichen Ergebnis. Ein Einsatz im grellen Sonnenlicht wurde nicht untersucht, da dies für eine MRK-Anwendung eher einen Sonderfall darstellt. Alle sonstigen Versuche in dieser Arbeit wurden bei Hallenbeleuchtung durchgeführt.

Bereits herstellereitig zertifiziert ist die *Temperaturbeständigkeit* der Sensoren von -20°C bis 70°C. Außerhalb dieser Grenzen ist eine erneute Kalibrierung notwendig. Der Einfluss von Partikeln, Rauch und Staub konnte aber nicht untersucht werden, diese Arbeit geht daher von klarer Sicht aus.

4.3.2 Validierung des Sensorprinzips

Die Eigenschaften der gewählten ToF-Sensoren für die Detektion von Objekten nach den in Kapitel 3.1 beschriebenen Risikofällen wurde in eigenen Versuchsreihen und in Arbeiten von Grzempa (A_Grzempa 2017) und Janzen (A_Janzen 2019) untersucht. Im Folgenden wird auf das Vorgehen und die wesentlichen Ergebnisse eingegangen.

4.3.2.1 Versuchsdesign und statistische Versuchsplanung (DoE)

Zusammenfassend sind die wichtigsten Einflussparameter auf die Messeigenschaften: die Pulsdauer t_{Puls} , der Amplitudenschwellwert δ_{SRR} , die Messfrequenz f , der Reflexionsgrad R und Reflexionswinkel φ der Oberfläche, die Objektgröße, sowie die translatorische Relativgeschwindigkeit v_{rel} zwischen Sensor und Mensch. Validiert werden soll die Detektionsreichweite d_{max} und die Messgenauigkeit über die Standardabweichung σ unter der Voraussetzung des Detektionsvermögens der menschlichen Hand T_{Hand} , des Torsos T_{Torso} und der Platte T_{Platte} .

Das Versuchsdesign wird auf Basis der statistischen Versuchsplanungsmethode Design of Experiments (DoE) vorgenommen. Dies hat einerseits den Vorteil einer geringeren Anzahl an Versuchen, vor allem aber wird im Gegensatz zu OFAT-Analysen (One Factor at a Time) die wechselseitige Beeinflussung der Parameter untereinander berücksichtigt.

Die Variationsbreite der sensorspezifischen Parameter wurde entsprechend der Risikofälle A und B für die Mensch-Roboter-Kollaboration vorgenommen. Die berücksichtigten Parameter sind in Tabelle 3 dargestellt.

Für die Versuche wurden zwei ToF-Einzelsensoren am Endeffektor eines Roboters vom Typ *KUKA KR180* angebracht. Die Variante mit zwei parallelen Sensoren wurde gewählt, um mögliche Einflüsse einer gegenseitigen Störung der Lichtpulse im Betrieb auszuschließen. Die Vorrichtung wurde anschließend zyklisch mit der Geschwindigkeit v_{rel} in einer geraden Linie zwischen zwei Punkten A und B verfahren. Die Sensoren sind parallel auf das jeweilige Testobjekt gerichtet und messen unabhängig voneinander die

Distanz zur nächsten Umgebung. In einer Messreihe werden mehrere hundert Messungen aus einer Messfahrt ausgewertet.

Tabelle 3: Übersicht der variierten Parameter der Versuchsreihen

f [Hz]	t_{Puls} [ns]	δ_{SRR} [10 ⁶ /s]	V_{rel} [m/s]	φ [°]	R [-]	Objekt
20	10	0,1	0,1	0	< 0,17	T_{Hand}
30	11	0,2	0,2	15	>0,88	T_{Torso}
40	12	0,3	0,4	30	≈1	T_{Platte}
50	13	0,4	0,6	45		
	14	0,5	0,8			
			1,0			

Die Versuchsaufbauten dieser Voruntersuchungen sind in Abbildung 21 veranschaulicht. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse der Versuche erläutert.

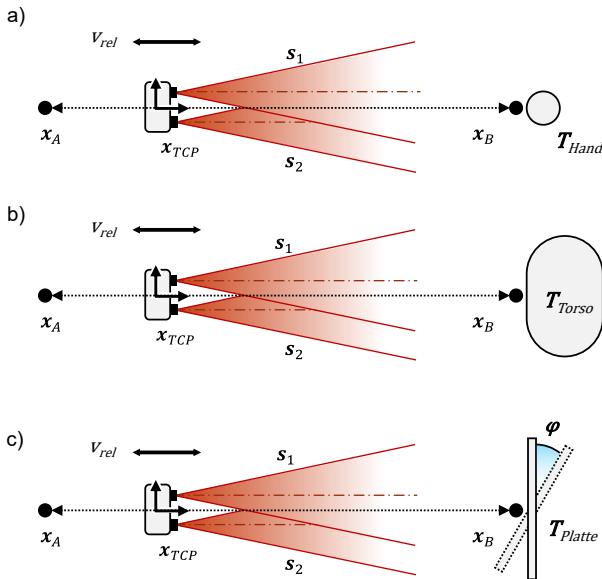


Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Sensoreigenschaften für a) Testobjekt Hand, b) Testobjekt Torso und c) Testobjekt Platte

4.3.2.2 Maximale Detektionsreichweite

Die Detektionsreichweite d_{max} wurde direkt zwischen dem ToF-Sensor und dem Testobjekt gemessen. Wobei der Abstand stetig vergrößert wurde, bis keine validen Messungen erzielt werden konnten. Die Ergebnisse der Messungen sind in Form von Mittelwerten aus je 5 Messfahrten in Abbildung 22 dargestellt.

Es lässt sich festhalten, dass die Detektionsreichweite für große Flächen mit hohem Reflexionsgrad R größer 0,88 ($T_{Torso,W}$) unabhängig vom Schwellwert der Signalamplitude δ_{SSR} und der Frequenz bei 1,45m liegt. Ab einer Pulsdauer t_{Puls} von 12ns kann dieser Wert sogar noch geringfügig auf 1,50m gesteigert werden.

Ein differenzierteres Bild ergibt sich für das schlecht reflektierende Objekt mit R kleiner 0,17 ($T_{Torso,S}$). Wie aufgrund des Messprinzips zu erwarten, liegt die erreichbare Detektionsreichweite niedriger. Bei hohem Signalamplituden-Schwellwert wird nur noch ein Wert von 0,95m erreicht, während bei niedrigeren Schwellwerten gute 1,30m erreicht werden können. Einen ähnlichen Verlauf, allerdings nicht so stark ausgeprägt, zeigt die Abhängigkeit vom der Frequenz f . Dennoch können auch hier immer noch Detektionsreichweiten von 1,12m erreicht werden.

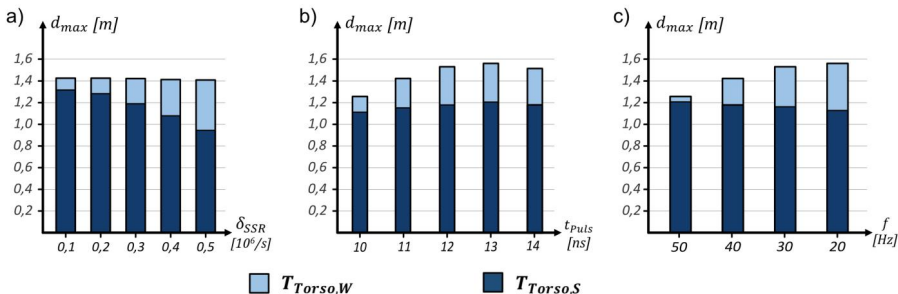


Abbildung 22: Detektionsreichweite für weißen und schwarzen Torso in Abhängigkeit von der a) Signalamplitude, b) Pulsdauer und c) Messfrequenz

Analog verhält sich die Sensorik bei der Detektion der Hand (T_{Hand}), wie in Abbildung 23 gezeigt. Insbesondere bei der Variante mit niedrigem Reflexionsgrad sinkt die maximale Detektionsreichweite auf bis zu 650mm ab. Bei einer hohen Messfrequenz f von 50Hz sowie bei geringen Amplitudenschwellwerten δ_{SSR} lassen sich aber gute Detektionsreichweiten von bis zu 1000mm erzielen. Aufgrund der kleinen Objektfläche im Verhältnis zum Sichtfeld werden jedoch nur wenige Photonen reflektiert und für eine

Messung ausgewertet. Demnach muss die Messgenauigkeit noch berücksichtigt werden.

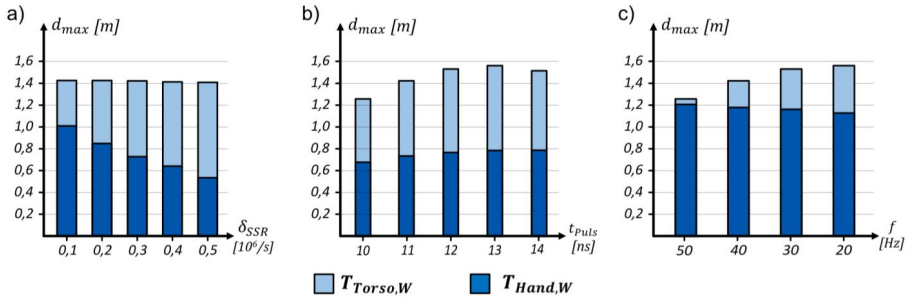


Abbildung 23: Detektionsreichweite für $T_{Hand,W}$ im Vergleich zu $T_{Torso,W}$ in Abhängigkeit von der a) Signalamplitude, b) Pulsdauer und c) Messfrequenz

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der erwartete Detektionsweitenbereich des Chipsystems VL53L0x bei einem Detektionsvermögen von einer Hand bei entsprechenden Prozessparametern verifiziert wurde. Ebenso kann bestätigt werden, dass die maximale Detektionsreichweite mit kleinerem Detektionsvermögen und geringerem Reflexionsgrad abnimmt. Für die Risikobeurteilung der Anwendung ist daher die Nutzung heller Kleidung beim Mitarbeiter zu bevorzugen, wenn Detektionsreichweiten $>1000\text{mm}$ vorausgesetzt werden. Alternativ muss von geringeren Reichweiten bis zu 650mm ausgegangen und eine entsprechend konservativere Sicherheitsstrategie gewählt werden.

Vorteilhaft sind hohe Frequenzen von 50Hz insbesondere auch hinsichtlich der Messfrequenz im Dauerbetrieb. Die Pulsdauer sollte mit 12ns gewählt werden. Geringe Amplitudenschwellwerte von $0,1$ bis $0,2$ Mio. Photonen pro Sekunde erweisen sich ebenfalls vorteilhaft auf die maximale Detektionsreichweite.

Hinweis: Für spätere Versuche wurde teilweise das Nachfolger-Chipsystem VL53L1x verwendet, welches größere Reichweiten hat. Aufgrund der gleichen Funktionsweise lassen sich die qualitativen Aussagen auf den Nachfolger übertragen. Die quantitativen Einflüsse fließen in der Validierung in Abschnitt 7.4 ein.

4.3.2.3 Orientierung der Reflexionsoberfläche

In der Anwendung wird der Sensor nicht nur menschliche Testobjekte erfassen, sondern auch weitere Objekte der Umgebung. Abbildung 24 zeigt daher die Detektionsreichweite je nach Orientierung einer ebenen Platte.

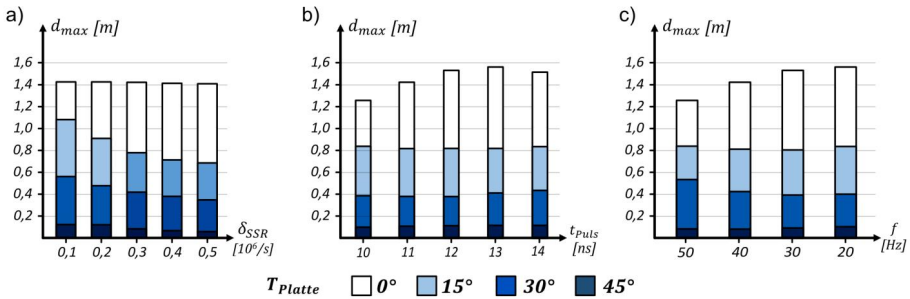


Abbildung 24: Detektionsreichweite einer Platte ($R > 0,88$) für die Verdrehung der Platte in 15° Schritten von 0° bis 45° für a) Signalamplitude, b) Pulsdauer und c) Frequenz

Für technische Objekte mit ebenen Oberflächen ist die Orientierung der Reflexionsoberfläche eine relevante Einflussgröße. Zum Vergleich wurde die Größe der Platte äquivalent zur projizierten Fläche des Testobjekts Torso gewählt. Aufgrund der Rotationssymmetrie des Blickfelds ist ein Reflexionswinkel φ zur Sensororientierung s_{ij} ausreichend.

Die Ergebnisse zeigen, dass der maximal messbare Abstand mit zunehmender Verdrehung abnimmt, da die Photonen nicht zurück zum Sensor reflektiert werden, sondern in die Umgebung abgelenkt werden. Somit stehen weniger Pulse zur Berechnung der exakten Entfernung zur Verfügung. Bei 45° Verdrehung beträgt dieser nur noch 10 bis 20 Prozent. Eine 45° verdrehte Fläche kann daher nicht mit ausreichendem Abstand detektiert werden.

Die Detektionsreichweite nimmt in diesem Fall stark ab. Dies ist für die Detektion des Menschen unkritisch, da der Körper mathematisch als eine kompakte Topologie betrachtet werden kann und somit stets ein Teil der Oberfläche zum Sensor orientiert ist. Kritischer ist diese Eigenschaft für die Modellierung der Umgebung. Umgebungsobjekte wie Maschinen haben häufig ebene Flächen, welche berücksichtigt werden müssen. Aus den Daten lässt sich erkennen, dass lediglich die Signalamplitude einen nennenswerten Einfluss hat und möglichst klein gewählt werden sollte.

Zusammenfassend sollte für die Modellierung des Sensors in Berechnungsverfahren ein Grenzwert von mindestens 30° für die Detektierbarkeit je Orientierung gewählt werden. Für eine Gefahrenbeurteilung hinsichtlich Risikofall 2 muss beachtet werden, dass die Umgebung möglichst präzise unterhalb von 40cm Abstand erfasst wird, sonst kann ein Mensch nicht mit ausreichender Sicherheit erkannt werden.

4.3.2.4 Relativgeschwindigkeit im Inertialsystem

Versuche, bei denen die Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und Zielobjekt variiert, zeigen, dass die gemittelte Abweichung bei zunehmender Geschwindigkeit deutlich zunimmt (siehe Abbildung 25).

Auch bei diesen Untersuchungen wurden die Prozessparameter mit einbezogen, um final eine Aussage zur Wahl der Parameter für das weitere Vorgehen treffen zu können. Aus den Messwerten ist gut zu erkennen, dass die Abweichung und die Streuung bis zu einer Geschwindigkeit v_{rel} von ca. 0,6m/s gering ausfallen. Darüber steigt die Abweichung insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten von 1m/s stark, auf bis zu 120mm beim reflektierenden Testobjekt und 155mm beim dunklen Testobjekt an.

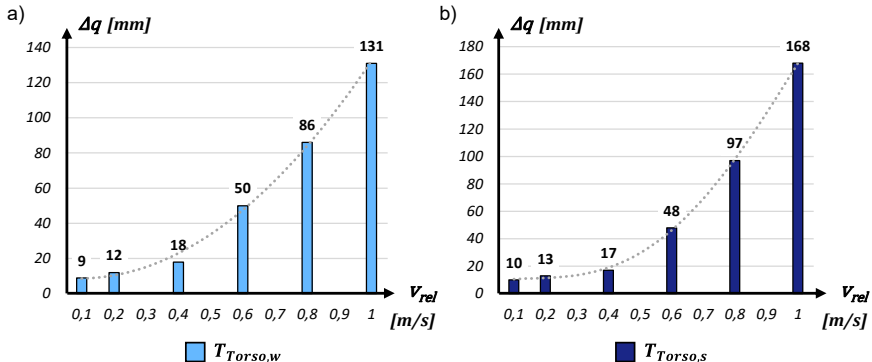


Abbildung 25: Gemittelte Abweichung Δq vom realen Abstand in Anhängigkeit der Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und a) $T_{Torso,w}$ bzw. b) $T_{Torso,s}$

Zusammenfassend bedeuten die Ergebnisse, dass für die Abschätzung von Sicherheitsabständen die Messungenauigkeit entsprechend berücksichtigt werden muss. Sind große Relativbewegungen im Inertialsystem zu erwarten, muss diese entsprechend angepasst werden.

4.3.2.5 Messgenauigkeit

Eine wichtige Eigenschaft für die Bestimmung der Messgenauigkeit ist zunächst der korrekte Ansatz der Verteilungsfunktion. Die Histogramm-Darstellungen der Verteilungsdichte lässt die Nullhypothese der Normalverteilung \mathcal{N} zu. Mittels des Shapiro-Wilk-Tests konnte diese These für die Messreihen bei einem Alpha-Signifikanzniveau von 5% verifiziert werden. Diese Eigenschaft ist eine wichtige Voraussetzung für den Entwurf eines mathematischen Sensormodells.

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit wurde die Standardabweichung σ_s und Varianz σ_s^2 für verschiedenste Parameterkombination aus Frequenz f , Pulsdauer t_{puls} und Signalamplitude δ_{SRR} über die Testobjekte Torso, Hand und Platte ermittelt. In Tabelle 4 sind die aus allen Ergebnissen gemittelten Standardabweichungen und Varianzen für die jeweiligen Parameterkombinationen zusammengefasst. Auf diese Art kann ermittelt werden, unter welchen Betriebsparametern die Genauigkeit über alle Versuche am höchsten ist.

In Bezug auf die Messfrequenz können die besten Ergebnisse bei hohen Raten von 50Hz erzielt werden. Über alle Versuche betrachtet, sollte die Signalamplitude über 0,3 Mio. Photonen pro Sekunde gewählt werden, um die Streuung zu verringern. Die Frequenz kann ohne Einbußen auf 50Hz gewählt werden. Die Pulsdauer hat bei 12ns ein lokales Optimum und in vielen Parameterkombinationen die besten Ergebnisse erzielt, weshalb diese Einstellungen für alle folgenden Versuche und Annahmen übernommen werden.

Tabelle 4: Gemittelte Standardabweichung σ_s und Varianz σ_s^2 über verschiedene Testobjekte für unterschiedliche Parameterkombinationen

Parameterkombination			Ergebnis	
f [Hz]	t_{puls} [ns]	δ_{SRR} [$10^6/s$]	$\emptyset\sigma_s$ [mm]	$\emptyset\sigma_s^2$ [mm]
50	12	0,3	33,5	13,75
50	12	0,5	29,8	12,25
50	14	0,5	33,0	17,5
25	10	0,1	39,0	16,75
25	14	0,1	33,0	17
20	10	0,1	36,3	17,75
20	12	0,5	32,3	18,75

Zusammenfassung

Es kann festgehalten werden, dass ein Mensch in ausreichendem Abstand von einer IR Solid-State ToF-Sensorik erfasst werden kann. Die Messfrequenz sollte möglichst hoch gewählt werden und wird daher im Folgenden bei $f=50\text{Hz}$ verwendet. Für die ideale Pulsdauer t_{Puls} wurde über alle Versuche ein optimaler Wert von 12ns ermittelt.

Die relativen Abweichungen auf Distanzen von mehr als 80cm sind im Weiteren zu berücksichtigen und sollten z.B. durch den Einsatz von Filtern verbessert werden. Ebenso führen höhere Robotergeschwindigkeiten zu Messungenauigkeiten, welche berücksichtigt werden sollten.

4.4 Eigener Ansatz zur Umgebungserfassung

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Frage, wie die Annäherung einer Person an einen bewegten Endeffektor wahrgenommen werden kann. Die in Kapitel 4.2 gewählten ToF-Sensoren müssen hierfür möglichst universell an Greifern angebracht bzw. integriert werden, um den relevanten Sicherheitsbereich zu überwachen. Dies schließt eine Annäherung aus möglichst jeder Orientierung ein, da sich ein Mensch auch rückseitig zu Bewegungsrichtung des Roboters annähern kann. Daraus resultiert die Anforderung das Sichtfeld möglichst lückenfrei umzusetzen, um eine sichere Detektion zu gewährleisten.

Im Folgenden wird ein Lösungskonzept beschrieben, welches unter anderem auf den Erkenntnissen der systematischen Lösungssuche und dem Vergleich verschiedener Konzepte aus der gemeinsamen Arbeit mit Hellmann (A_Hellmann 2016) beruht. Das Lösungskonzept wird in Form eines funktionalen Prototyps umgesetzt und im Folgenden sowohl konstruktiv als auch hinsichtlich der elektronischen Verschaltung diskutiert.

4.4.1 Mitbewegter Sicherheitsraum

Zunächst stellt sich die Frage, welche Form ein Sicherheitsraum, der mit dem Greifer bewegt wird, aufweisen sollte. Die betrachteten Finger-Greifer sind in der Anwendung entweder direkt am Roboter angeflanscht oder über eine lösbare Kupplung verbunden. Einzelgreifer haben meist ausgeglichene Proportionen von Länge zu Breite zu Höhe. Vereinfachend wird eine Einhüllende als Zylinder mit Durchmesser a angenommen. Im Vergleich zur Detektionsreichweite d_{max} ist der Durchmesser der Greifer- Einhüllenden sehr klein. Es gilt: $d_{\text{max}} \gg a$. Wird eine äquidistante Detektionsreichweite angenommen, ergibt sich als idealer, mitbewegter Sicherheitsraum annähernd eine Kugel.

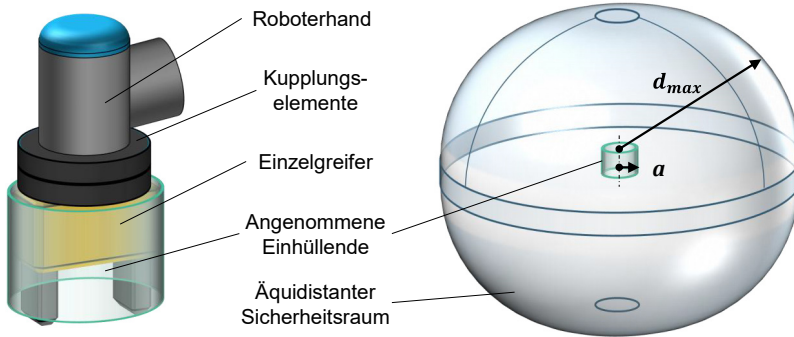


Abbildung 26: Der Greifer wird über einen einhüllenden Zylinder modelliert. Aufgrund $d_{max} \gg a$ ergibt sich als mitbewegter Sicherheitsraum näherungsweise eine Kugel.

In (Ostermann 2014) und eigenen Arbeiten von Hellmann (A_Hellmann 2016) konnte für diesen Fall gezeigt werden, dass eine strahlenförmige Anordnung der Sensoren am besten geeignet ist, um einen solchen Sicherheitsraum zu bilden. Im Fall von Greifsystemen wie z.B. Flächen-Greifern wird diese Kugelform entsprechend des Greifsystems mithilfe von geraden Segmenten entlang der Symmetrieachsen verlängert. Der Ansatz ist somit einfach auf neue Anwendungsfälle zu übertragen.

4.4.2 Sensoranordnung im Greifer

Aufgrund der Zielanwendung in der MRK sollte der Greifer eine Schutzhülle aus Kunststoff erhalten, welche scharfe Kanten abdeckt. Es liegt nahe, die Sensorik in diese Hülle zu integrieren, da sie damit ebenfalls vor Stößen und Schmutz geschützt wird. Aufgrund der kompakten Baugröße der ToF-Sensoren kann das entstehende LiDAR-Array zwischen Hülle und Greifer integriert werden. In dieser Arbeit wird dafür ein Ansatz aus zueinander versetzten Ringen vorgeschlagen, auf denen jeweils ein Array aus Einzelsensoren platziert wird.

Die Sensoren werden demnach auf einem Ring um den Greifer angeordnet und mit jedem weiteren Ring positiv bzw. negativ geneigt bzw. verdreht. Zu beachten ist, dass sich die Anzahl der Sensoren je Ring mit zusätzlichem Neigungswinkel ändert.

Abbildung 27 zeigt das Ring-Prinzip, umgesetzt mit den gewählten VL53L0x Sensoren. Da das Blickfeld kegelförmig ist, muss eine Überlappung der Detektionskegel vorgese-

hen werden. Je nach benötigtem Sicherheitsbereich kann ein CAD-System die notwendigen Positionen berechnen. Das Lösungsprinzip wird nachfolgend für Einzelgreifer bzw. Kompaktgreifer diskutiert.

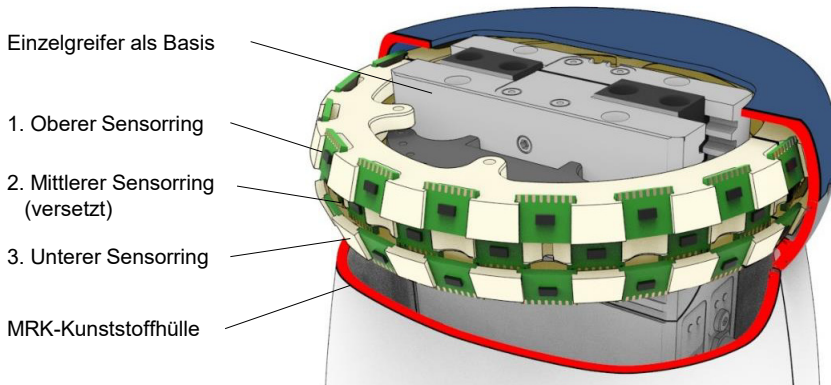


Abbildung 27: Beispielkonzept mit drei zueinander versetzten Ringen in der MRK-Hülle

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass mit diesem Prinzip eine gute Flächenabdeckung als Sicherheitsraum gebildet werden kann (siehe Abbildung 28). So konnte exemplarisch gezeigt werden, dass die Annäherung des Testobjekts T_{Hand} in Abhängigkeit von der Sensordichte sehr gut erkannt wird. Die Erkennungsrate von 100% aller Annäherungsversuche zeigt, dass der überwachte Sicherheitsraum lückenlos ist. Ausgenommen sind hierbei Bereiche, die durch ein Werkstück verdeckt werden. Das Testobjekt T_{Finger} wurde immerhin zu 69% erkannt. Dieser Wert kann jedoch durch eine höhere Überlappung der Sensoren gesteigert werden. Das Konzept des mitbewegten, strahlenförmigen Sicherheitsraums wurde daher für den Prototyp und die weiteren Untersuchungen übernommen.

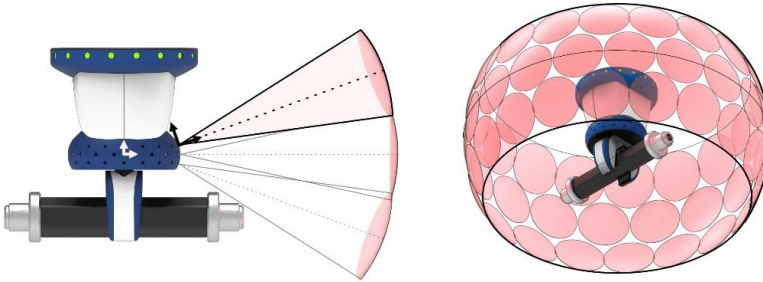


Abbildung 28: Der Aufbau aus drei übereinander angeordneten und zueinander versetzten Ringen schafft eine nahezu lückenloser Detektionsbereich

4.4.2.1 Blinde Bereiche

Im realen Einsatz ist der Sicherheitsraum physikalischen Einschränkungen unterworfen. Wie für nahezu alle mitbewegten Sensorprinzipien gelten auch für LiDAR-Systeme die Grundsätze der Wellenausbreitung. Vereinfacht ausgedrückt, kann ein Sensor demnach nur Oberflächen im Raum erfassen, zu welchen eine gerade Verbindung hergestellt werden kann. Es ist demnach physikalisch nicht möglich verdeckte Oberflächen zu erfassen. Damit wird das Sichtfeld des Greifers nach oben in Richtung der Roboterhand und nach unten potentiell durch ein Werkstück eingeschränkt (siehe Abbildung 29).

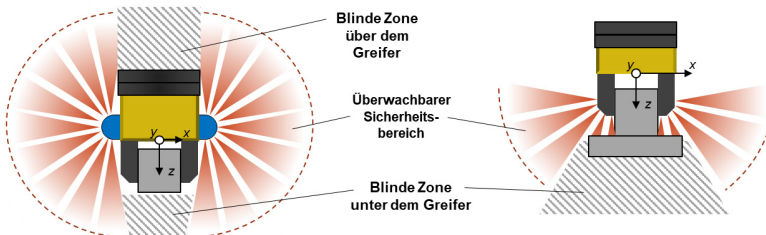


Abbildung 29: Veranschaulichung der blinden Zone im Sicherheitsraum

Die Einschränkung durch den Roboter ist als unkritisch zu bewerten, weil bereits Konzepte bekannt sind, die eine Annäherung an den Roboter erkennen können. Die Einschränkung hinsichtlich des Werkstücks ist kritischer zu bewerten, da bei weit überlappenden Werkstücken ein blinder Bereich unter dem Greifer entsteht, in dem eine Annäherung nicht detektiert werden kann.

Diese Problemstellung kann konstruktiv nur sehr aufwändig gelöst werden. Die einfachere Lösung ist daher, die blinden Bereiche in der Handhabungsstrategie bzw. Pfadplanung und bei der Sicherheitsbewertung des Systems zu berücksichtigen. Der einfachste Ansatz ist, den Greifer stets im Sinne eines Palletierroboters zu betreiben und die Z-Achse über die Zeit der Bewegung in Richtung Boden zu orientieren. Dieser Lösungsansatz wird daher für die weiteren Untersuchungen verwendet.

4.4.3 Konstruktiver Aufbau des funktionalen Prototypen

Für die weiteren Untersuchungen wurde ein funktionaler Prototyp auf Basis des vorgestellten Ring-Prinzips aufgebaut, dargestellt in Abbildung 30.

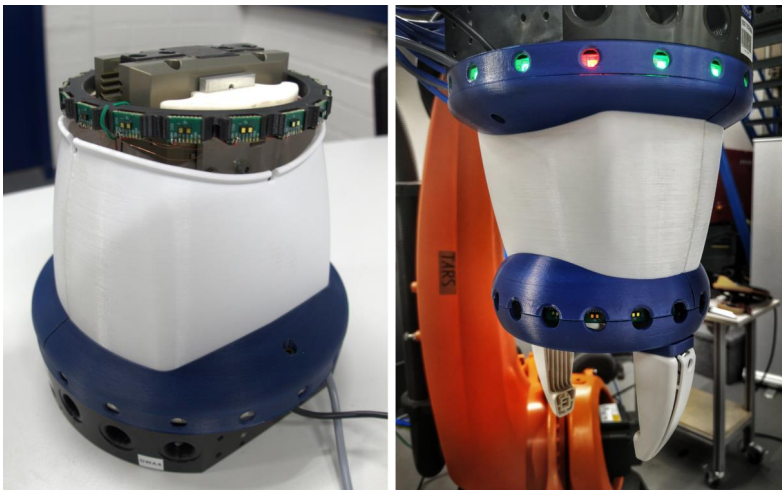


Abbildung 30: Funktionaler Prototyp des MRK-Greifers mit integriertem LiDAR-Array und LED-Visualisierung.

Als Basis-Greifer wurde exemplarisch ein pneumatischer Parallelgreifer vom Typ *SCHUNK PGN-plus-100* verwendet. Dieser wird über eine mechanische Unterkonstruktion mit einer Schnellwechsellkupplung mit einem Industrieroboter vom Typ *KUKA KR180* verbunden. Gemäß der Richtlinien der MRK wurde eine mehrteilige Schutzhülle aus Polypropylen konstruiert und additiv gefertigt. Innerhalb der Schutzhülle kann die Elektronik inkl. der Sensoren befestigt werden.

Um den Greifer wurde eine Konstruktion geschaffen, welche das flexible Anbringen verschiedener Sensorringe ermöglicht. Die Ringaufnahme kann in der Höhe kalibriert

werden und insgesamt drei Ringe aufnehmen. Ein solcher Ring besteht aus 18 Einzelsensoren und wird als (Ring-)Modul bezeichnet. Für die weiteren Untersuchungen wurde mit einem Ringmodul verfahren, da dies für alle geplanten Versuche die notwendigen Messdaten liefert. Ein Ausbau um weitere Ringmodule ist jederzeit möglich.

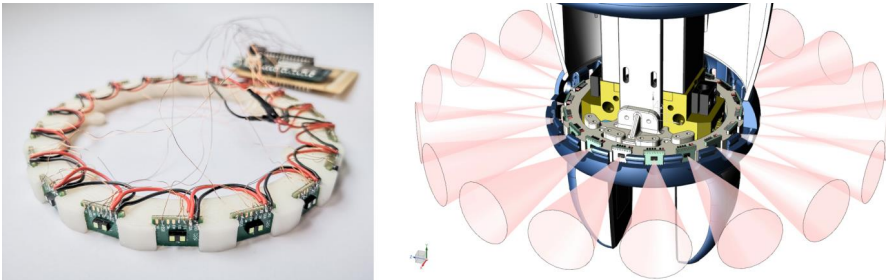


Abbildung 31: Ring-Prototyp mit 18 verschalteten Sensoren (li) sowie Aufbau des Prototyps mit Greifer, Sensorring, Schutzhülle und Unterkonstruktion (re)

Für die Sensoren wurden Aussparungen in der Kunststoffhülle vorgesehen. Der Versatz zwischen Sensor und Aussparung wirkt zusätzlich wie eine Blende, um Streulicht vom Sensor fern zu halten. In weiteren Anwendungen könnte hier eine IR-durchlässige Scheibe zum Einsatz kommen. Als zusätzliche Funktion wurde ein LED-Band mit 18 RGB-Dioden integriert. Diese visualisieren am oberen Ende des Greifers die aktuellste Messung des darunterliegenden Sensors in Form einer Ampel (siehe Kapitel 6).

4.4.4 Systemarchitektur des funktionalen Prototypen

Neben der mechanischen Ausgestaltung muss für einen modularen Ansatz auch die elektrische Verschaltung und die Architektur der Informationsverarbeitung entsprechend aufgebaut werden. Die Systemarchitektur ist vereinfacht in Abbildung 32 dargestellt.

Der Endeffektor kann je nach Anwendung unterschiedlich aussehen, daher ist es sinnvoll auch die Datensystemarchitektur modular erweiterbar zu konzipieren. Wie gezeigt, eignet sich für Kompaktgreifer ein modularer Aufbau des LiDARs aus separaten Ringen. Damit die Datenverarbeitung nicht bei jeder Änderung neu angepasst werden muss, wird jedem Array aus ToF-Sensoren ein eigener Mikrocontroller zugeordnet. Für

den gegebenen Aufbau wird ein *Arduino MKR1000* verwendet. Der Mikrocontroller mit 32-Bit System verfügt über einen *ARM Cortex M0+* Prozessor mit 48Mhz Leistung.

Das Sensor-Array wird über einen I2C-Bus adressiert und kann somit theoretisch bis zu 256 Einzelsensoren integrieren. In der Praxis ergibt sich jedoch eine Grenze aus der maximalen parasitären Kapazität des Bussystems, welche die Anzahl an Sensoren schon auf wenige Dutzend (abhängig von Aufbau und Controller) beschränkt.

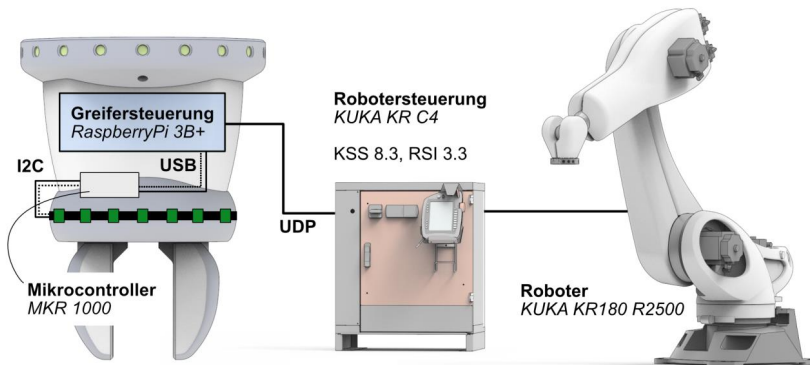


Abbildung 32: Systemarchitektur des Prototypen-Systems

Ein Sensor-Array besteht in dieser Arbeit aus $i = 18$ Einzelsensoren und bildet gemeinsam mit einem Mikrocontroller das Ringmodul j . Jedes Modul kommuniziert seine Messwerte über einen seriellen Bus an die Greifersteuerung. Als Steuerung für einen modernen, intelligenten Greifer wird ein Einplatinen-PC mit Embedded-Linux Betriebssystem angenommen. Stellvertretend wird ein *RaspberryPi 3b+* verwendet.

Die Kommunikation mit der Robotersteuerung erfolgt über eine UDP-Kommunikation auf Ethernet-Basis. Die Robotersteuerung regelt die einzelnen Gelenkantriebe über proprietäre Protokolle. Damit ist die Kommunikation in einem 3-Schichten-Modell eines verteilten Systems aufgeteilt: Sensor-Modul, Greifersteuerung und Robotersteuerung. Auf der Greifersteuerung kann nun die Logik für die notwendigen Funktionen a) Gefahrenabschätzung und b) Berechnen einer Kollisionsvermeidung entwickelt werden.

4.5 Zusammenfassung

In Kapitel 4 wurden insgesamt drei wichtige Forschungsfragen beantwortet: 1) Welches Sensorprinzip eignet sich am besten für einen MRK-Greifer? 2) Welche Einsatzgrenzen

und Charakteristiken hat ein solches Sensorprinzip? 3) Wie kann das Sensorprinzip in einen MRK-Greifer integriert werden?

- 1) Der initiale Vergleich und die Bewertung verschiedener Sensorprinzipien hat gezeigt, dass eine SoC-Lasersensorik basierend auf der Laufzeitmessung elektromagnetischer Wellen im Infrarotbereich (940nm) die geeignetste Methode für die Detektion von sich annähernden Menschen im Anwendungsfall „Handhabung in der MRK“ ist. Im zweiten Auswahlschritt wurden verschiedene verfügbare Chipsysteme verglichen und hinsichtlich der Eignung für die Integration in Greifer bewertet. Aufgrund der vergleichbaren Leistung bei sehr kleinem Bauraum wurde für das weitere Vorgehen die ToF-Sensorbaureihe *VL53Lx* der Firma *STMicroelectronics* ausgewählt.
- 2) Die einzelnen SoC-Lasersensoren wurden anschließend charakterisiert, um deren optimale Prozessparameter zu bestimmen und die Einsatzgrenzen der Detektion bei verschiedenen Objekten und Umgebungsbedingungen zu ermitteln. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Annäherung relevanter Objekte an den Greifer in ausreichendem Abstand für z.B. eine Bremsung des Roboters detektiert werden kann. Für die Annäherung eines Menschen ergibt sich eine zuverlässige Detektionsreichweite von 1,30m bei Detektion eines Torsos im Fernfeld und eine zuverlässige Detektion einer Hand in 650mm Entfernung vom Greifer.
- 3) Abschließend wurde ein funktionales Prinzip entworfen, um aus den einzelnen Sensoren einen Sicherheitsraum um den Greifer zu schaffen. Mithilfe der Verschaltung als serielles Array in Form von Ringmodulen kann eine nahezu lückenlose Detektionszone erreicht werden. Als Systemarchitektur wurde ein dreischichtiges Modell zur Kommunikation zwischen Sensoren, Greifersteuerung und Robotersteuerung vorgestellt.

Mit diesen Erkenntnissen kann im überwachten Bereich die Annäherung eines oder mehrerer Objekte in Richtung des Greifers sicher erfasst werden. Es kann jedoch noch keine Aussage getroffen werden, ob es sich um einen Mensch oder die Umgebung handelt. Daher ist auch unbekannt, ob es sich um eine Gefahrensituation handelt. Diese Bewertung wird im nächsten Kapitel behandelt.

5 Methode zur Gefahrenbeurteilung

Im Rahmen der Koexistenz von Menschen und Robotern im selben Arbeitsraum kann es unabsichtlich dazu kommen, dass Bewegungen des Menschen sich mit der geplanten Robotertrajektorie überschneiden. In solchen Fällen gilt es für die Maschine sicher abzuschätzen, ob Stoß- oder Quetschgefahr besteht und eine Reaktion zur Gefahrenvermeidung erforderlich ist. Gegenstand des folgenden Kapitels ist daher die Methodik zur Beurteilung einer potenziellen Gefahrensituation.

5.1 Problemeingrenzung

In der Regel befinden sich im Arbeitsraum eines Roboters zahlreiche Hindernisse wie z.B. Maschinenteile, Schaltschränke oder Vorrichtungen. Statische Hindernisse werden bei der Bahnprogrammierung berücksichtigt und stellen für das Robotersystem keine Kollisionsgefahr dar. Eine Umgebungssensorik kann aber nicht zwischen ungefährlichen und gefährlichen Objekten unterscheiden. Abbildung 33 veranschaulicht dieses Problem.

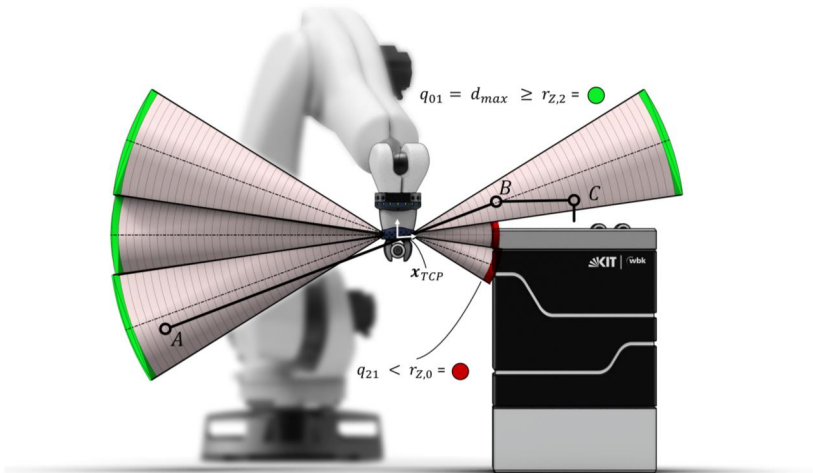


Abbildung 33: Das Robotersystem fährt auf der geplanten Trajektorie, die Sensorik detektiert eine Annäherung und löst fälschlicherweise eine Reaktion aus.

Zu sehen ist das bekannte Szenario aus Risikofall B. Die Trajektorie wurde so geplant, dass der Greifer knapp über die Kante des Magazinkastens fährt und anschließend das Bauteil an Punkt C ablegt. Während der Fahrt von A nach B erfasst die Umgebungssensorik das Hindernis. Das System müsste davon ausgehen, dass es sich um eine Gefahr handelt und eine Reaktion auslösen, z.B. anhalten sobald ein Mindestabstand unterschritten wird. Der Handhabungsvorgang wäre auf unbestimmte Zeit unterbrochen. Der Greifer würde also fälschlicherweise ohne echte Kollisionsgefahr ein falsch-positives (aus dem engl. false positive) Signal auslösen. Dieses Problem muss in der Bewertungsmethode berücksichtigt werden.

Die eigentliche Gefahr für Kollisionen sind Objekte, welche bei der Bahnprogrammierung nicht im Arbeitsraum vorhanden waren. In der MRK ist der Mensch ein solch unbekanntes Objekt. Seine Anwesenheit im Arbeitsraum, wie in Abbildung 34 dargestellt, ist eine potenzielle Gefahr und muss daher sicher und zuverlässig erfasst werden.

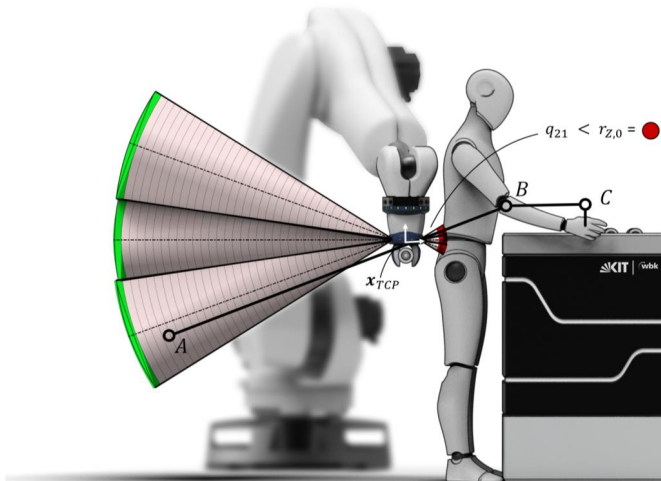


Abbildung 34: Die Sensorik muss Menschen erkennen und eine Reaktion auslösen.

Während der Mensch eine Situation intuitiv bewertet und Gefahr erkennt, muss ein technisches System dies über eine nachvollziehbare Methode beurteilen und mittels Kennzahlen entscheiden. Zur Lösung muss eine Bewertungsmethode hergeleitet und am gegebenen Beispiel evaluiert werden.

Anforderungen und Randbedingungen

Dieser Fragestellung liegen verschiedene Anforderungen und Randbedingungen zugrunde, die nachfolgend kurz erörtert werden:

- *Umgang mit Unsicherheit:* Im Betrieb eines Robotersystems muss damit gerechnet werden, dass sowohl die Messdaten der Umgebungserfassung als auch die Positionsdaten des Roboters fehlerbehaftet sind. Trotzdem ist eine valide Bewertung für die (Un-)Sicherheit jederzeit zu gewährleisten.
- *Abgeschlossenheit des Systems:* Aus der Grundannahme, dass das System aus Roboter, Endeffektor, Werkstück und Mensch besteht, und nicht um weitere Systemkomponenten ergänzt werden kann, folgt: Jede Berechnung im Greifer muss auf Basis der verfügbaren Daten aus dem Roboter, dessen Verhalten (als Systemmodell) und dem aktuellen Umgebungszustand aus der Sensorik getroffen werden.
- *Filtern von fehlerhaften Messungen:* Es kann vorkommen, dass Sensoren fehlerhafte Messungen liefern. Beispielsweise aufgrund von Zeitüberschreitungen der Messdauer, Messungen ins Leere oder schlicht Sensoren, welche den Roboter selbst erfassen. Diese müssen im Berechnungsverfahren gefiltert werden, da sie sonst das Ergebnis verfälschen könnten.
- *Rechenzeit:* Aufgrund der zeitkritischen Anwendung ergibt sich für das Programm eine Echtzeitanforderung. Das bedeutet, dass die maximale Laufzeit der Berechnung begrenzt ist und nach Ablauf der Zeit immer ein Ergebnis zur Verfügung stehen muss. Die Dauer wird unter anderem beeinflusst von der Datenmenge, die verarbeitet werden muss, und der Leistungsfähigkeit des Computersystems. Die maximal zulässige Rechenzeit ergibt sich aus den Input- und Output-Frequenzen: Während eine Bahninterpolation eines (Kuka-) Industrieroboters mit 250Hz geschieht, also alle 4ms ein neues Datenpaket erwartet wird, messen die ausgewählten Sensoren mit einer Frequenz von maximal 50Hz. Da eine neue Abschätzung nur auf Basis aktueller Daten Sinn ergibt, ist der Sensortakt mit 20ms maßgeblich. Weitere Berechnungen und die Datenübertragung benötigen ebenfalls Zeit, weshalb die Methode maximal ein Drittel der verfügbaren Zy-

luszeit benötigen soll. Das bedeutet die gesamte Berechnung der Gefahrenabschätzung darf als Zielgröße lediglich 7 Millisekunden dauern. Diese hohe Anforderung wird weiter erschwert durch die Einschränkungen in der Hardware.

- *Hardware:* Im Zuge von Industrie 4.0 werden Komponenten immer „intelligenter“ oder „smarter“: Sie werden also fähig komplexere und kompliziertere Funktionen auszuführen. Aufgrund der engen Bauraumanforderungen bei Greifern werden häufig Einplatinen-PCs oder Mikrocontroller zur Realisierung solcher „Intelligenz“ verwendet. Die maximal zu Verfügung stehende Rechenleistung für die Anwendung ist demnach limitiert. Der Großteil der derzeit im Stand der Technik verfügbaren Mikrocontroller verwendet ein 32-Bit System. Die Folge ist ein maximal adressierbarer Arbeitsspeicher von 2^{32} Bit, von dem auch Teile für andere Rechenoperationen genutzt wird. Daher darf die Berechnung nicht mehr als 1,5GB RAM-Speicher in Anspruch nehmen.
- *Plattformunabhängigkeit:* Um möglichst universell in verschiedene Endeffektoren integriert werden zu können, sollte die zu entwerfende Methode plattformunabhängig sein. Die beiden am häufigsten eingesetzten Betriebssysteme für oben genannte Hardware sind UNIX-basiert oder verwenden die Windows-IoT Plattform. Die Methode soll daher diese beiden Betriebssysteme und deren Derivate unterstützen.
- *Detektionsgenauigkeit:* Das Verfahren soll im Risikofall fähig sein, eine menschliche Hand im Nahfeld zu erkennen. Der kritische Fall hierbei ist eine menschliche Hand auf einer Arbeitsfläche. Erkennt das Verfahren nicht, dass die Hand dort ist kann es zur Quetschungen kommen. Die Hand wird hier gemäß Tabelle 2 als 10cm Kugel angenommen.

Die gesammelten Anforderungen sollen nun in Kapitel 5.2 bei der Entwicklung der Methode und der Untersuchung geeigneter Verfahrensvarianten berücksichtigt werden.

5.2 Eigener Ansatz zur Veränderungserkennung

Aus der beschriebenen Zielstellung in Abschnitt 3.1.3 ist eine Methode gesucht, welche zuverlässig rechnerisch abschätzen kann, ob Stoß- oder Quetschgefahr für einen Menschen besteht. Der grundlegende Unterschied zwischen einer MRK-Anwendung und einer klassischen Roboterzelle ist die dynamische Umgebung im Vergleich zu einer statischen Umgebung. In abgegrenzten Roboterzellen sind statische Hindernisse in der Umgebung bekannt und können als Vorwissen bei der Bahnprogrammierung berücksichtigt werden. Dies ist in der MRK nicht der Fall, da der Mensch als dynamisches Hindernis nicht vorab einbezogen werden kann.

Der Ansatz, Vorwissen über die Roboterzelle zu nutzen, bietet sich jedoch auch für die Gefahrenbeurteilung in der MRK an. Die erste Grundannahme (1) für die Methode ist daher, dass zu einem sicheren Zeitpunkt (z.B. der Inbetriebnahme) eine statische Umgebung U_M existiert und der Roboter inkl. Greifer und Werkstück initial so programmiert wurde, dass keine Kollision mit dieser vorkommt. Die Umgebung selbst wird mathematisch als räumliche Karte repräsentiert (siehe Abschnitt 5.3.1).

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, kommt es in beengten Arbeitsräumen dennoch zu der Situation, dass bewusst, aber zu einem unbestimmten Zeitpunkt, ein Mindestabstand S_{min} zwischen Greifer und der Umgebung U_M unterschritten wird. Da dies jedoch in der initialen Programmierung berücksichtigt wurde, ist nur eine *veränderte Umgebung* potenziell gefährlich. Darauf aufbauend ist die zweite Grundannahme (2), dass jede Veränderung gegenüber dem statischen Referenzzustand der Umgebung U_M in Abhängigkeit vom Abstand eine Kollisionsgefahr darstellt. Abbildung 35 veranschaulicht diesen Ansatz. Dies ist plausibel, denn eine Abweichung zum statischen Umgebungszustand bei Inbetriebnahme in direkter Nähe zum Greifer kann im Arbeitsraum als unbekannter Körper mit unbekannter Trajektorie interpretiert werden.

Ziel der Methode zur Gefahrenabschätzung dieser Arbeit ist somit eine zuverlässige Detektion von Veränderungen gegenüber einer Referenzumgebung, in der das Robotersystem in Betrieb genommen wurde. Abbildung 35 veranschaulicht dieses Prinzip.

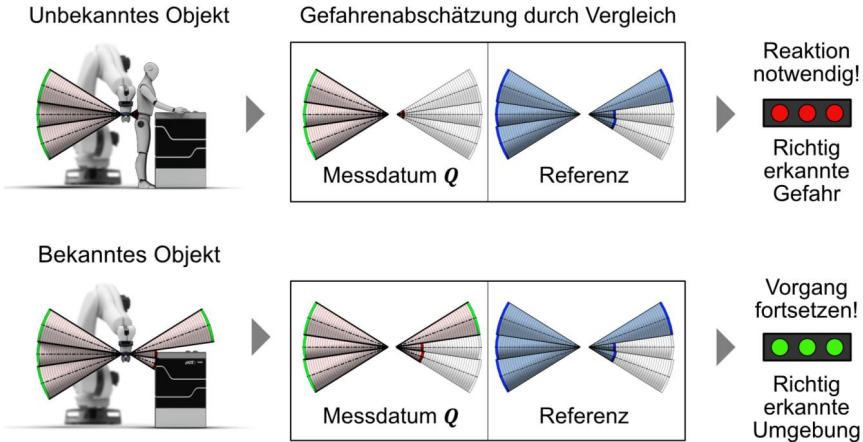


Abbildung 35: Ansatz - Das Erkennen einer Veränderung gegenüber einer Referenz.

Zur Anwendung in sicherheitskritischen Systemen, bei denen Menschen zu Schaden kommen können, genügt es nicht nur, eine binäre Entscheidung zu treffen. Eine reine Entscheidung „ja“ oder „nein“ ist nur in Idealfällen valide. Zusätzlich ist es notwendig zu wissen, wie sicher das System diese Entscheidung getroffen hat. Demnach ist es wichtig zu prüfen, wie viel Vertrauen in die Abschätzung besteht. Im Kontext von verrauschten Messwerten muss daher eine Wahrscheinlichkeit nach dem Bayes'schen Wahrscheinlichkeitsbegriff angegeben werden, ob eine Veränderung vorliegt oder nicht.

Gesucht ist die Wahrscheinlichkeit, dass die aktuelle Umgebung U_q sich gegenüber der Referenzumgebung U_M nicht verändert hat. Die aktuelle Umgebung wird mittels der ToF-Sensorik aus Kapitel 4 aus Einzelmessungen q_k repräsentiert, welche eine unabhängige Teilmenge von U_q darstellen. Die Referenzumgebung wird mittels einer Karte M repräsentiert. Beide sollen aus der gleichen physikalischen Umgebung, also dem Arbeitsraum des Robotersystems inklusive der sich darin befindlichen Körper, entstehen. Mathematisch wird für diesen Ansatz die Wahrscheinlichkeit P gesucht, dass die Umgebung U_q der Referenzumgebung U_M entspricht und beide aus der gleichen Menge aller Umgebungen \mathcal{U} stammen. Für die Gefahrenbeurteilung ist demnach zu fordern, dass diese Wahrscheinlichkeit größer ist als ein Grenzwert ξ .

$$P(U_q = U_M) > \xi$$

Formel 5-1

Die genaueren Ausformulierungen der mathematischen Überlegungen, um zu dieser Abschätzung zu kommen, werden in den folgenden Abschnitten behandelt. Die Herleitung des Verfahrens gliedert sich in drei Abschnitte: (5.3) Die Berechnungsmethode zum Erstellen einer Referenzkarte, (5.4) die mathematische Herleitung der Berechnung der Gefahrenbeurteilung und (5.5) die Adaption der Methode auf den prototypischen Greifer.

5.3 Modell und Berechnung der Referenzkarte

Reale Umgebungen als Karten zu modellieren und auf Basis von Messwerten zu berechnen, ist ein bekanntes Problem aus der Informatik, weshalb an dieser Stelle auf bestehenden Arbeiten und Ansätzen aufgebaut wird.

5.3.1 Modellierung des Arbeitsraums

Wie bereits erläutert, unterliegen Sensormessungen stets Messunsicherheiten, weshalb auch daraus erstellte Karten Ungenauigkeiten enthalten. Zur Lösung dieses Problems wurden probabilistische Karten entwickelt. Zu den verbreitetsten Verfahren zählen Occupancy Grids, welche erstmals von (Moravec & Elfes 1985) eingeführt und seitdem kontinuierlich weiterentwickelt wurden.

Für die gegebene Problemstellung bietet es sich an solch einen Ansatz zur Modellierung als „Belegtheitskarte“, aus dem Englischen als *Occupancy Grid* bekannt, zu wählen. Der Vorteil besteht darin, dass jedem Raumausschnitt eine Belegungswahrscheinlichkeit zugeordnet ist, welche einfacher mit den aktuellen Messwerten verglichen werden kann, als es z.B. mit merkmalsbasierten Karten möglich wäre. Zudem kann eine vorteilhafte Repräsentation der Achsen gewählt werden, um deutlich Rechenaufwand und damit wichtige Rechenzeit bei der Koordinatentransformation und -rotation zu sparen. Weshalb auch in dieser Arbeit der Ansatz eines Occupancy Grid als Kartenmodell verwendet wird.

Da die Menge aller möglichen Umgebungen \mathcal{U} unendlich groß ist, ist es für praktische Berechnungen notwendig, diese auf berechenbare Zustände zu diskretisieren. Dazu wird der dreidimensionale Arbeitsraum (bzw. das Arbeitsvolumen) des Roboters in äquidistante Zellen, genannt Voxel, aufgeteilt. Jedes Voxel m_n repräsentiert einen Belegungszustand der Zelle, der über eine Belegungswahrscheinlichkeit $P(m_n)$ ausge-

drückt wird. Wäre das Volumen an dieser Stelle sicher belegt, beträgt die Belegungswahrscheinlichkeit 1. Umgekehrt hat sicher freies Volumen die Belegungswahrscheinlichkeit 0. Ein Wert von 0,5 drückt demzufolge aus, dass es gleich wahrscheinlich ist, dass die Zelle frei oder belegt ist. Anders ausgedrückt: Es ist über eine solche Zelle noch keine Information vorhanden, weshalb die Unsicherheit maximal ist.

Mit diesem Kartenmodell kann der Arbeitsraum für die gegebene Problemstellung abgebildet werden. Zum Füllen des Modells mit Informationen fehlen noch: Ein Datensatz als Eingangsinformationen für die Berechnungen und die Kartenberechnung selbst.

5.3.2 Datenerfassung für die Referenzkarte

In der Anwendung kann die Referenzkarte auf zwei verschiedene Arten erzeugt werden: Einerseits aus einem 3D-Modell der Roboterzelle oder bei der Inbetriebnahme des Robotersystems vor Ort. Auch eine Kombination ist möglich, also zuerst eine ideale Karte aus 3D-Daten zu erzeugen, um diese anschließend mit realen Messwerten zu aktualisieren. Während eine aus 3D-Daten erzeugte Karte nahezu fehlerfrei ist, enthalten aufgezeichnete Karten z.B. Artefakte oder Randunschärfe. Allerdings entspricht eine aus CAD-Daten abgeleitete Karte sehr oft nicht ausreichend der realen Welt, weshalb es besser ist, die Karte nach der Inbetriebnahme aufzuzeichnen.

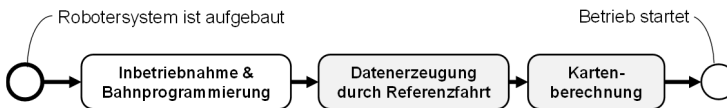


Abbildung 36: Workflow bis zur sicheren Anwendung

Der Prozess zur Kartenberechnung erfolgt, aufgrund der benötigten immensen Rechenleistung, separat nach der Datenerzeugung in einer Referenzfahrt (Abbildung 36).

Nach der finalen Inbetriebnahme der Roboterzelle erfolgt zunächst die Referenzfahrt. Hierzu wird nach der Roboterprogrammierung der Roboter gestartet und in Nullposition gefahren sowie die Sensorik aktiviert. Anschließend fährt der Roboter die geplanten Trajektorien über mehrere Zyklen ab. Wichtig ist hierbei, dass sich keine Person innerhalb des Arbeitsraums befindet (sonst wird sie mit aufgezeichnet). Optional können besonders kritische Bereiche im manuellen Modus angefahren und erkundet werden.

Während der Programmzyklen messen die Sensormodule mit den in Kapitel 4 festgelegten Parametern und übermitteln Messdatensätze an die Steuerungseinheit. Diese

werden mit den parallel übermittelten, aktuellen Positionsdaten des Greifer-TCP kombiniert und abgespeichert. Auf Basis dieses Datensatz kann die Kartenberechnung erfolgen.

5.3.3 Berechnungsmethode für die Referenzkarte

Im nächsten Schritt, der Kartenberechnung, wird diese Messdatensammlung zu einer Belegungskarte verarbeitet. Unter der Annahme der stochastischen Unabhängigkeit der einzelnen Voxel m_n wird die Karte nicht in einem Schritt berechnet, sondern das Problem zerlegt und iterativ mithilfe eines inversen Sensormodells gelöst. Das entwickelte Verfahren ist in Abbildung 37 dargestellt. Die abgebildeten Schritte werden zur Einordnung folgend kurz zusammengefasst und im Detail in den folgenden Kapiteln erörtert.

- a) Vorab muss der Arbeitsraum serialisiert werden. In Abhängigkeit von der Reichweite des Robotermodells wird ein kartesischer Raum als Karte definiert und jedes Voxel m_n mit einer Belegungswahrscheinlichkeit $P(m_n)=0,5$ initialisiert. Ein wichtiger Parameter ist die richtige Wahl der Auflösung, da diese direkt mit dem benötigten Rechenpeicher und der Rechenzeit zusammenhängt.
- b) Dem folgend wird der Datensatz aus der Referenzfahrt geladen und die Schritte iterativ für jede Messung k von jedem Sensor S_j durchschritten und die Ergebnisse jeweils in die leere bzw. aktuelle Karte integriert.
- c) Zuerst kommt eine Funktion zum Identifizieren von Messungen der Roboterkinematik zur Anwendung, da sonst das Robotersystem als Körper in der Karte hinterlegt wird. Wird das Messdatum dem Roboter zugeordnet, darf es nicht weiterverarbeitet werden.
- d) In zwei Schritten werden die für die jeweilige Messung relevanten Voxel aus dem Blickfeld identifiziert und in einem Vektor M_c gespeichert. Details zu diesem Schritt befinden sich in Abschnitt 5.3.4.2.
- e) Anschließend wird über ein inverses Sensormodell die neue Belegungswahrscheinlichkeit dieser Teilmenge von Voxeln O_c errechnet. Dieser Schritt wird in Kapitel 5.3.4.1 beschrieben.
- f) Abschließend müssen die neuen Informationen je Voxel über ein Update in die Gesamtkarte integriert werden. Dieser Schritt ist in 5.3.5 beschrieben.

g) Sind alle K Messungen aller Sensoren i und j berücksichtigt, ist die Karte fertiggestellt.

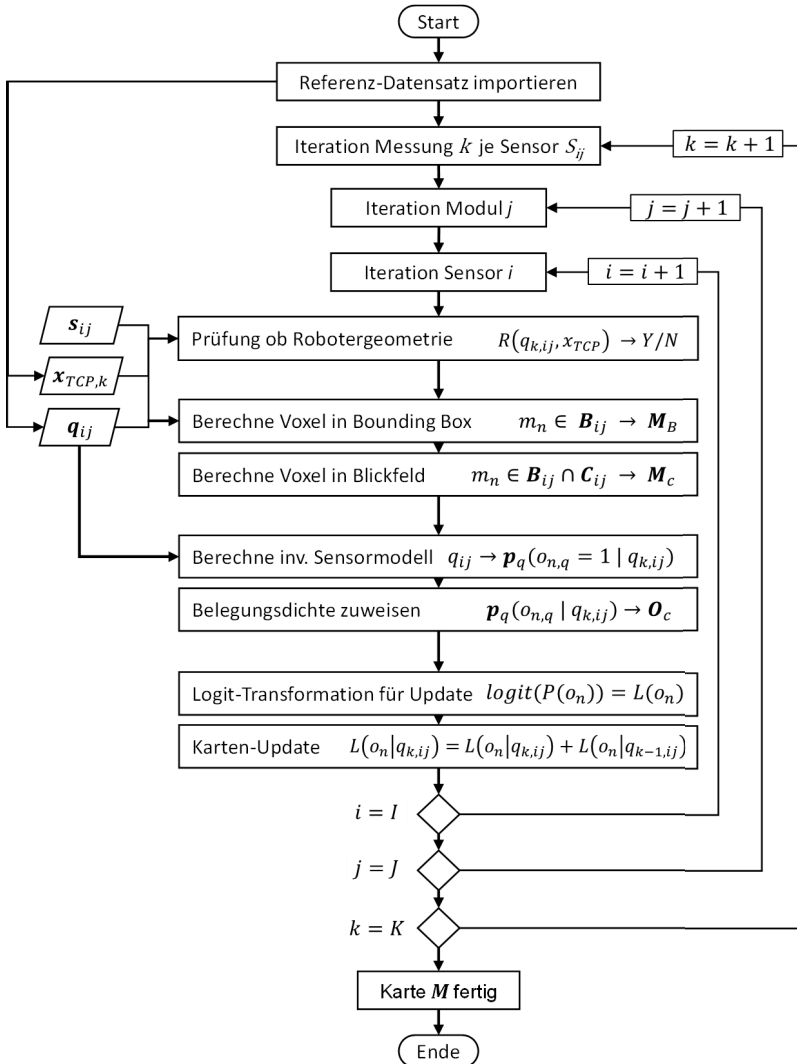


Abbildung 37: Flussdiagramm zur Berechnung der Referenzkarte

Im Folgenden wird ausgehend von dieser Übersicht das zugrundeliegende Sensormodell beschrieben und vorgestellt.

5.3.4 ToF-Sensormodell

Für die Berechnung der Karte und der Gefahrenabschätzung wird ein inverses Sensormodell benötigt, das die bedingte Wahrscheinlichkeitsdichte $P(\Phi|Q)$ für die Entfernung zum nächsten Objekt repräsentiert. Invers bedeutet, dass von der Wirkung (Messdatum Q) auf die Ursache (Eigenschaften der Umgebung Φ) abgebildet wird. Im Gegensatz zu einem direkten Sensormodell, das abbildet, wie wahrscheinlich die Wirkung (Messung) bei gegebener Ursache (z.B. Objektabstand) ist. Da das inverse Modell nur auf Grundlage des direkten Sensormodells gebildet werden kann (Roxana & Julien et al. 2017), (Ferreira & Dias 2014), wird zunächst dieses erläutert und anschließend auf das inverse Sensormodell eingegangen.

5.3.4.1 Direktes und inverses Sensormodell

Das direkte Sensormodell liefert für die betrachteten ToF-Sensoren die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(q_{ij}|\Phi)$, dass ein Messwert dem realen Abstand entspricht ohne die Voraussetzung, dass das Phänomen (die Objektposition) bekannt und sicher ist.

Aus Kapitel 4.3.2 ist bereits bekannt, dass die eingesetzten Sensoren typische Eigenschaften aufweisen, die es zu modellieren gilt: Messungenauigkeiten in Form von Rauschen, Fehlmessungen z.B. bei zu geringer Signalamplitude und Nullmessungen falls kein Objekt im Messgrenzbereich ist. Zudem muss auch die Position und Orientierung im Raum sowie Geschwindigkeit berücksichtigt werden, da der Greifer und damit die Sensorik im Raum bewegt wird. Der Messbereich im Raum ändert sich also über die Zeit, was zu zusätzlichen Unsicherheiten führt. Die probabilistische Modellierung des Sensors mit Wahrscheinlichkeiten ist in diesem Anwendungsfall daher sehr sinnvoll.

Modellansatz: Nearest-Target-Hypothese

Die charakteristischen Eigenschaften des ausgewählten Sensors *VL53L1x* lassen verschiedene Modellierungsansätze zu. In dieser Arbeit wird ein *Nearest-Target-Ansatz* (NT) betrachtet. Dieser ist robust und wirkt sich auch positiv auf die spätere Rechenzeit im Greifer aus. Zum theoretischen Vergleich wurde ein Sensormodell mit histogrammbasiertem Ansatz entwickelt, welcher allerdings erst mit angekündigten Funktionen der

nächsten Sensorgeneration validiert werden kann. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen haben gezeigt, dass es sich um Messungen mit normalverteiltem Rauschen handelt. Zusätzlich erlauben sie näherungsweise die *Nearest-Target-Hypothese*, wonach der Sensor stets den Abstand zum nächsten im Messkegel befindlichen Objekt liefert und weiter entfernte Objekte weitestgehend nicht berücksichtigt.

Eine weitere Vereinfachung (z.B. im Vergleich zu einer ToF-Kamera) ist die Winkelunabhängigkeit dieses Ansatzes. Liegt ein Objekt innerhalb des Öffnungswinkel α eines Sensors, wird zum Abstand bisher keine zusätzliche Winkelinformation genutzt. Aufgrund der strahlenförmigen Ausprägung des Blickfelds als Kegel kann das Modell weiter reduziert werden. Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung wird damit von drei auf eine abzubildende Dimension reduziert.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(d|q)$ im inversen Modell für den NT-Sensor hängt damit von den Sensoreigenschaften in Form der ermittelten Standardabweichung σ und dem gemessenen Abstand d ab. In Abbildung 38 ist zu erkennen, dass das Modell für Bereiche hinter einem Objekt keine Aussage treffen kann, da diese verdeckt sind. In diesen Bereichen wird eine Belegung von 0,5 angenommen, was gleichbedeutend ist mit keiner Aussage.

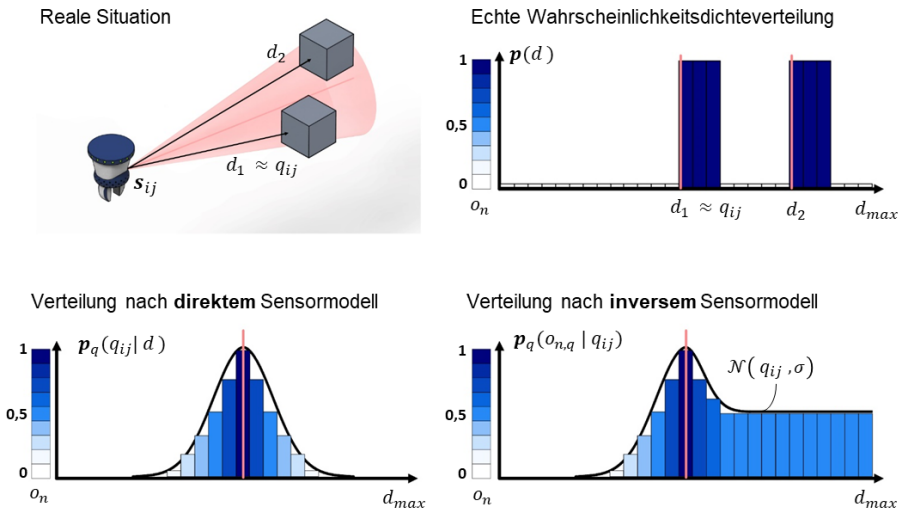


Abbildung 38: Vergleich von echter Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung mit der resultierenden Verteilung nach direktem und inversem Sensormodell.

Jedem Messwert q jedes Sensors i des Arrays eines Moduls j wird damit die abschnittsweise Normalverteilung \mathcal{N} zugeordnet, aus der die inverse Belegung errechnet wird.

$$p(o_n = 1|q) = \mathcal{N}(d, \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(q-d)^2}{2\sigma^2}} & \forall d < q \\ \frac{1}{\sqrt{8\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(q-d)^2}{2\sigma^2}} + \frac{1}{\sqrt{8\pi\sigma^2}} & \forall d \geq q \end{cases} \quad \text{Formel 5-2}$$

Im nächsten Schritt muss diese Verteilungsfunktion mit den einzelnen Voxeln der Karte über das Blickfeld des Sensors verrechnet werden.

5.3.4.2 Rasterung des Sensorblickfelds

Je nach Position des Greifer-TCP ändert sich auch die Lage und Orientierung der Sensorik und damit des erfassten Bereichs. Für die Kartenerstellung muss demnach das reale Blickfeld (engl. Field of View, FoV) jedes Sensors S_{ij} den diskretisierten Voxeln m_n zugeordnet werden. Dieser Rasterung folgt die Zuordnung des jeweiligen Belegtheitsgrads o_n gemäß der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung.

Für die Rasterung muss das Sensorblickfeld mathematisch formuliert sein. Hier wird der Ansatz eines Kugelsektors gewählt, da dieser dem realen Sensorverhalten am ähnlichsten ist. In Vorversuchen wurde diese Annahme verifiziert. Der Kugelsektor ist durch den Öffnungswinkel α und die Detektionsreichweite d_{max} vollständig definiert. Von einer Modellierung als Kugelschale mit einer zusätzlichen Mindestdetektionsreichweite, wie sie bei manchen ToF-Sensoren auftritt, wird abgesehen, weil die auftretenden Fehlerfälle bereits in der Sensordatenvorverarbeitung abgefangen werden.

Das Berechnungsverfahren für das Zusammenführen der Teilergebnisse orientiert sich grundsätzlich an der homogenen Rasterung¹² und erfolgt zweistufig: Zunächst erfolgt die geometrische Lokalisierung über einen Bounding-Box-Ansatz, anschließend erfolgt die voxelspezifische Identifikation für einen Kugelsektor, visualisiert in Abbildung 39.

¹² http://ivl.calit2.net/wiki/images/6/6b/05_RasterizationF13.pdf [31.10.2018]

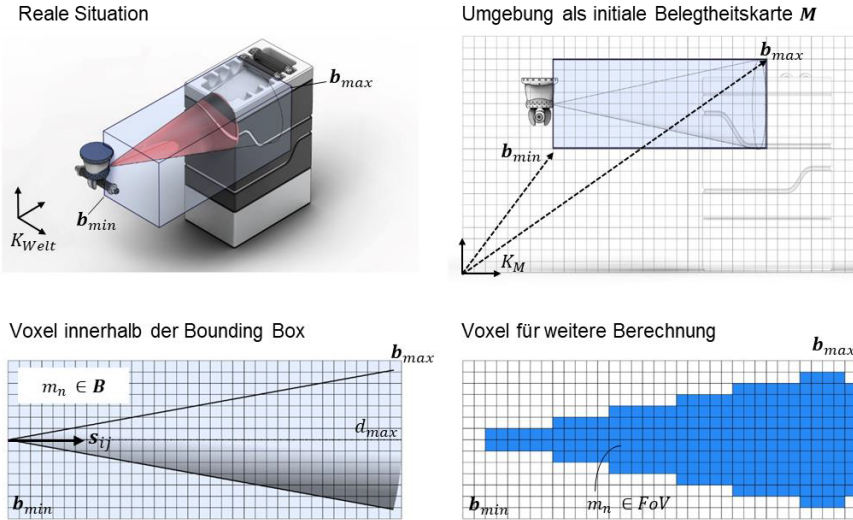


Abbildung 39: Identifikation der im Kugelsektor des FoV gelegenen Voxel über einen „Bounding-Box“-Ansatz

Die Bounding-Box B wird parallel zum Welt-Koordinatensystem des Roboters gewählt und lässt sich somit ausgehend vom Sensorursprung durch zwei zusätzliche räumliche Vektoren b_{min} und b_{max} beschreiben. Die umfassten Voxel gelten als Kandidaten für eine Aktualisierung. Anschließend wird die Bedingung aufgestellt, dass alle Voxel innerhalb der Detektionsreichweite d_{max} liegen und innerhalb des Öffnungswinkels des aufgespannten Kegels liegen. Maßgeblich sind hierbei die Volumenmittelpunkte. Über eine geometrische Berechnung werden die relevanten Voxel für das Update aus einer Messung gefunden.

Zuordnung der Belegungswahrscheinlichkeit

In Abbildung 40 wird das Verfahren für die Zuordnung der vereinfacht für den zweidimensionalen Fall dargestellt.

In Abhängigkeit des Abstands d wird jedem Voxel m_n eine bedingte Wahrscheinlichkeit gemäß der Verteilung \mathcal{N} zugewiesen, solange $d < d_{max}$ ist. Hierfür werden die Voxel nach Scheibensegmenten d_i mit der *Schrittlänge* Δd diskretisiert. Für jedes Messdatum ergibt sich demnach eine Menge an voneinander unabhängigen Belegungswahrscheinlichkeiten in der Karte.

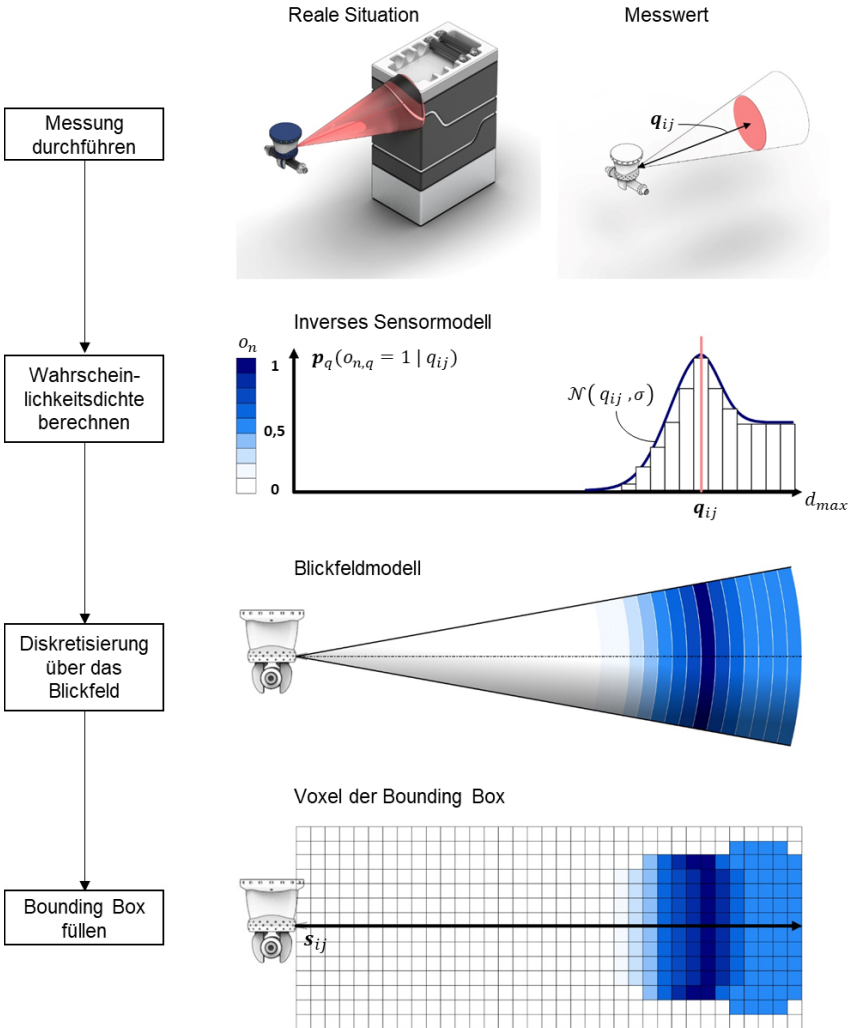


Abbildung 40: Füllen der Belegungswahrscheinlichkeiten in der Bounding Box

Bevor die Belegungswahrscheinlichkeiten je Voxel zu einer umfassenden Karte zusammengefasst werden können, muss eine Grenz- und Fehlerbetrachtung erfolgen. Im Betrieb kann nicht von einem ideal konischen ToF-Sensor ausgegangen werden. Zum Beispiel kann der Öffnungswinkel des Sichtfelds besonders in größeren Entfernungen

von dem Modell eines Kugelsegments abweichen oder die Sensorlage im Greifer unterscheidet sich aufgrund von Fertigungstoleranzen in Lage und Orientierung. Als Folge würde das Verfahren Belegtheit an Stellen vermuten, an denen kein Objekt vorhanden ist oder umgekehrt. Resultat wäre eine fehlerhafte Karte, die nicht robust genug für die tatsächliche Anwendung ist. In der Literatur wird dieses Problem als Unschärfe (engl. fuzzyness) Δ bezeichnet. In Anlehnung an (Mahmoud 2018) wird daher eine Unschärfe in das beschriebene Modell integriert.

Die Unschärfe wird mithilfe der Zugehörigkeitsfunktion $\mu(\alpha, d)$ definiert, die Messwerte auf die Zugehörigkeit des Blickfelds abbildet. Ein Objekt, welches deutlich im Blickfeld liegt, wird vollständig mit dem Wert 1 abgebildet. Ein Objekt, das genau auf dem Rand des Sensorkegels gemessen wird, wird über die Unschärfe Δ bis zum Grenzwert 0 ausgeblendet. Die Gesamtzugehörigkeit μ_{ges} setzt sich aus folgenden Funktionen zusammen:

$$\mu_{max,d}(d) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } d < (1 - \Delta)d_{max} \\ \frac{(1 + \Delta)d_{max} - d}{2\Delta} & \text{wenn } (1 - \Delta)d_{max} \leq d \leq d_{max} \\ 0 & \text{wenn } d > d_{max} \end{cases} \quad \text{Formel 5-3}$$

$$\mu_{max,\alpha}(\alpha) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } \alpha < (1 - \Delta)\alpha_{FOV} \\ \frac{(1 + \Delta)\alpha_{FOV} - \alpha}{2\Delta} & \text{wenn } (1 - \Delta)\alpha_{FOV} \leq \alpha \leq \alpha_{FOV} \\ 0 & \text{wenn } \alpha > \alpha_{FOV} \end{cases} \quad \text{Formel 5-4}$$

$$\mu_{ges} = \prod_i \mu_i \quad \text{Formel 5-5}$$

Untersuchungen in (A_Nicklas 2018) haben gezeigt, dass eine abschnittsweise definierte Trapezfunktion, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis Formel 5-5 dargestellt, über den Öffnungswinkel α ab der Mittelachse bzw. über die Detektionsreichweite d Fehlerkennungen und damit Kartenfehler effektiv vermeidet. Als robuster Wert für die Unschärfe wurde in Vorversuchen $\Delta = 0,12$ ermittelt, welcher im Folgenden verwendet wird. Abbildung 41 verdeutlicht die modellierte Unschärfe über die Wahrscheinlichkeitsdichte im Sensorblickfeld.

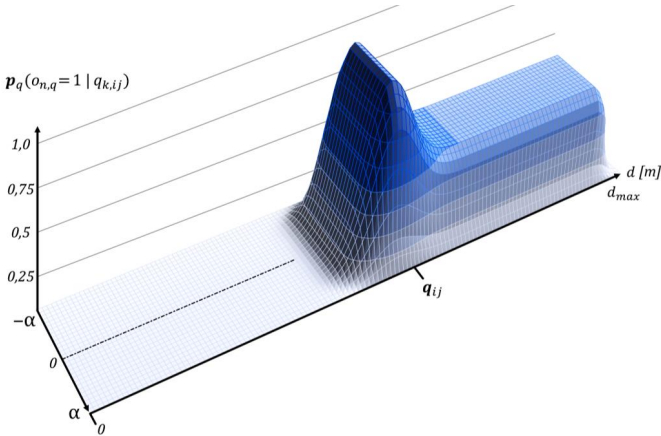


Abbildung 41: Die Auswirkung der Zugehörigkeitsfunktion auf die Wahrscheinlichkeitsdichte im Blickfeld eines Sensors

Abschließend muss die Zugehörigkeit noch mit der Belegungswahrscheinlichkeit verrechnet werden. Allerdings würde durch einfache Überlagerung beider Werte ein Fehler entstehen, da Objekte am Sensorrand fälschlicherweise als nicht belegt in die Karte eingehen. Daher wird eine korrigierte Belegungswahrscheinlichkeit P_{corr} eingeführt, welche den Fehler abfängt und die Zugehörigkeitsfunktion um den neutralen Wert des Unwissens 0,5 der Umgebung verrechnet.

$$P_{corr}(m_n) = 0,5 + \mu(P(m_n) - 0,5) \quad \text{Formel 5-6}$$

5.3.5 Aggregation zur Karte

Nach den vorangegangenen Schritten liegt für jedes Messdatum eine Liste von geschätzten Belegungswahrscheinlichkeiten je Voxel vor. Diese müssen nun in die initiale Karte eingerechnet werden.

Für die Kartenberechnung wird nach (Hornung & Wurm et al. 2013) jeweils die k -te Messung mit der $k-1$ -ten Messung über die a-priori-Wahrscheinlichkeit $P(o_n/q_{k-1})$ für die Bayes'sche Inferenz verrechnet. Die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit $P(o_n/q_{1:k})$ wird anschließend voxelspezifisch gespeichert und als neue Ausgangswahrscheinlichkeit in der Karte genutzt. Über die Nutzung einer Logit-Transformation vereinfacht sich die Berechnung zu einer Addition, welche anschließend bijektiv rücktransformiert wird.

$$\text{logit}(P(o_n)) = L(o_n) \quad \text{Formel 5-7}$$

$$L(o_n | q_{k,ij}) = L(o_n | q_{k,ij}) + L(o_n | q_{k-1,ij}) \quad \text{Formel 5-8}$$

Somit können iterativ alle Voxel der Umgebung aktualisiert werden und im Fall einer konstanten Umgebung konvergiert die Karte gegen die reale Umgebung. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten aus dem Sensormodell werden anschließend für die entsprechenden Voxel aggregiert und somit die Erkenntnisse aller Messungen miteinander in eine fertige Karte gespeichert.

5.4 Gefahrenabschätzung

Der Ansatz der Veränderungserkennung identifiziert eine potentielle Gefahr in Form eines Kollisionsobjekts durch den Abgleich mit einer bekannten, sicheren Umgebung. Die sichere Umgebung liegt, wie beschrieben, als Belegtheitskarte im Arbeitsraum des Roboters vor.

Wie in Absatz 5.2 beschrieben, ist es Ziel der Gefahrenabschätzung zu berechnen, wie stark die aktuellen Messungen von der sicheren Referenzkarte abweichen. Weicht eine Messung stärker als der zu definierende Schwellwert ξ ab, muss eine Reaktion seitens des Roboters eingeleitet werden. Im Folgenden werden zwei Ansätze für diese Veränderungserkennung aus der gemeinsamen Arbeit mit (A_Nicklas 2018) beschrieben und diskutiert.

5.4.1 Probabilistische Modellierung der Veränderung

Wie bereits in vorangegangenen Kapiteln ergibt es aufgrund der vielfältigen Unsicherheiten im Prozess Sinn, auch diesen Teilschritt des Verfahrens probabilistisch zu modellieren. Konkret wird demnach die Wahrscheinlichkeit gesucht, dass das Messdatum q_{ij} zum Zeitpunkt t in der gleichen Umgebung U gemessen wurde, aus der auch die Karte M entstanden ist. Anders formuliert: Die Wahrscheinlichkeit, dass die Umgebung zum Zeitpunkt der Messung U_q der Umgebung zum Zeitpunkt der Kartenerstellung U_M entspricht. Gemäß dem Satz der totalen Wahrscheinlichkeit lässt sich der Ansatz somit formulieren als:

$$P(U_M = U_q) = \sum_{U_n \in \mathcal{U}} P(U_n | q) \cdot P(U_n | M) \quad \text{Formel 5-9}$$

Da es schwerlich möglich ist, die Karte als Ganzes zu berücksichtigen, bietet es sich wieder an, die konkrete Berechnung in lösbarere Teilprobleme zu zerlegen. Anstatt alle Voxel der Karte im Arbeitsraum zu vergleichen, soll nur die Belegtheit je Voxel in den entsprechenden Sensorblickfeldern \mathcal{C} paarweise miteinander verglichen werden. Für alle Voxel außerhalb dieser Untermengen wird in der Methode keine Aussage getroffen. Hinsichtlich der Veränderung ist es nur relevant, ob ein Voxel belegt ist oder nicht. Daher wird jedem Voxel m_n ein Belegtheitszustand o_n zugeordnet, der nur 0 oder 1, also frei oder belegt, sein kann. Damit vereinfacht sich der Ansatz zu:

$$P(o_{n,M} = o_{n,q}) = \sum_{o_n \in \{0,1\}} P(o_n|q) \cdot P(o_n|M) \quad \text{Formel 5-10}$$

$$= P(o_n = 1|q) \cdot P(o_n = 1|M) + P(o_n = 0|q) \cdot P(o_n = 0|M)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Voxel belegt ist, entspricht gerade dem Komplement der Wahrscheinlichkeit, dass es frei ist. Mit dieser Formulierung und der Definition, dass die Belegungswahrscheinlichkeit $P(m_n)$ mit der Belegtheit o_n übereinstimmt lässt sich der Vergleich vereinfachen zu:

$$P(o_{n,M} = o_{n,q}) = P(m_n|q) \cdot P(m_n|M) + (1 - P(m_n|q)) \cdot (1 - P(m_n|M)) \quad \text{Formel 5-11}$$

Dieser Ansatz muss nun auf die ToF-Sensoren adaptiert werden. Jedes Messdatum wird dafür zunächst wieder über das bereits in Kapitel 5.3.4 erläuterte, inverse Sensormodell auf eine Wahrscheinlichkeitsdichte $p(m_n/q)$ abgebildet.

Die im Sensorring eingebundenen VL53L1x Sensoren werden so betrieben, dass keine Ortsinformationen quer zur Längsachse des Blickfelds übergeben werden. Es wird nur ein Messwert nach der Nearest-Target-Hypothese übergeben. Der Erwartungswert ist als Distanz zum nächsten Objekt zu interpretieren, daher wird für diese Sensorklasse ein eindimensionaler Ansatz verwendet.

5.4.2 Aggregation der Karteninformationen

Zum Vergleichen mit der eindimensionalen Wahrscheinlichkeitsdichte aus dem Sensormodell müssen auch die relevanten Voxel aus der dreidimensionalen Belegtheitskarte zu einer eindimensionalen Funktion $p(m_n/M)$ aggregiert werden. Die Auswahl der

betreffenden Voxel m_n aus der Karte erfolgt invers zum beschriebenen Bounding-Box-Verfahren, vereinfacht visualisiert in Abbildung 42.

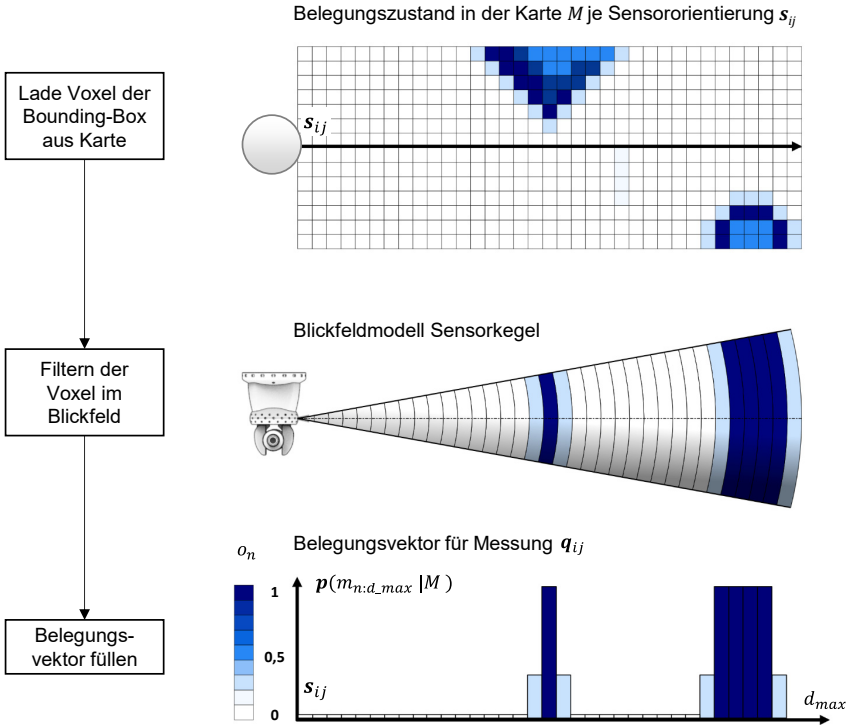


Abbildung 42: Aggregation der Karteninformationen zu einem Vektor

Im nächsten Schritt werden die Belegungswahrscheinlichkeiten $P(m_n/M)$ je Distanzschritt Δd bis zur Detektionsreichweite d_{max} nach dem Maximalprinzip aggregiert. Das bedeutet, dass je Kugelschalensegmentschritt Δd ein einziges belegtes Voxel dominant für das Resultat ist. Ergebnis ist ein Vektor $p(m_{0:d_{max}}/M)$ von aggregierten Voxeln und deren Belegungsstatus o_n .

5.4.3 Vergleich der Belegungswahrscheinlichkeiten

Für die abschließende Entscheidung, ob eine Veränderung der Umgebung vorliegt, müssen beide Folgen voxelweise verglichen werden. Klassisch werden dazu sogenannte Pooling-Funktionen verwendet. Für die Entscheidung, wie wahrscheinlich eine Veränderung ist, müssen verschiedene Eigenschaften wie die Indifferenzerhaltung berücksichtigt werden. Diese besagt, dass Bereiche ohne Erkenntnis, deren Belegungszustand also $o_n = 0,5$ ist, keinen Einfluss auf die Entscheidung haben dürfen. Ebenso werden Vergleichspaare für eine Entscheidung schwächer gewichtet, wenn beide Voxel nicht belegt sind. Ansonsten würden Objekte in großer Entfernung stets eine hohe Übereinstimmung erzielen.

Untersuchungen von Nicklas (A_Nicklas 2018) haben gezeigt, dass eine konsensuelle Vergleichsfunktion nach Formel 5-12 im Vergleich zu anderen mathematischen Ansätzen die robustesten Ergebnisse für das Pooling erzeugt.

$$P(U_q = U_M) = \frac{\prod_n P(o_{n,q} = o_{n,M})}{\prod_n P(o_{n,q} = o_{n,M}) + \prod_n (1 - P(o_{n,q} = o_{n,M}))} \quad \text{Formel 5-12}$$

$$\forall n : P(o_n|q) > 0,5 \vee P(o_n|M) > 0,5$$

Hierbei wird die Veränderungswahrscheinlichkeit als normiertes Produkt der Voxelpaarungen $m_{n,q} = m_{n,M}$ und deren Übereinstimmungswahrscheinlichkeiten nach Formel 5-12 berechnet. Allerdings werden nur Voxelpaare herangezogen, wenn mindestens ein Voxel mit Belegungswahrscheinlichkeit $>0,5$ entweder aus der Karte oder aus der Messung gefunden wird.

Mit diesem letzten Schritt sind alle mathematischen Überlegungen geschaffen, um die Wahrscheinlichkeit einer Veränderung und damit z.B. die Präsenz eines Menschen im Arbeitsraum des Roboters als Gefahr zu erkennen. Im Folgenden ist wichtig zu diskutieren, wie die Teilschritte zu einem von der Greifersteuerung ausführbaren Verfahren kombiniert werden können.

5.5 Umsetzungsvarianten des Verfahrens

Im Kern intelligenter Komponenten der Industrie 4.0 liegt die Fähigkeit komplexere Probleme zu lösen als klassische elektrische Schaltungen. Dennoch sind auch hier die

Rechenleistungen begrenzt. Da Greifer aufgrund der kompakten Bauweise keine leistungsfähigen Computer integriert haben, muss dies bei der Umsetzung der Konzepte in zeitkritischen Sicherheitsanwendungen beachtet werden.

Daher wird im Folgenden zunächst ein Ansatz diskutiert, der die vorangegangenen Teillösungen mathematisch online (zur Laufzeit) abbildet und ein Ansatz der für eine Anwendung im Greifer adaptiert ist.

5.5.1 Online-Berechnungsverfahren

Für den Ansatz als Online-Verfahren werden die Teilschritte zur Gefahrenabschätzung mathematisch stringent umgesetzt und online, also während des Betriebs, kontinuierlich berechnet. Die in Kapitel 4 entworfene Systemarchitektur für den Greifer wird vorausgesetzt. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Belegtheitskarte bereits aus einer Referenzfahrt generiert ist.

Mit Beginn des Programmstarts des Roboters in der Anwendung startet auch ein Überwachungszyklus, der nach den Echtzeitanforderungen aus Abschnitt 0 auf 7 Millisekunden begrenzt ist. Das Verfahren ist in Abbildung 43 dargestellt und geht folgende Schritte durch:

- a) Nach dem Start wird zunächst die Matrix \mathbf{Q} mit dem aktuellsten Datensatz zum Takt k je Sensor S_{ij} und die Lage und Orientierung des Tool-Center-Points \mathbf{x}_{TCP} geladen.
- b) Iterativ je Modul und Sensor wird anschließend die Lage des Sensorkegels s_{ij} im Raum über eine Koordinatentransformation berechnet. Über das beschriebene Bounding-Box-Verfahren wird ein Tensor betroffener Voxel \mathbf{C}_{ij} erstellt und mit der geometrischen Lage des Sensorkegels überlagert. Ergebnis ist eine Matrix \mathbf{M}_c der zu überprüfenden Voxel.
- c) Anschließend wird diese Matrix mit den entsprechenden Belegungswahrscheinlichkeiten aus der Karte aktualisiert und zu \mathbf{O}_c zusammengefasst.
- d) Über das beschriebene Aggregationsverfahren werden die Informationen aus dem Tensor \mathbf{O}_c in den eindimensionalen Vektor überführt.
- e) Der aktuelle Messwert wird im nächsten Schritt über das inverse Sensormodell ebenfalls auf einen Vektor abgebildet.
- f) Über die adaptierte Bayes'sche Wahrscheinlichkeit werden nun beide Vektoren miteinander verrechnet.

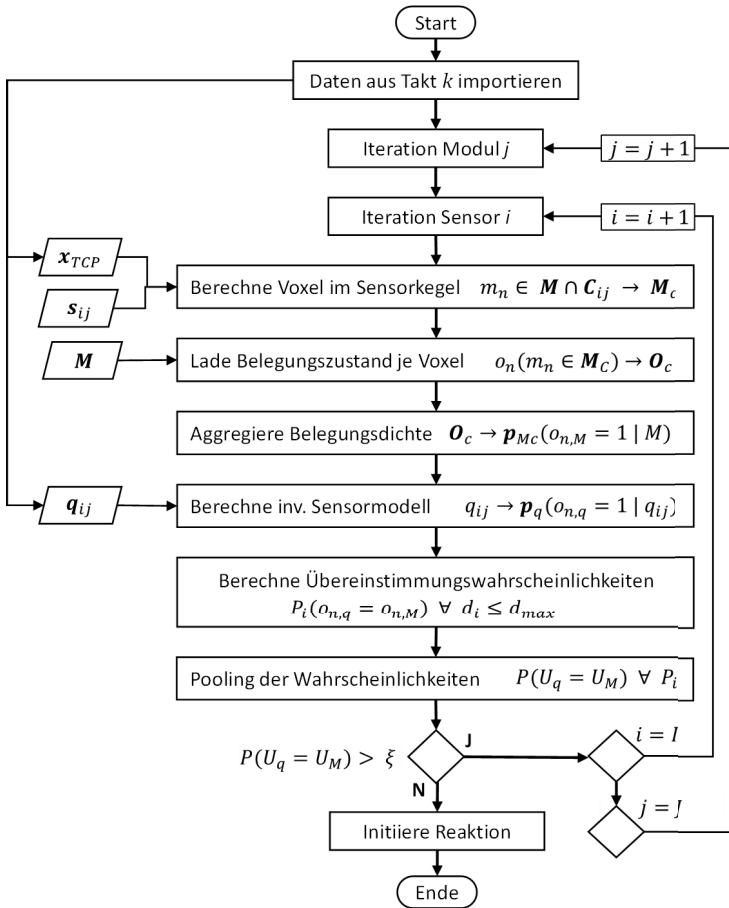


Abbildung 43: Flussdiagramm des Online-Berechnungsverfahrens

- g) Abschließend wird aus dem resultierenden Vektor mittels Pooling die Wahrscheinlichkeit, dass beide Messungen aus der gleichen Umgebung stammen berechnet.
- h) Abschließend wird die resultierende Wahrscheinlichkeit mit dem notwendigen Grenzwert ξ verglichen. Wenn der Wert zu gering ist, wird ein Signal ausgelöst, das eine Reaktion des Roboters durch den Greifer einleitet.

Wenn die Wahrscheinlichkeit einer sicheren Umgebung hoch genug ist, wird mit dem nächsten Sensor S_{i+1} die nächste Iteration durchgeführt.

Der Vorteil dieser Variante ist die sehr exakte Berechnung, da nur wenige Vereinfachungen angenommen werden müssen und z.B. mit exakten Ortsdaten gerechnet werden kann. Ein großer Nachteil ist der immense Rechenbedarf aufgrund der vielen geometrisch komplexen Berechnungsschritte wie der Rasterung des Blickfelds sowie des großen betroffenen Überwachungsraums (und damit hohen Anzahl Voxel) um den Greifer. Ein herkömmlicher Einplatinencomputer, wie er in der Architektur verwendet wird, benötigt allein für eine Iteration eine Rechenzeit von etwa 7,5ms pro Sensor! Die Zykluszeit wäre zu groß und damit die Sicherheit des Verfahrens nicht gewährleistet. Als Lösung müsste eine zusätzliche Recheneinheit in der Architektur vorgesehen werden. Zum Beispiel ein leistungsstarker lokaler Rechner. Um diesem Nachteil zu begegnen, wird folgend der Ansatz einer Lookup-Tabelle als Schwellwertkarte vorgeschlagen.

5.5.2 Schwellwert-Karte

Ziel dieser Variante ist es, die notwendigen Onlineberechnungen auf ein Minimum zu reduzieren, indem Teiloperationen vorberechnet und durch einen Speicherzugriff in eine Lookup-Tabelle (LUT) ersetzt werden. Damit kann die benötigte Rechenzeit bis in den μs Bereich gesenkt werden. Die aufwändigsten Berechnungen des vorgestellten Verfahrens sind die Schritte b) und c). Die größte Aufwandsersparnis lässt sich über eine injektive Hashfunktion erzielen, welche alle Variablen eines Eingangsdatums auf eine möglichst kleine Menge Zielvariablen abbildet. Im gegebenen Fall wird die Lage- und Orientierung des Sensors S_{ij} im Arbeitsraum und dem aktuellen Messwert q_n auf die Wahrscheinlichkeit einer Veränderung P abgebildet.

Damit ist die Zielmenge bei konstantem Schwellwert für die Veränderung einfach binär beschreibbar: Entweder es liegt eine Gefahr vor oder es liegt keine Gefahr vor. Die Lage und Orientierung kann aufgrund der Symmetrie des Blickfelds auf drei kartesische Lagekoordinaten (x,y,z) und zwei Kugelkoordinaten (α,β) reduziert werden. Die gesuchte Hashfunktion τ bildet daher einen sechsdimensionalen Raum auf einen Skalar ab.

$$\tau : \left\{ \mathbb{R}^3 \times [0, 2\pi) \times \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right) \times \mathbb{Z} \right\} \rightarrow \{0,1\} : (x, y, z, \alpha, \beta, q) \rightarrow R_{LUT} \quad \text{Formel 5-13}$$

Bei der Umsetzung muss beachtet werden, dass für jede denkbare Messsituation ein Ergebnis vorberechnet werden muss. Dies würde bei infinitesimalen Intervallen für den Arbeitsraum den Speicherplatzbedarf in der Steuerung des Greifers unendlich werden lassen. Die realwertigen bzw. ganzzahligen Eingangsvariablen müssen daher diskretisiert werden. Die Auflösung der Prä-Intervallbildung ist begrenzt durch den verfügbaren Arbeitsspeicher der Recheneinheit der Greifersteuerung. Bei dem verwendeten 32-Bit System sind dies bis zu 2^{16} Bit (2GB) Speicherplatz, was, bei den getroffenen Genauigkeitsanforderungen aus Kapitel 0, die Winkelauflösung im Arbeitsraum eines *Kuka KR 180 R2700* auf 5° und die Längenauflösung auf 5cm begrenzt.

Bei dieser Größe des Arbeitsraums und Kartenauflösung sind trotzdem mehrere Millionen Variablenkombinationen zu berechnen. Eine Greifer-Steuerung wäre mehrere Wochen mit der Berechnung ausgelastet, was für eine Anwendung unbrauchbar ist. Daher wurden in (A_Nicklas 2018) mehrere Kernel-Algorithmen entwickelt, um die beschriebenen Berechnungen in wenigen Stunden auf der Grafikkarte eines Inbetriebnahme PCs rechnen zu können. (*Anmerkung: Aufgrund der Komplexität wird auf eine genauere Beschreibung an dieser Stelle verzichtet und auf Literatur aus dem Bereich der Kernel-Entwicklung verwiesen.*)

Als Ergebnis der Vorberechnung steht eine Matrix M_{LUT} zur Verfügung, die jeder diskreten Variablenkombination im Arbeitsraum, bei gegebenen Veränderungsgrenzwert ξ , das diskrete Ergebnis R_{LUT} zuweist, ob eine Veränderung der Karte stattgefunden hat oder nicht.

Das zur Laufzeit auszuführende Berechnungsverfahren zur Gefahrenabschätzung auf dem Greifer vereinfacht sich mittels Schwellwertkarte signifikant, was in Abbildung 44 ersichtlich ist.

Wie zuvor wird zunächst das Programm gestartet und importiert den Vektor mit dem aktuellsten Satz Mess- und Roboterdaten. Die Verarbeitung erfolgt wieder iterativ je Sensormesswert.

Im Gegensatz zu den aufwändigen Berechnungen des online Verfahrens wird lediglich der Speicherplatz-Index in der Schwellwertkarte für die jeweilige Variablenkombination ermittelt. Anschließend kann das Ergebnis über einen Speicherzugriff auf die Schwellwertkarte ermittelt werden. Ist die Wahrscheinlichkeit, dass beide Messungen aus der

gleichen Umgebung stammen höher als der Schwellwert, wird mit dem nächsten Sensor fortgefahren. Tritt eine Veränderung auf, wird ein Signal ausgelöst, das eine Reaktion des Roboters durch den Greifer einleitet.

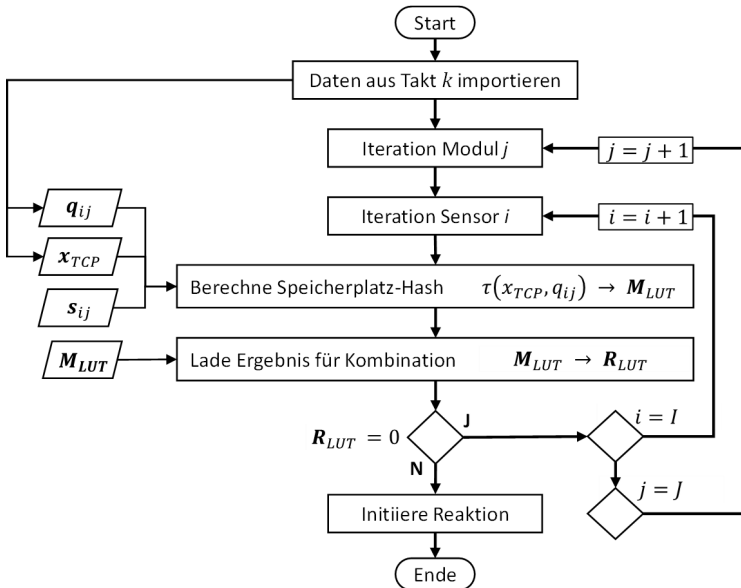


Abbildung 44: Flussdiagramm des Schwellwertverfahrens

Zusammenfassend wurden für die Methode zur Gefahrenabschätzung zwei Varianten hergeleitet und entwickelt. Gemäß dem Vorgehen im V-Modell werden die Verfahren in Kapitel 7 zunächst über eine Software-in-the-Loop Umgebung getestet und charakterisiert. Anschließend erfolgt die Validierung im Gesamtsystem.

5.6 Zusammenfassung

Zunächst wurde die Problemstellung genauer spezifiziert und eingegrenzt: Zur Vermeidung einer Kollision mit dem Greifer ist es nicht ausreichend das Eindringen eines beliebigen Objekts in eine definierte Schutzzone zu überwachen, vielmehr muss unterschieden werden, ob es sich um eine Gefahrensituation handelt oder nicht.

Nach Diskussion verschiedener Lösungsansätze für diese Gefahrenabschätzung wurde ein eigener Ansatz auf Grundlage der Bayes'schen Wahrscheinlichkeit (Inferenz) vorgestellt, um auf Veränderungen zu einer initialen Referenzumgebung zu reagieren.

Für die Umsetzung des Ansatzes waren drei Schritte notwendig: (1) Die Berechnung einer Referenzkarte, (2) eine Methode zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Gefahrensituation sowie (3) die Adaption der Methode auf den prototypischen Greifer.

- 1) Zunächst wurde die Modellierung und Berechnungsmethode zum Erstellen einer Referenzkarte hergeleitet. Mithilfe der Methode können Sensordaten der in Kapitel 4 ausgewählten Sensorik in eine Belegungskarte aggregiert werden. Darin enthalten sind das direkte Sensormodell und ein an die Problemstellung angepasstes Vorgehen zur korrekten Abbildung der Belegungswahrscheinlichkeiten.
- 2) Anschließend wurde ein probabilistisches Online-Berechnungsverfahren entwickelt, um die jeweils aktuellen Messungen der Sensoren mit den Daten der Referenzkarte zu vergleichen. Zu diesem Zweck musste zunächst mathematisch ein inverses Sensormodell auf Grundlage eines direkten Sensormodells hergeleitet werden. Für die Methode wurden zwei verschiedene Ansätze ausgearbeitet: die Schwellwerttabelle und die Online-Berechnung für IT-Architekturen mit höherer Leistung.
- 3) Für IT-Architekturen mit geringer Rechenleistung, wie bei der Integration in einen Greifer der Fall, wurde eine alternative Variante des Berechnungsverfahrens entwickelt. Dieses nutzt eine Hash-Funktion mit einer Lookup-Tabelle und kann damit die Rechenzeit signifikant verkürzen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass alle drei Berechnungsmethoden in Kapitel 7 charakterisiert werden müssen und die geeignetste Variante im Gesamtsystem validiert werden muss.

Nach der Umgebungserfassung (Kapitel 4) und der Gefahrenbeurteilung (Kapitel 5) bleibt als drittes Teilsystem zur Funktionserfüllung die Kollisionsvermeidung in Kapitel 6.

6 Kollisionsvermeidung für intelligente Greifer

Der letzte Teilschritt zur Vermeidung von Kollisionen zwischen Mitarbeitern und Endeffektoren ist die Berechnung einer Reaktion auf Gefahrensituationen möglichst unter Aufrechterhaltung des Handhabungsprozesses.

Die Sicherheit der Mitarbeiter hat oberste Priorität, daher gilt es einen Zusammenstoß zu jeder Zeit zu vermeiden. Untergeordnet, aber dennoch wünschenswert, ist die Aufrechterhaltung des Prozesses und damit der Produktivität. Die grundlegende Fragestellung ist folgende: Auf welche Weise kann ein intelligenter Greifer im Verbund mit dem Robotersystem auf eine erkannte Gefahrensituation reagieren und möglichst die Anwendung weiterhin ausführen?

6.1 Problemeingrenzung

Die Fragestellung lässt sich unmittelbar in zwei Aspekte aufteilen: (1) die Berechnungsverfahren der Reaktion selbst und (2) die Steuerungsarchitektur zur Umsetzung. Die Berechnung stellt das Verhalten des Gesamtsystems in den Fokus: Begonnen beim obligatorischen Stopp des Roboters bis zur temporären Übernahme der Kontrolle durch den Greifer zum Ausweichen. Es werden im Weiteren verschiedene Ansätze diskutiert und konkrete Methoden zur Umsetzung ausgearbeitet.

6.1.1 Annahmen und Randbedingungen

Eine prognostizierte Kollision ist mathematisch betrachtet ein zukünftiger Schnittpunkt zwischen mindestens zwei Körpern, die sich auf Trajektorien durch einen Raum bewegen. Im betrachteten Fall sind dies der Roboter und der Mensch. Zur Vermeidung und Umfahrung muss demnach mindestens eine Trajektorie geändert werden.

Der Mensch kann über visuelle und akustische Signale auf eine nahende Kollision aufmerksam gemacht werden, jedoch handelt es sich dabei lediglich um hinweisende Sicherheit. Ziel ist daher, dass das Robotersystem seine Trajektorie aufgrund der Informationen des Greifers verändert und um den Mensch herum fährt. Hieraus ergeben sich besondere Annahmen, welche an die Robotersteuerung gestellt werden müssen.

6.1.1.1 Robotersteuerung

Mit Fokus auf den intelligenten Greifer ergibt sich eine besondere Herausforderung. Die Kontrolle über die Robotertrajektorie hat im industriellen Umfeld klassisch eine proprietäre Robotersteuerung. Nur diese hat Zugriff auf die Achsen der Kinematik und kann die Bewegung des Roboters aktiv verändern.

Damit eine geteilte Steuerung gemäß des beschriebenen Ansatzes möglich ist, muss folgende Annahme getroffen werden: Es wird im Folgenden vorausgesetzt, dass eine Robotersteuerung den Zugriff einer externen Signalquelle auf die Achsregelung der Kinematik ermöglicht. Dies ist zum Beispiel für Roboter der Hersteller *KUKA Roboter GmbH*, *ABB Ltd.*, und *Universal Robots A/S* der Fall (Stand 2020).

In dieser Arbeit wird stellvertretend eine Robotersteuerung der Firma *KUKA Roboter GmbH* vom Typ *KRC4* mit der Schnittstelle *Robot Sensor Interface (RSI)* verwendet. Der verwendete Manipulator hat eine 6-Achsen-Knickarmkinematik mit Positionsregelung. Diese Kinematik- und Regelungsart ist weit verbreitet, womit der Ansatz dieser Arbeit sehr leicht auf weitere Modelle übertragbar ist. Robotertypen mit Impedanzregelung (Kraftregelung) wurden nicht betrachtet, sind aber häufig auch fähig zur Positionsregelung, wie z.B. Modelle vom Typ *KUKA iiwa* oder *Franka Emika Panda*.

6.1.2 Anforderungen aus den Risikofällen

Der Zweck der Reaktion ist die Vermeidung eines Zusammenstoßes zwischen Greifer und Mensch. Daher wird das Szenario aus Risikofall A betrachtet. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Gefahrenabschätzung aus Kapitel 5 ein Signal für eine Reaktion ausgelöst hat. In der betrachteten Anwendung werden als vorhandene Körper der Mensch, als unbekanntes Objekt das Robotersystem und bei Bedarf verschiedene Umgebungsobjekte angenommen. Die Umgebung innerhalb der Roboterzelle ist statisch und verändert sich nicht.

Anforderungen an die zu entwickelnde Methode sind: (1) Zu jedem Zeitpunkt einen Mindestabstand S_{min} zwischen Mitarbeiter und Greifer inkl. Werkstück einzuhalten und (2) wenn möglich den Handhabungsprozess trotz eines Hindernis auf der geplanten Trajektorie weiterzuführen.

6.2 Eigener Ansatz zur Kollisionsvermeidung

Als Vorüberlegung sollen die Optionen des Greifers am Roboter nach dem Erkennen eines Hindernisses erörtert werden: Wird die Gefahr rechtzeitig erkannt, hat der Greifer mehrere Optionen, um einen Unfall zu vermeiden und weiterzufahren.

- Option 1: Rechtzeitig bis zum Stillstand abbremsen und warten bis das Hindernis die Trajektorie nicht mehr blockiert.
- Option 2: Rechtzeitig bis zum Stillstand abbremsen, ein Umfahren des Hindernis bewerten und anschließend ausführen.
- Option 3: Ein Umfahren des Hindernisses bewerten und mit reduzierter Geschwindigkeit umfahren.

Zur Veranschaulichung dient das Szenario aus Risikofall A, dargestellt in Abbildung 45:

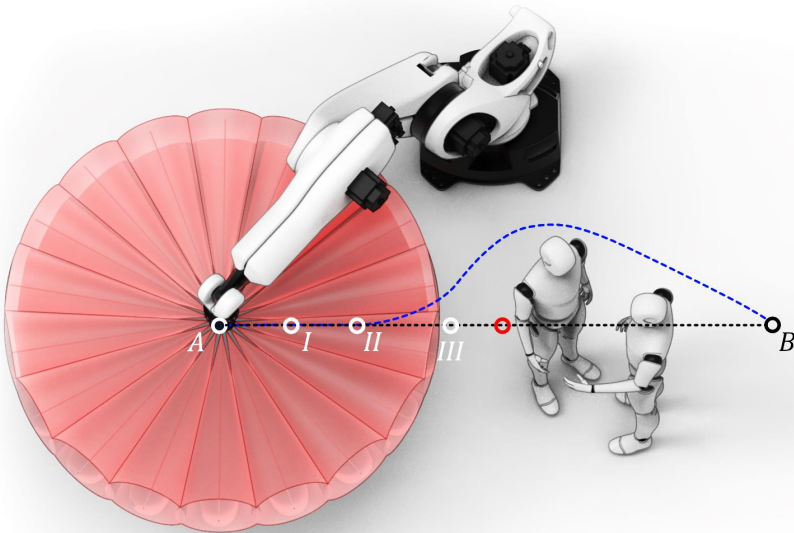


Abbildung 45: Schematische Darstellung der Szene und Optionen für die Reaktion auf ein Hindernis

Der TCP wird vom Roboter von Punkt A nach Punkt B auf der schwarzen Trajektorie bewegt. In Punkt I wird das Hindernis zum ersten Mal erfasst und in Punkt II wird die Reaktion eingeleitet. Die Zeit dazwischen kann als Reaktionszeit betrachtet werden, in

der die Entscheidung über eine der drei beschriebenen Optionen gefällt werden muss. Spätestens in Punkt III müsste eine Notbremsung eingeleitet werden, um bis zum roten Punkt zum Stillstand zu kommen und eine Kollision zu vermeiden. Blau dargestellt ist eine veränderte Trajektorie, um das Hindernis zu umfahren und zum Ziel zu gelangen.

Option 1 ist (bei statischen Hindernissen) die sicherste Option, aber die Fahrt kann erst nach dem Entfernen des Hindernisses fortgesetzt werden. Option zwei und drei setzen eine vorausschauende Bewertung der Situation voraus. Genauer: Das Hindernis muss möglichst früh wahrgenommen werden, um die folgenden Schritte auszuführen:

1. Den Geschwindigkeitsunterschied und die verbleibende Zeit zu schätzen.
2. Eine sofortige Notbremsung evaluieren.
3. Eine kontrollierte Geschwindigkeitsänderung einleiten.
4. Prüfen, ob eine Ausweichbewegung möglich ist und diese ausführen.

Analog zu diesen Überlegungen wird der Ansatz zur Kollisionsvermeidung aus Sicht des Endeffektors am Roboter entworfen. Dargestellt in Abbildung 46.

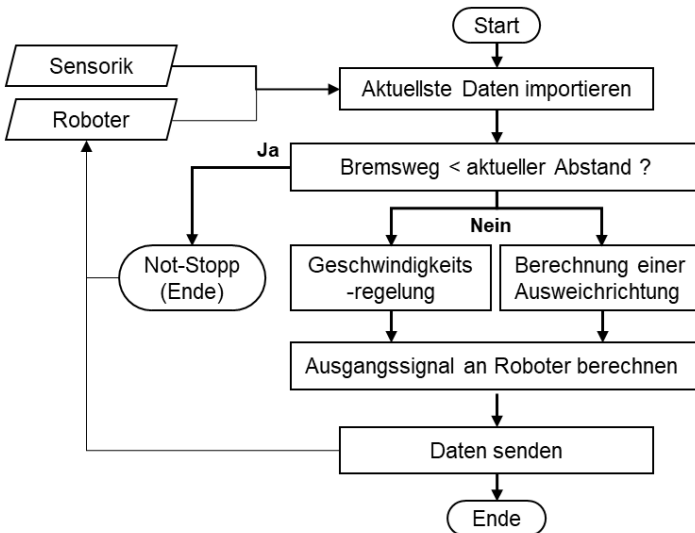


Abbildung 46: Flussdiagramm für die Systemreaktion auf eine Gefahr

- a) Im ersten Schritt werden vom Greifer die aktuell verfügbaren Ist-Daten geladen bzw. mithilfe getroffener Annahmen errechnet. Im vorliegenden Fall handelt es sich um Positions- und Bewegungsdaten des Roboters sowie die Abstände zur Umgebung.
- b) Anschließend muss schnellstmöglich geprüft werden, ob eine Kollision überhaupt noch vermieden werden kann oder ein sofortiger Not-Stopp (Kat. 0) eingeleitet werden muss, um zumindest die kinetische Energie und damit den Impuls auf den Mensch so weit wie möglich zu reduzieren. Mathematisch formuliert: Ist der aktuelle Abstand bereits geringer als der sichere Mindestabstand? Mit dieser Frage beschäftigt sich Kapitel 6.3.
- c) Ist dies nicht der Fall, kann entweder die Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand geregelt werden oder für ausreichend große Abstände eine aktive Hindernisumfahrung berechnet werden. Je nach Modus werden unterschiedliche Berechnungs- bzw. Regelstrategien verwendet. Kapitel 6.4 erläutert die Ansätze der Geschwindigkeitsregelung. In Kapitel 6.5 werden zwei Methoden zum Berechnen einer Ausweichbewegung hergeleitet.
- d) Abschließend müssen die neuen Soll-Daten an den Roboter übermittelt werden, um die Reaktion einzuleiten. Hierfür wird die notwendige Systemarchitektur entworfen und vorgestellt. (siehe Kapitel 6.6)

In den folgenden Abschnitten werden diese beschriebenen Schritte genauer erläutert, entsprechende Berechnungsmethoden entworfen und anschließend untersucht.

6.3 Abstandsüberwachung

Aus dem Stand der Technik ist die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung bereits bekannt. Als Grundsicherung findet diese Form der Kollaboration daher auch in dieser Methode Anwendung. Dies erleichtert später ebenfalls die Zertifizierung eines solchen Systems. Aus wissenschaftlicher Sicht werden zudem weitere Annahmen getroffen, um die realen Einsatzgrenzen zu untersuchen.

Als Grundbaustein der Kollisionsvermeidung wird eine geschwindigkeitsabhängige Abstandsprüfung in die Methode etabliert. Unterschreitet das unbekannte Objekt den sicheren Mindestabstand zum Endeffektor, wird eine sofortige Bremsung ausgeführt. Um diese Bewertung durchführen zu können, müssen Annahmen bzgl. der Bewegungen und Bremswege von Roboter und Mensch getroffen werden.

6.3.1 Modellierung des Menschen

In (Lemmerz & Kuhlenkötter 2022) konnte bereits gezeigt werden, dass sich die zu konservative Abschätzung der Geschwindigkeit des Mitarbeiters negativ auf die Produktivität von MRK-Anwendungen auswirkt. In dieser Arbeit werden daher verschiedene Fälle unterschieden. Da im vorliegenden System die Geschwindigkeit des Menschen nicht erfasst werden kann, müssen entsprechende Annahmen getroffen werden.

Fall H1: Mensch läuft aktiv in das Robotersystem

Nach (DIN ISO/TS15066) läuft der Mensch blind mit voller Geschwindigkeit $v_H = 1\text{m/s}$ in den Roboter hinein, ohne selbst abzubremesen. Der vom Mensch in Richtung Roboter zurückgelegte Weg wird nach Formel 6-1 angenommen, wobei sich der Mensch konstant mit Schrittgeschwindigkeit auf den Roboter zubewegt und letztendlich unweigerlich mit dem Endeffektor zusammenstößt. Maßgeblich ist hierbei, dass der Roboter zum Zeitpunkt der Kollision bereits zum Stillstand gekommen ist, daher wird für den Weg des Menschen S_{H1} die zurückgelegte Strecke über die Dauer des Stopps des Roboters T_R gewählt.

$$S_{H1} = v_H \cdot T_R \quad \text{Formel 6-1}$$

Fall H2: Der Mensch bemerkt den Greifer und stoppt seine Bewegung

Alternativ soll angenommen werden, dass der Mensch den Roboter ebenfalls wahrnimmt und die eigene Bewegung bremst. Diese Einschätzung wird z.B. durch ein akustisches oder visuelles Signal aufgrund der Detektion des Menschen durch den Greifer unterstützt. Der Bremsweg eines Menschen aus einer normalen Gehgeschwindigkeit von $1,12\text{m/s}$ ist empirisch ermittelt bei normalem Schuhwerk $0,487\text{m}$ und die Anhaltezeit beträgt $1,57\text{s}$ (Menant & Steele et al. 2009). Umgerechnet auf eine zu Fall H1 vergleichbare Ausgangsgeschwindigkeit von $v_H = 1\text{m/s}$ ergeben sich, bei der Annahme konstanter Verzögerung, die Anhaltezeit und der Bremsweg S_{H2} des Menschen nach Formel 6-2 mit der ermittelten Verzögerungsrate von $a_H = -0,632\text{m/s}^2$. (Hinweis: Die Reaktionszeit ist in den Versuchen schon berücksichtigt.) Angaben für die menschliche Geschwindigkeit seitwärts oder rückwärts konnten nicht ermittelt werden.

$$S_{H2} = -a_H \cdot (T_R)^2 + v_H \cdot T_R \quad \text{Formel 6-2}$$

Fall H3: Mensch steht und bewegt sich nicht

Als dritter Fall wird ein stehender Mensch betrachtet, der z.B. gerade nicht in Richtung des Roboters schaut oder abgelenkt ist. In diesem Fall gilt $S_{H3} = 0m$.

Der zweite wichtige Summand in der Berechnung des notwendigen Sicherheitsabstands ist der Bremsweg des Roboters, welcher in folgenden betrachtet wird.

6.3.2 Bremsweg des Roboters

Als Bremsweg des Roboters wird in dieser Arbeit der zurückgelegte Weg des Endeffektors, genauer gesagt des TCP, betrachtet. Zusätzlich müssen verschiedene Varianten der Verzögerung unterschieden werden.

6.3.2.1 Nicht bahntreue Bremsung

Der Bremsweg bei Industrie-Sechssachsrobotern hängt u. A. von der Stopp-Kategorie und der Interpolationsart ab. Bei Punkt-zu-Punkt (PTP) Fahrten sind die Leistungseigenschaften der Achsen eins bis drei maßgeblich, da diese den größten Hebel bis zum TCP haben. Zusätzlich haben die aktuellen Achspositionen θ und deren Ableitungen, der Achsgeschwindigkeit $\dot{\theta}$ und der Achsbeschleunigung $\ddot{\theta}$ einen erheblichen Einfluss. Die Achspositionen des Roboters repräsentieren die Auslenkung der Schwerpunkte der kinematischen Kette und bestimmen damit das Trägheitsmoment, welches einer Bremsung entgegenwirkt.

Um den Bremsweg analytisch zu berechnen, müsste zur Laufzeit eine nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung gelöst werden. Einerseits ist damit noch nicht gewährleistet, wie die reale Maschine tatsächlich reagiert, zum anderen liegen Daten wie z.B. die Masse pro Gelenkarm und die exakten Schwerpunkte für die Berechnung oft nicht vor. Daher wird an dieser Stelle ein nichtlineares Modell für den Bremsweg ausgeschlossen.

6.3.2.2 Bahntreue Bremsung

Bei bahntreuen Bremsungen, wie dem geforderten Rampenstopp Kategorie 2 in linearen oder zirkularen Bewegungen, werden die Achsleistungen im roboterinternen Interpolator bereits berücksichtigt (wenn kein Dynamik-Modell hinterlegt ist). Für die Auslegung des Berechnungsverfahrens kann somit eine konstante Verzögerung im kartesischen Raum angenommen werden. Gemäß geltender Regularien müssen die Verzögerungswerte durch Bremstests bei Inbetriebnahme eines Roboters ermittelt werden.

In eigenen Untersuchungen wurden solche Brems tests mit dem verwendeten Robotersystem durchgeführt. Beim vorliegenden *KR180* Roboter können im Extremfall Geschwindigkeiten von bis zu 7m/s erreicht werden, was in keinem Fall zulässig für eine MRK-Anwendung wäre. Versuche wurden daher aus Sicherheitsgründen nur bis 2m/s ausgeführt.

Für das weitere Vorgehen wird angenommen, dass die Trajektorie aus linearen oder zirkularen Abschnitten programmiert wurde und folgender, experimentell ermittelter, Zusammenhang für den Bremsweg des Roboters bis zum Stillstand gilt:

$$S_R = 0,114 \text{ s}^2 / \text{m} \cdot v_R^2 + 0,142 \text{ s} \cdot v_R \quad \text{Formel 6-3}$$

In diesem Anhalteweg sind einerseits die Reaktionszeit des Systems vom Signal bis zum Beginn der Abbremsung sowie der eigentliche Bremsweg berücksichtigt. Der Roboter bewegt sich zunächst über die Reaktionszeit $T_R = 142\text{ms}$ konstant weiter und bremst erst anschließend ab. Diese Nachlaufzeit setzt sich aus 98ms Verzögerung in der Robotersteuerung sowie der Verzögerung in der Sensorik zusammen. Die Sensorgeneration *VL53L1x* wird aus den Ergebnissen in Abschnitt 4.3.2 mit einer Messfrequenz von 50Hz betrieben. Als Grenzfall befindet sich ein Objekt exakt an der Detektionsgrenze während der Messung und tritt erst dann in den Detektionsbereich ein, weshalb hierfür 40ms angenommen werden müssen. Der Übermittlungstakt an den Roboter beträgt 4ms, sodass sich für die Sensorik eine Verzögerung von 44ms ergibt.

Damit sind die wichtigsten Teile des Bremswegs beschrieben und der Mindestsicherheitsabstand kann berechnet werden.

6.3.3 Kritischer Mindestsicherheitsabstand

Um den kritischen Mindestabstand nach (DIN ISO/TS15066) zu berechnen, fehlen noch drei weitere Faktoren: (1) der Eindringabstand C , (2) die Positionsunsicherheit des Detektionsobjekts Z_D und (3) die Positionsunsicherheit des Robotersystems Z_R .

1. Der Eindringabstand C ist der Weg, den ein Objekt, wie z.B. ein Arm, in den Sicherheitsbereich eindringen kann, bevor es erkannt wird. Für die betrachteten Sensoren wird C nach Tabelle 4 der (DIN ISO 13857:2008) bestimmt. Demnach kann eine mögliche Lücke zwischen zwei überlappenden Blickfeldern zweier Sensoren auftreten, weshalb ein C mit 120mm gewählt werden muss.

2. Für die Positionsunsicherheit des Menschen wird die Messunsicherheit des Sensors verwendet. Für die untersuchte Sensorik wurde festgestellt, dass die Unsicherheit maßgeblich von der Relativgeschwindigkeit abhängt. Aus diesem Grund wird die Unsicherheit mit den empirischen Konstanten wie folgt modelliert:

$$Z_D(v_R) = 0,12 \text{ s}^2/\text{m} \cdot (v_R)^2 + 0,04 \text{ m} \quad \text{Formel 6-4}$$

3. Die Positionsunsicherheit Z_R des Roboters ist mit wenigen Millimetern im Vergleich zu den anderen Einflüssen vernachlässigbar und wird mit 0 angenommen.

Damit ergeben sich für die betrachteten Fälle die in Abbildung 47 dargestellten Zusammenhänge für die kritischen Mindestabstände S_{min} über die Robotergeschwindigkeit v_R .

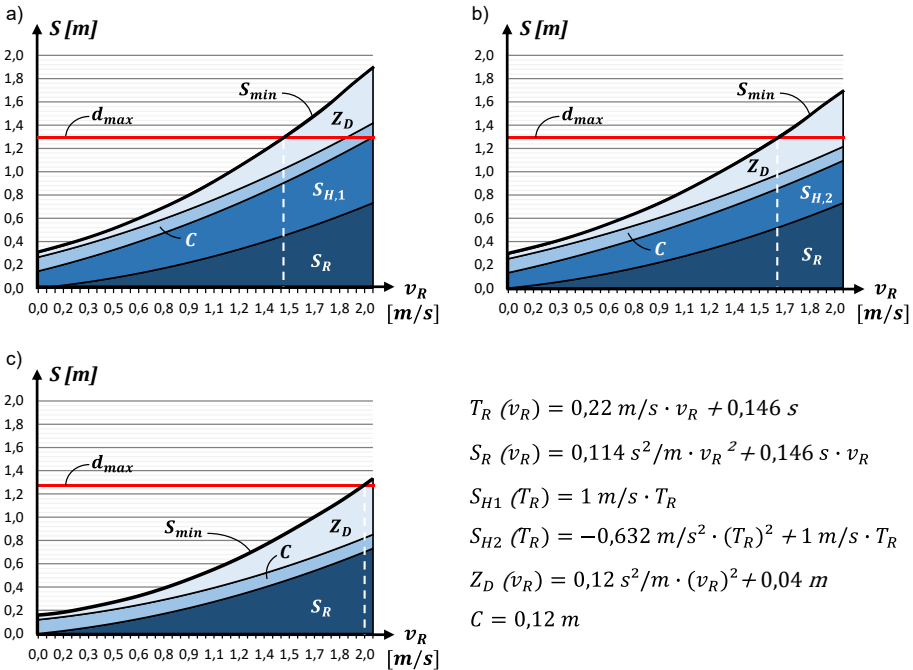


Abbildung 47: Zusammensetzung des kritischen Mindestabstands S_{min} für die Fälle laufender Mensch (a), stoppender Mensch (b) und stehender Mensch (c)

Es ist gut zu erkennen, dass bei einer Detektionsreichweite von $d_{max} = 1,3\text{m}$ je nach betrachtetem Fall die maximal zulässige Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters deutlich

variiert. Wenn angenommen werden muss, dass ein Mensch in den Roboter hineinläuft, kann theoretisch mit einer max. TCP-Geschwindigkeit von 1,46m/s verfahren werden. Wird ein Signalsystem verwendet, kann etwas schneller mit bis zu 1,6m/s verfahren werden. Sind in der Roboterzelle vorwiegend stehende Mitarbeiter zu erwarten, etwa bei Montageaufgaben, kann theoretisch bis zu 1,95m/s verfahren werden. Diese Auslegungs-Modelle sind jedoch in Kapitel 7 noch zu validieren.

6.3.3.1 Auslösen der Bremsung

Aus Abbildung 47 ist ersichtlich, dass der kritische Sicherheitsabstand je nach Robotergergeschwindigkeit kleiner ist als die maximale Detektionsreichweite der LiDAR-Sensorik. Je nach betrachtetem Fall ist die verbleibende Differenz zwischen erster Erfassung des Hindernisses und das Auslösen eines Stopps Kat. 2 nach EN 60204 unterschiedlich zu bewerten. Die erste wichtige Unterscheidung im Verfahren muss daher unmittelbar prüfen, ob ein sofortiger Stopp ausgelöst werden muss. Ist der kleinste aktuelle Messwert q_{min} kleiner als $S_{min}(v_R)$, muss ein Stopp nach Kategorie 2 ausgelöst werden. Hierfür wird der Soll-Wert der kartesischen Geschwindigkeit auf 0 gesetzt und an die Robotersteuerung übermittelt.

$$\dot{x}_{TCP,SOLL}(t) = \begin{cases} 0, & \text{wenn: } \min(Q) \leq S_{min} \\ \dot{x}_{TCP,SOLL}(t), & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Formel 6-5}$$

Ist der Messwert sogar kleiner als $S_H + S_R$ (also ohne Sicherheitsfaktoren), sollte ein Stopp der Kategorie 0 mit Safe-Torque-Off ausgelöst werden. Diese Funktion muss sofort via Interrupt ausgelöst werden und die Methode wird sofort beendet. (Hinweis: Diese Funktion wurde nicht implementiert bzw. getestet, da sie den Roboter sehr stark beansprucht und teilweise beschädigt.)

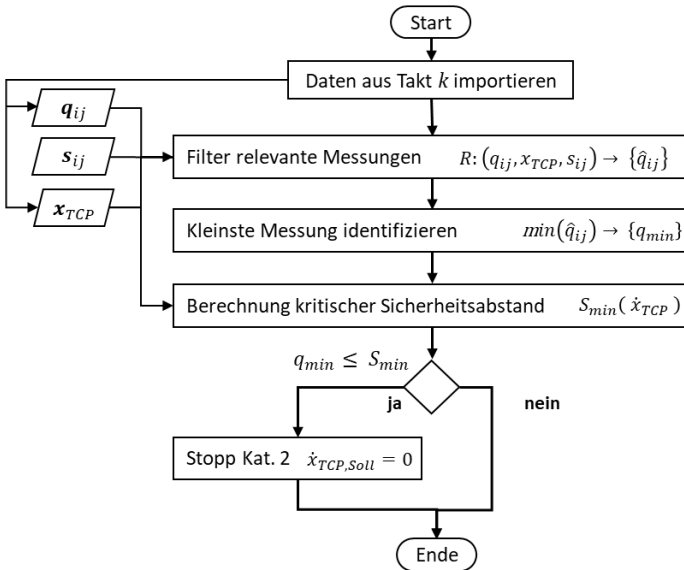


Abbildung 48: Vorgehen zum Überprüfen, ob ein sofortiger Stopp zur Kollisionsvermeidung notwendig ist.

Ist der aktuelle Mindestabstand nach Gefahrenabschätzung größer als der Mindestsicherheitsabstand, wird mit der Geschwindigkeitsregelung fortgefahren.

6.4 Geschwindigkeitsregelung

Mit dem Mindestsicherheitsabstand S_{min} als untere, variable Grenze und der Detektionsreichweite d_{max} als obere, absolute Grenze ergibt sich dazwischen ein Bereich, in dem die Geschwindigkeit in Abhängigkeit des kleinsten Messwerts $min(Q)$ geregelt werden kann.

Je nach Regelungsstrategie ergibt sich eine andere Kennlinie für die TCP-Geschwindigkeit \dot{x}_{TCP} . Diese Kennlinie kann für unterschiedliche Fälle und Zielstellungen gewählt werden. Abbildung 49 veranschaulicht die Bereiche in Form von sphärischen Zonen um den Greifer.

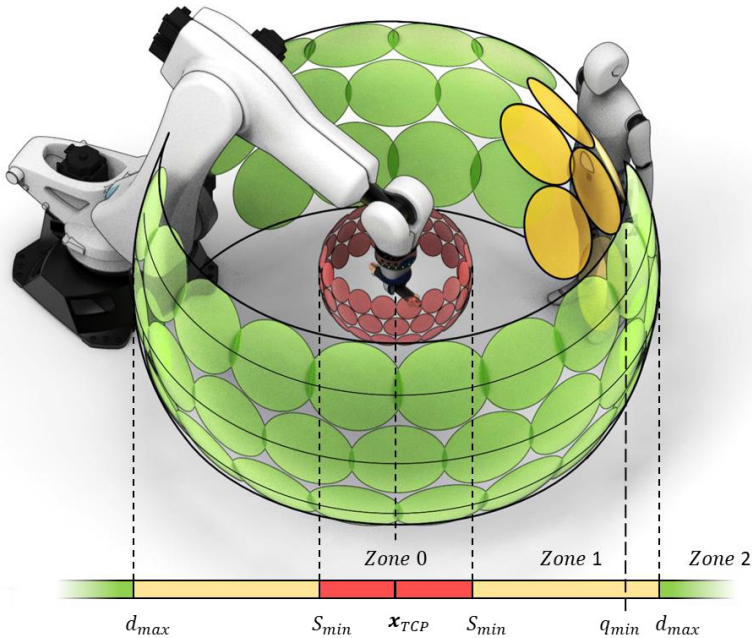


Abbildung 49: Veranschaulichung der Sicherheitszonen um den Greifer

Zone 0 ist der Bereich, in dem ein sofortiger Not-Halt ausgelöst werden muss (rot dargestellt), Zone 1 ist außerhalb des Mindestsicherheitsabstands (gelb dargestellt) und Zone 2 ist außerhalb des Detektionsbereichs. Ist eine Situation gegeben, in der ein unbekanntes Objekt in Zone 1 detektiert wird, besteht die Möglichkeit je nach Kennlinie zu reagieren.

Nachfolgend werden Kennlinienoptionen für die beschriebenen Fälle aus Kapitel 6.3 diskutiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet.

6.4.1 Geschwindigkeit-Abstands-Profile

Die folgenden Kennlinien zeigen die Profile für die Soll-Robotergeschwindigkeit in Abhängigkeit vom kleinsten Messwert $v_{R,Soll}(q_{min})$ zum Zeitpunkt der ersten Detektion des Menschen $t_0 = 0s$ im Detektionsabstand $d_{max} = 1,3m$. Die Farben veranschaulichen die zuvor definierten Sicherheitszonen: Zone 2 (grün), Zone 1 (gelb) und Zone 0 (rot).

Fall H1: Mensch läuft aktiv in den Greifer (DIN TS 15066)

Wird der erste Fall für die Anwendung angenommen, kommt es unausweichlich zum Zusammenstoß, da der Mensch sich weiter bewegt. Wichtig ist daher, dass der Roboter beim Eintreffen des Menschen bereits steht. Um dies zu erreichen, muss die Soll-Geschwindigkeit $\dot{x}_{TCP,SOLL}$ spätestens bei Unterschreiten von S_{min} gleich 0 gesetzt werden. Abbildung 50 zeigt zwei mögliche Optionen für die Regelungsprofile. Zur Veranschaulichung ist zusätzlich die Strecke $S_{H,Impact}$ eingezeichnet, welche ein laufender Mensch zurücklegt, bevor es zur Kollision mit dem ungebremsten Roboter kommt.

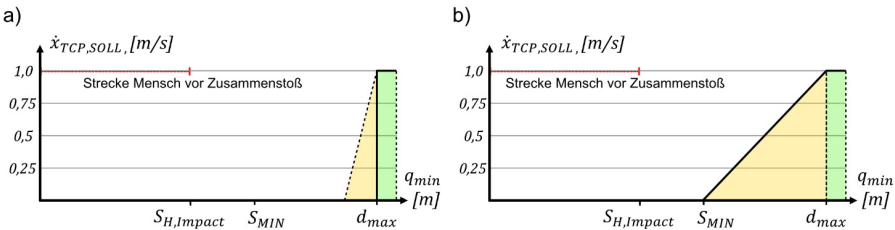


Abbildung 50: Geschwindigkeits-Profile für den Fall H1

- In dieser Variante wird nach der Erstdetektion die Geschwindigkeit mit maximaler Verzögerungsrate analog einer bahntreuen Bremsung (Rampenstopp) reduziert.
- In der alternativen Variante wird die Bremsung nur so stark ausgeführt, dass gerade vor Erreichen des Mindestsicherheitsabstands der Stillstand vorliegt.

Dieser Fall lässt keinerlei Handlungsspielraum, da eine Kollision per Definition nicht vermieden werden kann. Die einzig sinnvolle Reaktion ist daher der sofortige Rampenstopp bei Unterschreitung des Sicherheitsabstands, analog zu Formel 6-5.

Fall 2: Mensch bemerkt Greifer und stoppt seine Bewegung

Der zweite Risikofall ermöglicht mehrere Optionen, dargestellt in Abbildung 51.

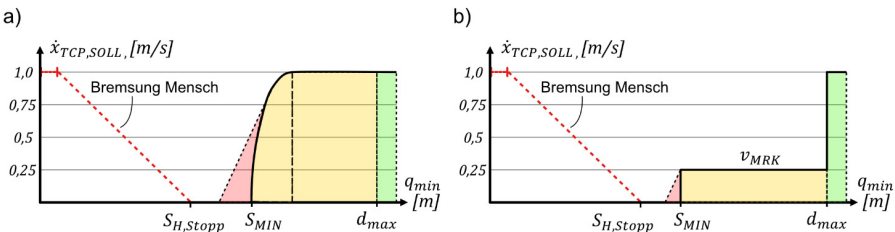


Abbildung 51: Geschwindigkeits-Profile für den Fall H2

- a) Der Roboter verfährt nach Detektion mit geplanter Geschwindigkeit bis zum Unterschreiten von S_{min} weiter und hält erst im letzten Moment vor dem zum Stillstand gekommenen Menschen an.
- b) Der Roboter reduziert sofort nach Detektion die Geschwindigkeit auf ein definiertes Niveau und fährt mit reduzierter Geschwindigkeit weiter, bis er kurz vor dem stehenden Menschen anhält.

Die erste Option würde die Prozesszeit minimal verkürzen, ist jedoch riskanter. Die zweite Option ist die sichere Variante: Der Impuls eines Zusammenstoßes wird sofort, mit maximaler Verzögerung, auf das normgerechte Niveau in MRK-Geschwindigkeit von $v_{MRK} = 250\text{mm/s}$ gesenkt. Diese Variante ist im Sinne der Sicherheit zu wählen, es gilt:

$$\dot{x}_{TCP,SOLL}(q_{min}) = \begin{cases} 0,25 \text{ m/s} , & \text{wenn: } S_{min} \leq q_{min} \leq d_{max} \\ 0 , & \text{wenn: } 0 \leq q_{min} \leq S_{min} \end{cases} \quad \text{Formel 6-6}$$

Fall 3: Mensch steht und bewegt sich nicht

In diesem Fall bewegt sich der Roboter in Richtung eines stehenden Mitarbeiters. Zwei Optionen sollen diskutiert werden:

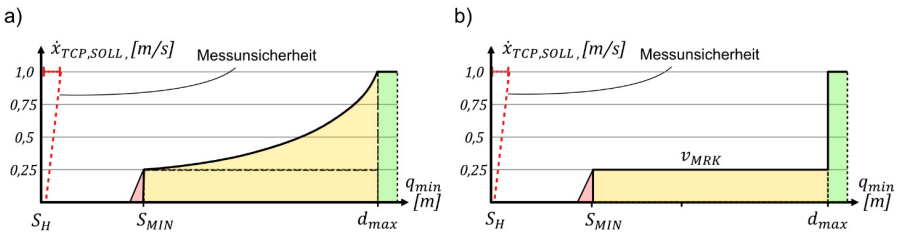


Abbildung 52: Geschwindigkeits-Profile für den Fall H3

- a) Als erste Option soll ein frei definierbares Geschwindigkeitsprofil zwischen der ersten Detektion und dem Mindestsicherheitsabstand diskutiert werden. Aufgrund des größeren Bereichs zwischen d_{max} und S_{min} könnte ein Profil gewählt werden, welches die Erwartung des Mitarbeiters an einen „Kollegen Roboter“ erfüllt und somit die wahrgenommene Zusammenarbeit fördert. Beispielhaft dargestellt als quadratischer Zusammenhang.
- b) Die zweite, konservative Option ist analog zu Formel 6-6 das sofortige Abbremsen auf MRK-Geschwindigkeit, welche bis zum Mindestabstand gehalten wird.

Für die vorliegende Arbeit ist die zweite Option zu bevorzugen, da diese die Regelung deutlich vereinfacht und die Umfahrung eines Hindernisses mit konstanter Geschwindigkeit ermöglicht. Diese Option wird daher für die weiteren Schritte gewählt.

6.4.1.1 Fazit

Für die Geschwindigkeits- und Abstandsregelung im Risikofall A muss ein intelligenter Greifer je nach Sicherheitsbeurteilung unterschiedlich konfiguriert werden. Wird gemäß der Sicherheitsnormen Fall H1 angenommen, muss der Greifer dem Roboter bei Detektion ein Signal zum sofortigen Anhalten senden.

Wird gemäß der Fälle H2 und H3 ein abbremsender oder stehender Mitarbeiter angenommen, kann der Greifer die Geschwindigkeit reduzieren und eine Hindernisumfahrung einleiten. Die Veränderung der Trajektorie bietet die Möglichkeit den Mensch sicher zu umfahren und damit den Prozess fortzusetzen.

6.5 Online Hindernisumfahrung

Das Stoppen oder Abbremsen des Roboters reduziert die Aufprallenergie bei einem Zusammenstoß oder verhindert eine Kollision mit dem Mitarbeiter gänzlich. Der nächste Schritt zur Kollisionsvermeidung ist die Hindernisumfahrung. Hierbei wird die vorab einprogrammierte Trajektorie des Systems verändert, um den Mindestsicherheitsabstand S_{min} zu Hindernissen einzuhalten und trotzdem zum Zielpunkt zu kommen, sofern dieser nicht durch das Hindernis blockiert ist.

Da über die Bewegung des Mitarbeiters zur Laufzeit keine weiteren Informationen bekannt sind bzw. aus Sicherheitsgründen nicht angenommen werden dürfen, eignen sich keine Ansätze mittels Objektverfolgung. Die Hindernisumfahrung basiert daher auf der reaktiven Wegfindung, bei der aus dem aktuellen Informationsstand eine neue Soll-Richtung für die Weginterpolation berechnet wird.

6.5.1 Vorgehen der Hindernisumfahrung

Die Hindernisumfahrung erfordert, dass die Trajektorie zur Laufzeit des Programms berechnet und anschließend in die Bewegungsregelung des Roboters eingespielt wird. Anhand einiger Vorüberlegungen wird für diese Aufgabe folgender Ansatz gewählt (siehe Abbildung 53):

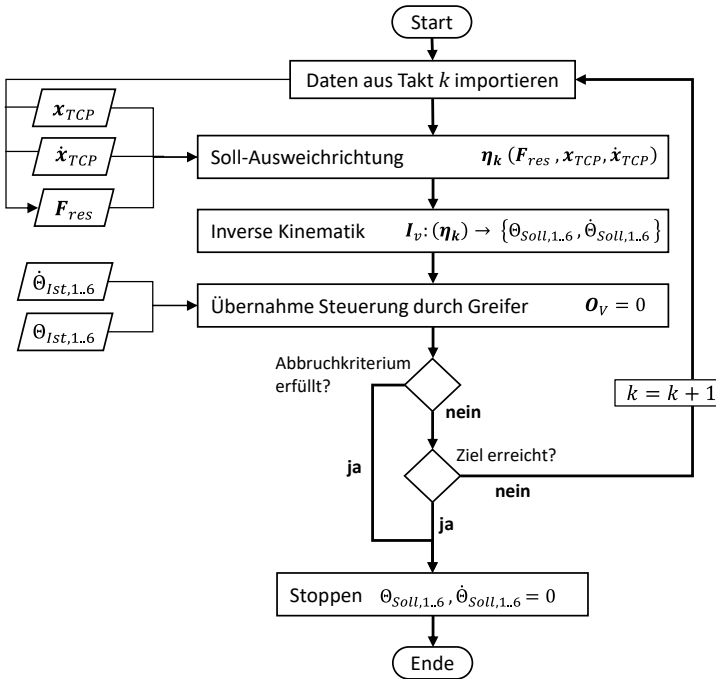


Abbildung 53: Vorgehen zur Hindernisumfahrung

a) Im ersten Schritt muss bestimmt werden, wohin der TCP zum Ausweichen bewegt werden soll, um den Sicherheitsabstand einzuhalten und weiterfahren zu können. Berechnet wird demnach ein Soll-Richtungsvektor η im Werkzeugkoordinatensystem, dem das reale System so genau wie möglich folgen soll. In Kapitel 6.5.2 und 6.5.3 werden zwei untersuchte Methoden hierfür genauer beschrieben.

Die ideale Ausweichrichtung wird im kartesischen Koordinatensystem des Greifers berechnet, da dies der Modellraum für die Sensoren und die Karte ist. Der Roboter jedoch muss mittels Achskoordinaten $\theta_{1..6}$ geregelt werden. Zur Regelung müssen die Soll-Koordinaten daher mittels einer inversen Kinematik I_v online auf das Achskoordinatensystem abgebildet werden. (Hinweis: Eine alternative Regelung in TCP-Koordinaten ist nicht möglich, da einerseits das bekannte Problem von Singularitäten nicht berücksichtigt wird

und andererseits die Leistungsbeschränkungen der Achsmotoren nicht berücksichtigt werden können. Dies hätte eine unvorhersehbare Überlast der Motoren zur Folge, würde zum Stopp des Roboters und langfristig zu Schäden an den Achsen führen.)

- b) Damit der Greifer die Ausweichbewegung in Form der neu generierten Trajektorie auch ausführen kann, muss er die Positionsregelung des Roboters überschreiben. Das gewählte Verfahren setzt hierfür den Feed-Override O_v des Roboters zu null und steuert die Achsen selbst. Dieser Schritt wird in Kapitel 6.6 beschrieben.
- c) Zum Abschluss kommt die Hindernisumfahrung, indem entweder ein Abbruchkriterium erfüllt wird oder indem das ursprüngliche Ziel erreicht ist. Die umgesetzten Abbruchkriterien werden in Abschnitt 6.5.4 erläutert.

Im Kern steht damit die Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Generierung einer neuen Trajektorie zur Laufzeit aus Sicht des Greifers mit der konzipierten Sensorik. Im Folgenden werden zwei bekannte Ansätze zur Wegfindung aus der Informatik aufgegriffen und an die bestehende Problemstellung adaptiert.

6.5.2 Adaption der klassischen Potenzialfeldmethode

Als Ausgangsbasis für die Greifer-integrierte Hindernisumfahrung wird die Potenzialfeldmethode von (Khatib 1985) verwendet. Dieser schlanke Ansatz benötigt nur geringen Prozessoraufwand und ist trotzdem vergleichsweise robust gegenüber verrauschten Eingangssignalen. Aufgrund dieser Eigenschaften ist sie in der Robotik weit verbreitet und es bestehen in der Literatur viele Erweiterungen, welche auch für weiterführende Arbeiten interessant sind, um z.B. lokale Minima zu vermeiden. Als Ausgangsansatz wird daher ein Potenzialfeldmodell, zum Minimum strebend, verwendet. Konkret wird eine abstoßende virtuelle Kraft F_R (engl. R für reject) mit einem proportionalen Verstärkungskoeffizienten G_P (engl. für gain) eingeführt.

$$F_R = \sum_j \sum_i G_P \left\{ \frac{1}{q_{ij}} - \frac{1}{d_0} \right\} \cdot s_{ij} \quad \forall q_{ij} < d_{max} \quad \text{Formel 6-7}$$

Da im vorliegenden Fall die Position und Ausprägung des Menschen nicht bekannt ist oder im Raum überwacht wird, muss die Methode entsprechend angepasst werden. In

diesem Fall wird jedem Sensor s_{ij} eine Funktion $F_{R,ij}$ zugewiesen, welche einen Potenzialfeldgradient nachbildet und ein umgekehrtes Vorzeichen zum Zielpotenzial hat.

$$F_{R,ij}(q_{ij}, s_{ij}, S_{min}) = \begin{cases} F_{R0} & \forall q_{ij} \leq S_{min} \\ G_P \left(\frac{1}{(q_{ij} - S_{min})} - \frac{1}{(d_z - S_{min})} \right) \cdot s_{ij} & \forall S_{min} < q_{ij} \leq d_z \\ 0 & \forall q_{ij} > d_z \end{cases} \quad \text{Formel 6-8}$$

Formel 6-8 kann als abstoßende Kraft interpretiert werden. Um eine möglichst glatte Trajektorie zu erhalten, wird hierfür eine hyperbolische Ansatzfunktion vorgeschlagen. Durch Multiplikation mit der Sensornormale s_{ij} wird der Vektor der virtuellen Kraft rotiert. Die Funktion wird anschaulich in Abbildung 54 um den kritischen Mindestabstand S_{min} verschoben. Dies bedeutet, dass bevor der Greifer in die Schutzzone eindringt, die abstoßende Kraft gegen unendlich strebt. Der Greifer wird virtuell vom Kollisionsobjekt weggedrückt. Praktisch muss diese Kraft unterhalb von S_{min} begrenzt werden, um eine stabile Regelung zu ermöglichen. Daher wird als oberer Grenzwert noch die Kraft F_{R0} eingeführt, welcher flexibel gewählt werden kann.

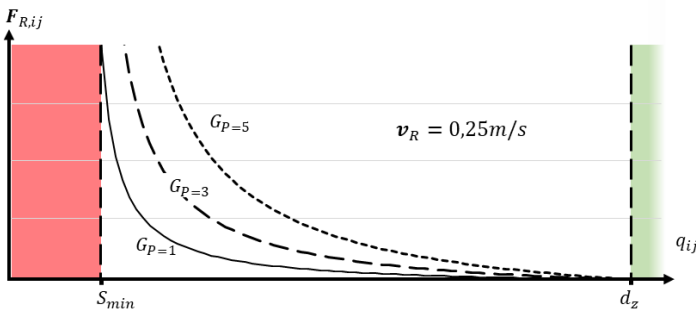


Abbildung 54: Beispiel für den Zusammenhang einer abstoßenden Kraft je Sensor über den detektieren Abstand q je Verstärkungsfaktor G_P

Als äußere Grenze kann zudem der Abstand d_z gewählt werden, ab dem eine abstoßende Kraft auf den Pfad einwirkt. Nach oben ist d_z begrenzt durch die maximale Detektionsreichweite. Über die Wahl des Verstärkungskoeffizienten G_P wird die Steigungsänderung eingestellt. Je größer der Wert, desto fließender ist die erzeugte Trajektorie. Jedoch kann der Weg länger bzw. in manchen Fällen unlösbar werden, weshalb der

Koeffizient mit Vorsicht zu wählen ist. Abbildung 55 veranschaulicht das beschriebene Prinzip.

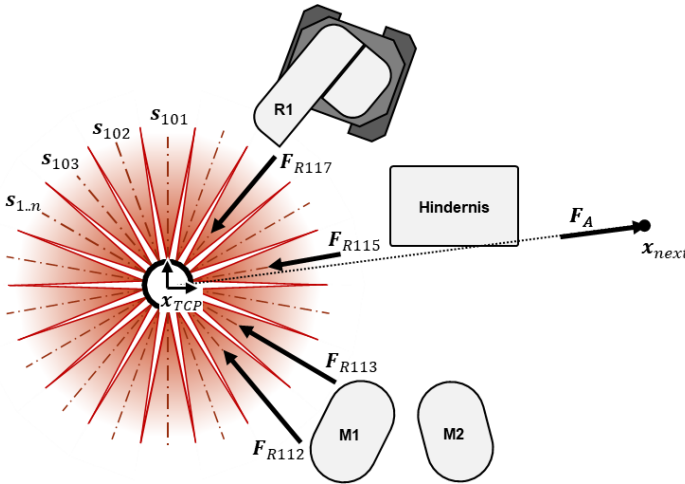


Abbildung 55: Veranschaulichung der angepassten Potenzialfeldmethode

Der anziehenden Kraft zum Zielpunkt wird klassisch ein konstantes Potenzialfeld über die nichtnegative kontinuierlich differenzierbare Funktion F_A (engl. A für attract) mit einem Verstärkungskoeffizienten G_A zugewiesen:

$$F_A(x_{TCP}, x_{next}) = G_A \cdot n_{next} \quad \text{Formel 6-9}$$

Ausgehend von der aktuellen Position des TCP wird dann der normalisierte Differenzvektor n_{next} zum nächsten Endpunkt x_{next} einer abschnittsweise definierten Trajektorie gebildet. An dieser Stelle wird vereinfachend von linearen Abschnitten ausgegangen, eine Erweiterung auf zirkulare oder höherwertige Abschnitte ist analog möglich, steht jedoch in dieser Arbeit nicht im Fokus.

Das komplette, adaptierte Berechnungsverfahren für diese Variante ist in Abbildung 56 dargestellt. Nach Prüfung der roboterorientierten Messwerte werden die abstoßenden virtuellen Vektoren F_{ij} in Abhängigkeit der aktuellen Sensormesswerte und Geschwindigkeit berechnet und aufsummiert. Der Potenzialgradient wird berechnet und ebenfalls aufsummiert. Ergebnis ist ein Richtungsvektor, der die ideale Richtung zum Umfahren

der Hindernisse angibt. Dieser muss für die Modularität des Verfahrens noch normiert werden.

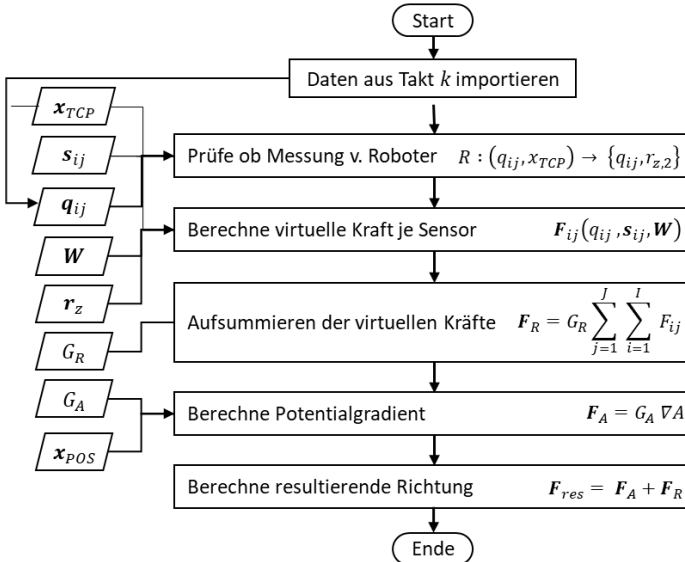


Abbildung 56: Flussdiagramm zur Berechnung der Ausweichrichtung

6.5.2.1 Eigenschaften und Einsatzgrenzen

Der große Vorteil der Methode ist die sehr geringe Rechenzeit, die für die Pfadgenerierung benötigt wird. Dies ist besonders im Hinblick auf die sehr begrenzte Rechenleistung im Greifer wichtig. Ein Nachteil ist die rein auf Positionsinformationen basierende Planung, was zu einer weniger glatten Trajektorie führt.

Aus Sicht des Greifers kann sich zudem negativ auswirken, dass benachbarte Sensoren insbesondere im Nahbereich das gleiche Objekt erfassen und somit doppelt berücksichtigen. Dies ist vor allem bei Wänden der Fall. Um diese Nachteile zu kompensieren wird das Verfahren um die generalisierte Potenzialfeldmethode erweitert und anschließend beide Varianten evaluiert.

6.5.3 Adaptierte generalisierte Potenzialfeldmethode

Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, fügt die generalisierte Potenzialfeldmethode noch einen weiteren, geschwindigkeitsabhängigen Term hinzu. Die abstoßenden Kräfte werden damit auf den aktuellen Richtungsvektor der Geschwindigkeit projiziert. Dies hat zur Folge, dass Objekte, die quer zur Bewegungsrichtung liegen, deutlich weniger Einfluss auf die Trajektorie haben. Im konkreten Fall wird jedem Sensor hierbei die Kraft $F_{G,ij}$ zugeordnet, welche das lineare Bewegungsmodell für den TCP berücksichtigt. (Vereinfacht dargestellt in Abbildung 57.)

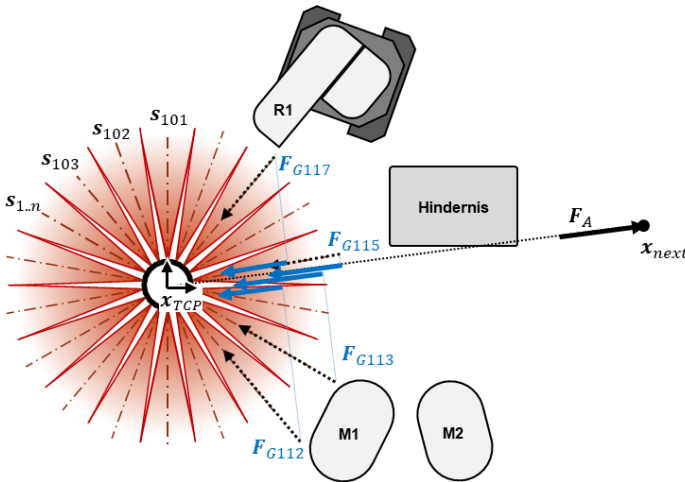


Abbildung 57: Zusätzliche virtuelle Kräfte durch die generalisierte Potenzialfeldmethode

Der Vorteil ist die Berücksichtigung der Annäherungsgeschwindigkeit zum Hindernis in Sensor- bzw. Bewegungsrichtung. Durch die Vektormultiplikation mit dem Einheitsvektor der aktuellen Bewegungsrichtung \mathbf{n}_{next} werden die gemessenen Abstände auf die aktuelle Trajektorie projiziert.

$$F_{G,ij}(q_{ij}, \mathbf{s}_{ij}) = \begin{cases} G_G \left(\frac{a_{max} \cdot \dot{x}_{TCP}}{2a_{max} \cdot (q_{ij} - d_z) - (\dot{x}_{TCP})^2} \right) \mathbf{s}_{ij} * \mathbf{n}_{next} & \forall q_{ij} < d_{max} \\ 0 & ,sonst \end{cases} \quad \text{Formel 6-10}$$

Analog zur klassischen Potenzialfeldmethode ergibt sich die Berechnung der Veränderungserkennung demnach in Abbildung 58.

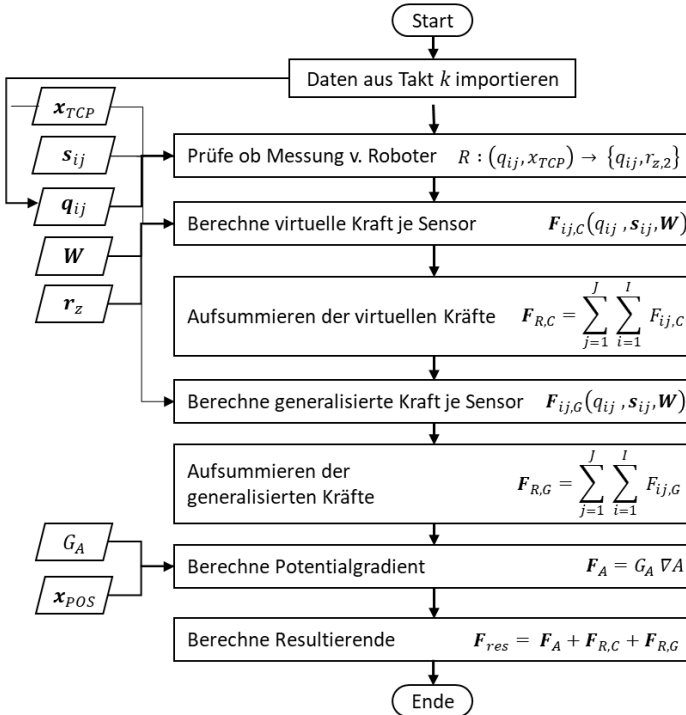


Abbildung 58: Flussdiagramm für die generalisierte Richtungsberechnung

Die weitere Berechnung erfolgt analog zur klassischen Potenzialfeldmethode.

6.5.4 Zielerreichung nach Hindernisumfahrung

Die Berechnung wird so lange zyklisch ausgeführt, bis entweder ein Sicherheitshalt durch eine zu schnelle Annäherung ausgelöst wird, oder eines der folgenden Kriterien erfüllt ist

- Der Greifer erreicht seine Zielposition und kann die Handhabung ab diesem Punkt wieder, wie geplant, fortführen. Als Kriterium dient der Abstand $|x_{TCP} - x_{next}|$, der kleiner als ein zu wählender Schwellwert ist. Hierbei ist zu beachten,

dass der Vektor x_{next} eine roboterspezifische Variable ist, die zum nächstgelegenen Stützpunkt einer abschnittsweise definierten Trajektorie zeigt. Alternativ ist auch der indizierte Import der Stützpunkte aus dem Roboterprogramm möglich. Diese können bei Erreichung iterativ durchgeschaltet werden. Damit ist auch ein kontinuierlicher Betrieb der Hindernisumfahrung möglich. Nachteil gegenüber der programmierten Fahrt ist allerdings die Begrenzung auf normgerechte $v_{MRK} = 250\text{mm/s}$.

- b) Das zweite Abbruchkriterium ist fehlender Fortschritt. Bewegt sich der Greifer mehr seitwärts als auf das Ziel zu, verbleibt der Abstand zum Zielpunkt nahezu gleich und es wird ein Halt ausgeführt. Dies ist der Fall, wenn eine Person direkt auf dem Zielpunkt steht und sich auch nach einer definierten Wartezeit nicht bewegt hat.
- c) Als letztes Kriterium wird ein lokales Minimum überprüft. Bewegt sich der Greifer über einen definierten Zeitraum nur innerhalb eines kleinen Raums, wird davon ausgegangen, dass er sich in einem lokalen Minimum befindet und ein Sicherheitshalt ausgeführt wird.

Allen Abbruchkriterien ist gemein, dass nach dem Entfernen des Hindernisses die Bewegung wieder aufgenommen werden kann. Insbesondere entsteht dadurch kein Zeitverlust gegenüber einem Sicherheitshalt ohne Hindernisumfahrung.

6.6 Systemarchitektur

Damit ein intelligenter Greifer seine Sensorinformationen nutzen kann, um ein Hindernis zu umfahren, muss er die programmierte Bewegung des Roboters verändern. Die grundsätzliche Architektur eines Industrieroboters ist für diesen Fall nicht ausgelegt. Die proprietäre Steuerung des Roboters interpoliert einen fest programmierten Ablauf mit einiger Vorlaufzeit zur Ausführung und berechnet anschließend über eine inverse Kinematik die Positions-Sollwerte aller Achsen. Jede Achse wird kontinuierlich mittels kaskadierten Regelkreisen auf diese Position geregelt.

Der Greifer kann den Roboter nur steuern, wenn er einen geeigneten Systemaufbau zum Regeln der Achsmotoren verfügt. Darüber hinaus muss die Architektur so aufgebaut sein, dass in der Gefahrensituation ein Umschalten der Kontrolle vom Roboter zum Greifer erfolgt. Im Idealfall ohne Unterbrechung der Bewegung.

Bei der verwendeten Robotersteuerung vom Typ *KRC4* ist es möglich externe Signale zur Positionsveränderung zu übermitteln. Über die RSI-Schnittstelle (*Robot Sensor Interface*) können zusätzliche Signale für alle Achsen eingespeist werden. Konkret werden Winkelgeschwindigkeits-Regelkreise für jede Achse ermöglicht. Mit diesem Konzept kann der Greifer die Trajektorie zur Laufzeit manipulieren. Der Greifer wird zu einer separaten Robotersteuerung. Das Blockschaltbild in Abbildung 59 veranschaulicht die Architektur in vereinfachter Form.

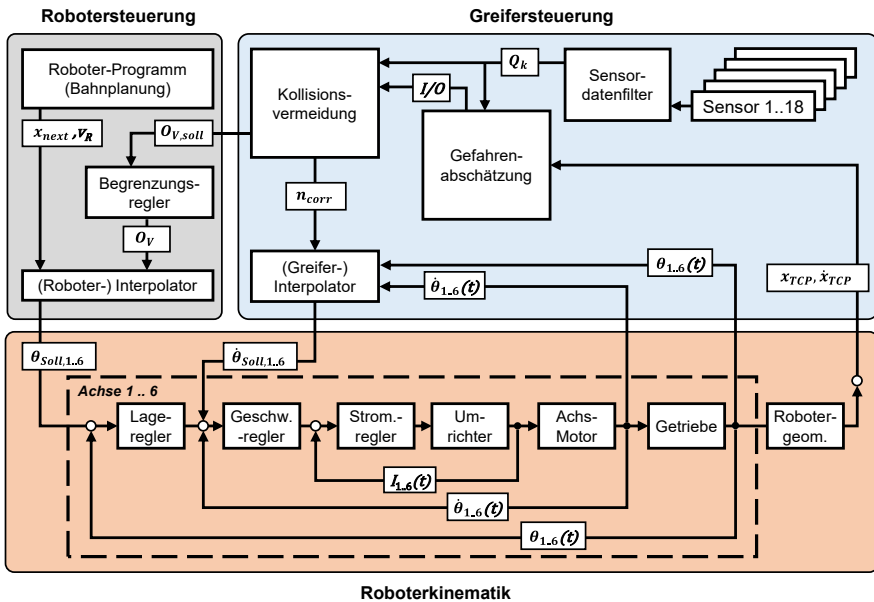


Abbildung 59: Blockschaltbild der Steuerungsarchitektur zwischen Roboter und Greifer

Im normalen Betrieb fährt der Roboter auf der vorab programmierten Trajektorie und der Greifer misst mit der in Kapitel 4 entworfenen Sensorik kontinuierlich den Abstand zur Umgebung. Die gemessenen Abstände zwischen Umgebung und Greifer werden vorverarbeitet und anschließend in Form der Messdatenmatrix Q_k zwischengespeichert. Die in Kapitel 5 vorgestellte Methode zur Gefahrenabschätzung evaluiert im laufenden Betrieb, ob in der Umgebung des Greifers ein unbekanntes Objekt existiert. Solange

dies nicht der Fall ist, liegt keine Gefahr vor und der Roboter kann unverändert seine Aufgabe erfüllen.

Überschreitet die Gefahrenabschätzung einen Grenzwert, bedeutet dies, dass ein unbekanntes Objekt erfasst wurde und die Kollisionsvermeidung wird aktiviert. In dieser werden die in Kapitel 6 vorgestellten Methoden ausgeführt, um entweder die Geschwindigkeit zu reduzieren oder ein Hindernis zu umfahren.

Im Modus „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ wird die angepasste Geschwindigkeit der Robotersteuerung über einen klassischen Begrenzungsregler (Override-Funktion) übermittelt. Wird der Override $O_{v,Soll} = 0$ gesetzt, stoppt der Roboter bahntreu nach Kategorie 2 mit der ermittelten Verzögerung. Dies ist der Fall, wenn die kleinste Abstandsmessung bereits kleiner ist als der kritische Mindestabstand.

Ist die kleinste Abstandsmessung größer als der Mindestabstand, wird ein anderer Regelungsmodus aktiviert und der Greifer übernimmt die Bewegungssteuerung des Roboters. Hierfür wird der Richtungsvektor \mathbf{n}_k aus der Methode zur Hindernisumfahrung in einen Greiferinterpolator übergeben. Dieser erhält zusätzlich die aktuellen Achsenpositionen, Achsgeschwindigkeiten, die aktuelle kartesische Position des TCP und die kartesischen Geschwindigkeiten. Mittels einer inversen Kinematik wird die neu berechnete Soll-Position in geeignete Geschwindigkeitsinkremente umgerechnet. Zur Berechnung wurde eine vereinfachte Version der von (Kroger & Wahl 2010) veröffentlichten *Reflexes*-Methode genutzt. Somit ist eine schnelle Reaktion gemäß den Fähigkeiten jedes Robotergelenks gewährleistet. Als Einschränkung muss erwähnt werden, dass für den Prototyp keine Singularitäten berücksichtigt wurden. Als Ausgangssignal werden der Robotersteuerung Winkelinkremente über die RSI-Schnittstelle übergeben. Die Signale der Robotersteuerung werden auf 0 gesetzt. Damit steuert der Greifer die Bewegung des Roboters komplett, bis das Hindernis umfahren ist.

6.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Ansätze und Methoden für das dritte Teilmodul, der Kollisionsvermeidung, hergeleitet und beschrieben. Beginnend mit der kritischen Abstandüberwachung (1) über die Geschwindigkeitsüberwachung (2) bis zu den Methoden der Hindernisumfahrung (3) wurden die Berechnungsgrundlagen zur Kollisionsvermeidung ausgeführt.

1) **Abstandsüberwachung**

Als einfachster Baustein in der Methode wurde ein Modell zur Berechnung des kritischen Mindestsicherheitsabstands S_{min} für das vorgestellte System vorgestellt. Wenn der kleinste Abstand der Messungen kleiner ist, wird sofort ein Stopp nach Kategorie 2 ausgeführt.

2) **Geschwindigkeitsüberwachung**

Im Weiteren wurden verschiedene Ansätze zur Regelung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand diskutiert und entsprechende Kennlinien entworfen. Als Ergebnis steuert der Greifer die Verfahrgeschwindigkeit des Roboters.

3) **Methoden zur Hindernisumfahrung**

Ist ein Hindernis im Detektionsbereich der Greifersensorik und der Roboter hat ausreichend Zeit zu reagieren, wird eine Hindernisumfahrung aktiviert. Es wurden zwei Methoden vorgestellt und für die konkrete Systemkonfiguration adaptiert, um die Trajektorie online zu verändern: Die klassische und die generalisierte Potenzialfeldmethode. Als Ergebnis übernimmt der Greifer die Steuerung des Roboters und sendet zyklisch eine Bewegungsrichtung, um das Hindernis zu umfahren.

Abschließend wurde die genaue Systemarchitektur vorgestellt, welche zur Umsetzung der beschriebenen Funktionen notwendig ist.

Im folgenden Kapitel können nunmehr alle Teilsysteme sowie das Gesamtsystem in verschiedenen Versuchen validiert werden.

7 Validierung des Gesamtsystems

Das Vorgehen zur Validierung der entworfenen Module folgt weiterhin dem Ansatz des V-Modells aus Kapitel 3.2. Wie in Abbildung 60 dargestellt, werden zwei Stufen der Validierung unterschieden: a) Software-in-the-Loop-Versuche zum Absichern der Modulfunktionen und b) physische Versuche mit dem integrierten Gesamtsystem.

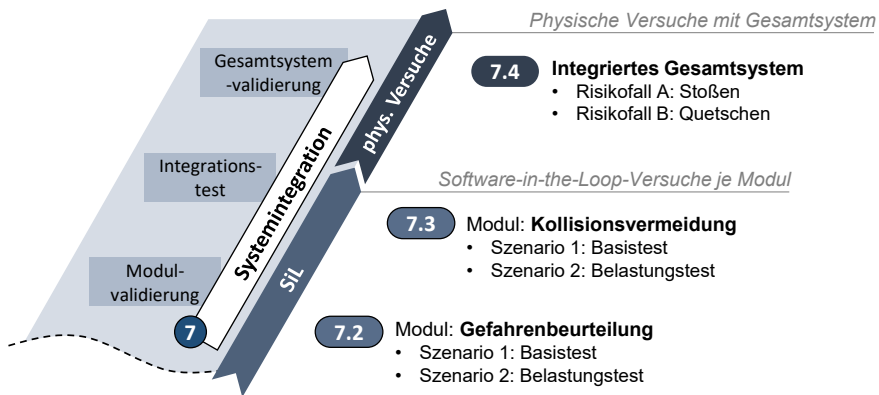


Abbildung 60: Vorgehen der Validierung nach V-Modell

Zuerst werden die entworfenen Systeme separat in einer Software-in-the-Loop-Umgebung abgesichert, um die einwandfreie Funktionsweise zu gewährleisten. Dies betrifft das Modul Gefahrenabschätzung mit der Veränderungserkennung (Kapitel 7.2) und das Modul Kollisionsvermeidung mit der Methode zur Hindernisumfahrung (Kapitel 7.3). Beide Module werden jeweils in einem Basistest zur grundlegenden Funktionsweise und einem Belastungstest zum Ermitteln der Leistungsgrenzen geprüft. (Die Funktionsweise des Moduls „Wahrnehmen der Umgebung“ wurde bereits in Kapitel 4 geprüft und wird daher nicht separat betrachtet.)

In Kapitel 7.4 werden abschließend Versuche mit dem Gesamtsystem durchgeführt, um das zuvor simulierte Prozessverhalten zu validieren und zu bewerten. Hierfür werden die Systemeigenschaften bzgl. der bekannten Risikofälle A und B aus der Zielsetzung in Kapitel 3.1 in physischen Versuchen validiert.

7.1 Software-in-the-Loop-Validierung

Bevor die implementierten Verfahren am realen MRK-System angewendet werden, ist es wichtig, deren Funktionsfähigkeit abzusichern und verschiedene Prozessparameterkombinationen zu bewerten.

Um die Leistungsfähigkeit und Eigenschaften der Berechnungsverfahren zu bewerten, wird ein Software-in-the-Loop (SiL) Ansatz verwendet. Der implementierte Steuerungscode kommuniziert hierfür exakt die gleichen Signale an eine Simulation, wie sie auch zu den realen Systemen übertragen werden würden.

Gemeinsam mit Büsching (A_Büsching 2018) und Nicklas (A_Nicklas 2018) wurden umfangreiche Untersuchungen vorgenommen, welche im Folgenden diskutiert werden. Zunächst soll die Simulationsumgebung und das gewählte Simulationsmodell kurz vorgestellt werden.

7.1.1 Simulationsumgebung

Um die Berechnungen in der Greifersteuerung abzusichern, wird die Robotersimulationsumgebung *Virtual Robot Experimentation Platform (V-REP V3.5.0 Rev 4)* der *Fa. Coppelia Robotics* genutzt. Diese stellt umfangreiche Tools zur Verfügung, um in einer virtuellen 3D-Umgebung Mehrkörpersysteme nachzubilden.

Virtuelle Sensoren erfassen den Abstand zur Umgebung im virtuellen Raum und speisen den Greifer mit realistischen Eingangssignalen, mit denen er die entworfenen Berechnungen durchführt. Der intelligente Greifer steuert damit anstatt einem echten Roboter nur einen virtuellen Roboter, welcher sich aber identisch verhält.

Der Vorteil ist einerseits die Unabhängigkeit von äußeren Systemstörungen, wie z.B. wechselnde Lichtverhältnisse im produktionstechnischen Labor. Andererseits können Informationen, die in der Realität schwierig zu erfassen sind, wie z.B. die exakte Lage und Orientierung aller Objekte im Arbeitsraum, direkt miteinbezogen werden.

Darüber hinaus ermöglicht es dieser Ansatz, vor den realen Versuchen einen sehr großen Parameterraum zu evaluieren und die aussichtsreichsten Parameterkombinationen zu identifizieren, ohne zeitaufwändige Versuchsreihen durchzuführen.

7.1.2 Simulationsmodell

Damit die Berechnungsverfahren realitätsnah evaluiert werden können, muss ein Simulationsmodell entworfen werden. Die Greifersteuerung erhält, gemäß der Architektur

aus Abschnitt 6.6 Signale einerseits von der Sensorik, welche die Umgebung wahrnimmt, und andererseits vom Roboter, welcher sich in der Umgebung bewegt. Zusätzlich muss eine Versuchsszene definiert werden, in der sich mindestens der Roboter entlang einer Trajektorie bewegt.

Virtueller Sensor

Damit ein virtueller ToF-Sensor das Verhalten des realen ToF-Sensors möglichst real nachbildet, wird ein Modell mit normalverteilter Messunsicherheit und weißem Rauschen benötigt. Ausgangsbasis ist das ideale RayCasting-Verfahren, in dem einem Strahl als Vektor im Raum, der euklidisch nächste Abstand zu einem Volumenkörper zugeordnet wird. Um die räumliche Kegelform als Blickfeld zu erzielen, wird ein ToF-Sensor aus 32 äquidistant verteilten 1D-Strahlen modelliert. Jeder dieser idealen Abstandswerte wird über die Zeit als Zufallsvariable auf eine Normalverteilung abgebildet. Werten außerhalb der Detektionsreichweite wird, wie im realen LiDAR-System auch, der maximale Abstandswert d_{max} zugewiesen. Die 32 Einzelmesswerte werden über die Distanz d als Histogramm quantisiert. Nun kann jedem Intervall eine normalverteilte Zufallszahl an Fehlmessungen zugeteilt werden, um weißes Rauschen nachzubilden.

Für den im Prototyp konzipierten Ring mit 0° Neigungswinkel werden 18 ToF-Sensoren an die Positionen $s_{j=1..18, j=1}$ radial gleichverteilt zum x_{TCP} transformiert. Damit besteht das virtuelle LiDAR-System aus 576 Einzelstrahlen.

Virtuelle Roboter-Kinematik

Als Robotermodell wird ein Knickarmroboter mit sechs Freiheitsgraden modelliert. Der kinematische Aufbau entspricht dem Modell *KR180 R2500*. Da der Greifer stets in die positive Z-Richtung des TCP orientiert ist, entfallen zwei Freiheitsgrade des Modells.

Virtuelle Versuchsszene

Die Umgebung wird für den Risikofall A „Zusammenstoß“ angelegt. Je nach Versuch werden spezifische Körper in der Szene eingefügt. Die Roboterzelle ist dem Robotik-Versuchsfeld im produktionstechnischen Labor am *wbk Institut für Produktionstechnik* in Karlsruhe (Stand 2018) nachempfunden.

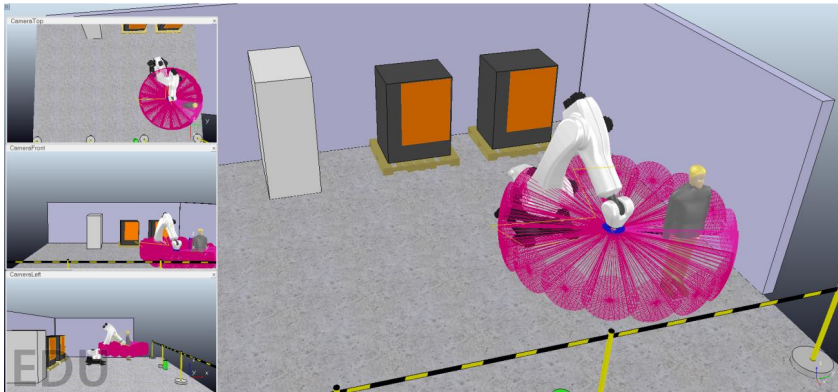


Abbildung 61: Simulations-Modell für SiL-Versuche

7.2 Validierung Modul Gefahrenabschätzung

Die in Kapitel 5 beschriebene Methode der Gefahrenabschätzung durch Veränderungserkennung wurde in gemeinsamen Arbeiten mit Nicklas (A_Nicklas 2018) untersucht. Exemplarisch werden hier die wichtigsten Erkenntnisse anhand von zwei Szenarien beschrieben.

Aufeinander aufbauend dient das erste Szenario als grundlegender Funktionstest und der Ermittlung essentieller Verfahrenseigenschaften. Das zweite Szenario zeigt die Leistungsgrenzen des Verfahrens.

7.2.1 Gefahrenabschätzung – Szenario 1

Das entworfene Szenario orientiert sich an Risikofall B. Erkennt der Greifer eine Abweichung von der Referenzkarte, soll ein Signal ausgelöst werden. Entspricht die Umgebung der Referenzumgebung, soll kein Signal ausgelöst werden.

7.2.1.1 Versuchsbeschreibung

Ziel des ersten Szenarios ist die Überprüfung der Gefahrenbeurteilung. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde der Fall in Abbildung 62 in der Draufsicht dargestellt. Der TCP bewegt sich vom Start- zum Zielpunkt 3m horizontal in x-Richtung durch den Arbeitsraum. Ein kubischer Volumenkörper, stellvertretend für das Magazin aus Risikofall B, befindet sich leicht versetzt zur Trajektorie.

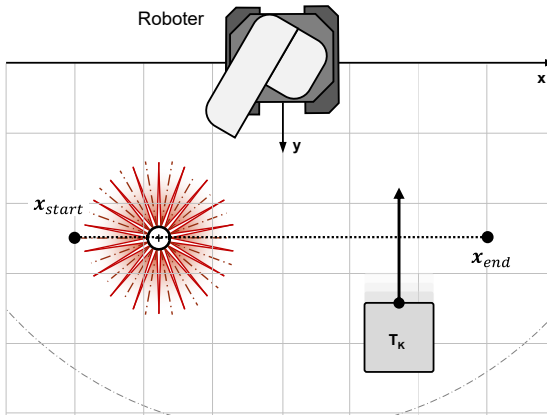


Abbildung 62: Aufbau von Szenario 1 für die Versuche zur Veränderungserkennung

Zunächst werden die Referenzfahrten und damit Messdaten für die Kartenerstellung simuliert. Anschließend wird die Karte erzeugt und vom Greifer geladen. Im zweiten Simulationsteil soll der Roboter a) verfahren ohne anzuhalten, solange das Magazin an der gleichen Position steht und b) anhalten, sobald eine Veränderung vorliegt. Anstatt einfach ein Torso-Objekt (stellvertretend für den Mensch) einzufügen, wird der kubische Körper T_k verschoben. Hierdurch wird der gleiche Effekt erzielt, mit dem Unterschied, dass gemessen werden kann, ab welchem Grad der Veränderung die Veränderungserkennung ausschlägt. Anstatt eines binären Testergebnisses können so mehr Erkenntnisse gewonnen werden.

In der Simulation sollen die wichtigsten Parameter auf die Funktionsfähigkeit in den gegebenen technischen Grenzen variiert werden. Da zu erwarten ist, dass die Auflösung der Karte einen großen Einfluss hat, wird die Größe eines Voxels m_n in der Karte mit der Kantenlänge l_m variiert. Die maximal vom Speicher der Steuerung adressierbare Auflösung beträgt 2cm. Als größtmögliche Auflösung wird 4cm gewählt, da sonst bei einer groben Aggregation keine Hand mit 10cm Durchmesser detektiert werden kann.

Analog ist ebenfalls zu erwarten, dass die Auflösung des Sensorblickfelds einen Einfluss hat. Da diese aus der mathematischen Überlegung (siehe Kapitel 5) größer als die Kantenlänge eines Voxels sein muss, werden Schritte von $\Delta d_i = 3\text{cm}$ bis $\Delta d_i = 10\text{cm}$ gewählt, was als Grenzwert gerade der definierten Anforderung entspricht. Der Sensor selbst wird als Nachbildung des eingesetzten ToF-Sensors als gauss'scher Sensor mit

einer Standardabweichung σ_s von 5mm und 25mm im Nahfeldbereich bei einem Öffnungswinkel von $\alpha_{FOV} = 30^\circ$ angenommen.

Um den Einfluss der Güte der Karte selbst bewerten zu können, werden mehrere Varianten gewählt. Als Referenz für das Verfahren wird eine ideale Karte ohne Fehler generiert. Dem stehen einerseits die erzeugten Karten gegenüber, bei denen verschiedene Robotergeschwindigkeiten für die Datenaufnahme zwischen $v_R = 125\text{mm/s}$ und 500mm/s variiert wurden, andererseits die aus den identischen Daten erzeugte Schwellwertkarte. In der Schwellwertkarte wurden zudem die Winkel- und kartesische Diskretisierung variiert.

7.2.1.2 Bewertungsmethodik

In Summe wurden in virtuellen, vollfaktoriellen Versuchen 96 Parameterkombinationen in zwei Szenarien simuliert, was zu 81,6 Mio. Messwertpaaren führt. Um die Bewertung zu vereinfachen, werden daher die mathematischen Maße der Sensitivität S_{SEN} und Spezifität S_{SPZ} genutzt, da diese die vielen Kombinationen und Einflüsse im dreidimensionalen Raum auf den eigentlich interessanten Aspekt reduzieren: Wie zuverlässig funktioniert das Verfahren?

Hierfür werden alle Messwertpaare in vier Fälle unterteilt: a) richtige Gefahrendetektion (true positive), b) fälschliche Gefahrendetektion (false positive), c) falsche Nichtdetektion (false negative) und d) richtige Nichtdetektion (true negative). Die Sensitivität gibt das Verhältnis der richtig erkannten positiven Messungen im Verhältnis zu allen auftretenden Gefahrensituationen an. Für Sicherheitsanwendungen sollte die Sensitivität einen sehr hohen Wert annehmen, was bedeutet, dass zuverlässig eine Veränderung erkannt wird. Die Spezifität ist der Anteil aller korrekt erkannten Nichtdetektionen im Verhältnis zu allen Detektionen. Die Spezifität wiederum muss ebenfalls im hohen Bereich liegen, sonst hält der Roboter oft an, obwohl keine wirkliche Gefahr vorliegt. Kurz gesagt kann die Sensitivität als Maß für die Zuverlässigkeit des Verfahrens und die Spezifität als Maß für die Robustheit des Verfahrens betrachtet werden.

7.2.1.3 Ergebnisse Online-Veränderungserkennung

In Abbildung 63 ist zu erkennen, dass das Verfahren in der Variante Online-Veränderungserkennung im ersten Szenario eine Sensitivität von mindestens 95,74% bei einer aufgezeichneten Karte erreicht. Die Verschlechterung gegenüber einer idealen Karte mit 97,84% beträgt 2,1% je nach gewählter Parameterkombination.

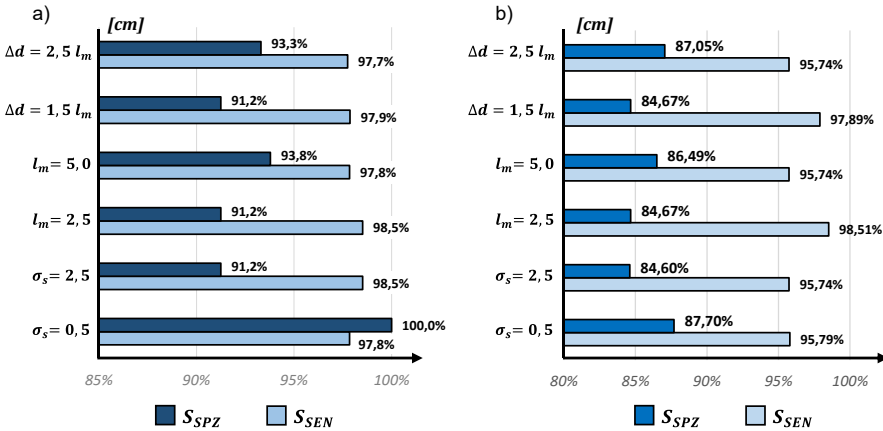


Abbildung 63: Sensitivität und Spezifität über ausgewählte Parameter für a) eine ideale Karte und b) eine aus Messdaten generierte Karte im Online-Verfahren

Hierbei muss beachtet werden, dass durch die kontinuierliche Verschiebung des Magazins bereits Messungen als „false negative“ gewertet werden, die deutlich kleiner sind, als von menschlichen Testobjekten verursacht. Die Schwelle, ab der eine Veränderung erkannt wurde, liegt oft im Bereich der Aggregationsbreite oder leicht darüber. Allerdings nur, wenn sich Fehler aus der Kartenaufzeichnung und Messung nicht kompensieren, sondern überlagern. Im schlechtesten Fall lag die Abweichung, ab der eine Veränderung erkannt wurde, bei 17cm. Ein menschlicher Torso wäre also immer erkannt worden.

Vorteilhaft hat sich eine größere Auflösung der Karte bei kleinerer Aggregationsbreite gezeigt. Die Varianz der Sensoren hat nur einen untergeordneten Einfluss auf den Abgleich gehabt, beeinflusst jedoch die Kartenerstellung.

Eine hohe Sensitivität wird über alle Versuche durch eine geringe Spezifität von bis zu 84,49% erkauft. Ein solches Verhalten ist plausibel: Wenn eine hohe Anzahl an Veränderungen richtig erkannt wird, steigt auch die Anzahl falsch erkannter Veränderungen und damit falscher Unterbrechungen im Prozess. Werden die Auflösung der Karte und die Aggregationsbreite stattdessen gröber gewählt, erhöht sich auch die Robustheit gegenüber fehlerhaften Auslösungen. Beide Kenngrößen verlaufen stets gegenläufig. So sind auch Kombinationen mit 100% Spezifität möglich, die in dieser Anwendung wiederum zu geringer Sensitivität von 97,8% führen.

Im Vergleich zwischen idealer Karte und generierter Karte werden deutliche Unterschiede sichtbar. Die Spezifität sinkt deutlich um bis zu 13,5% ab. Das bedeutet, dass die Prozessstabilität maßgeblich von der Korrektheit der Karte abhängt. Für den Betrieb muss jedoch der Sicherheitsaspekt im Vordergrund stehen.

7.2.1.4 Ergebnisse Schwellwertkarte

Die Ergebnisse des Schwellwertkarten-Verfahrens für das erste Szenario sind in Abbildung 64 dargestellt. Wird die Schwellwertkarte aus einer idealen Belegtheitskarte berechnet, liegen die Sensitivitäten im Bereich von mindestens 93,6% und damit etwas geringer als beim Online-Verfahren, allerdings bei einer Spezifität von 100%. Auch hier ist davon auszugehen, dass die Sensitivität im realen Betrieb etwas besser wäre, da wieder eine untere Veränderungsschwelle überschritten werden muss, bis das System auslöst.

Betrachtet man die Messwerte mit einer Lookup-Tabelle aus einer generierten Belegtheitskarte, werden die Werte jedoch deutlich schlechter. Bei immer noch 100% Spezifität liegt die Sensitivität nur noch zwischen 83,73% und 90,53%. Das bedeutet: fast jede zehnte Gefahrensituation wird nicht erkannt.

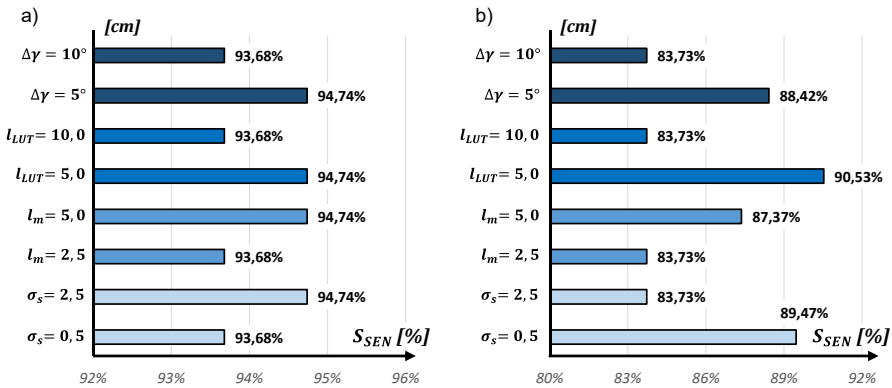


Abbildung 64: Sensitivität über ausgewählte Parameter für a) eine ideale Karte und b) eine aus Messdaten generierte Karte im Schwellwert-Verfahren

Bei genauerer Analyse der Daten ist aufgefallen, dass dieser Effekt auf die Kartenaufzeichnung zurückzuführen ist. Die Diskretisierung der Orts- und Lagedaten des Roboters führen bei einer ungenauen Karte zu ungenauen Entfernungen, da zusätzlich zum

Messfehler das Diskretisierungsintervall als Versatz einberechnet wird. Speziell die Winkelauflösung hat hier einen ausgeprägten Effekt. Für eine gute Karte konnten Veränderungen von durchschnittlich 8,5 cm erkannt werden. Ein menschlicher Torso würde demnach zu einer hohen Sensitivität führen und eine gute Erkennungsrate ermöglichen.

7.2.2 Gefahrenabschätzung - Szenario 2

Das zweite Szenario dient als Stresstest für das System. Ziel der Simulation ist insbesondere, die Berechnungsdauergrenzen zu testen, wenn mehrere Sensoren mehrere Objekte gleichzeitig erfassen.

7.2.2.1 Versuchsbeschreibung

In einer Arbeitsumgebung mit fünf Objekten wird eine Trajektorie bestehend aus zwei linearen Bewegungen quer durch die Hindernisse durchgeführt (siehe Abbildung 65).

Als Hindernisse T_1 bis T_3 sind wieder kubische Volumen stellvertretend für technische Objekte und zylindrische Torso-Objekte als Ersatz für Menschen im Arbeitsraum vorgesehen. Während das Objekt T_1 Zustände im Nahbereich abbilden soll, wurden mit T_3 und $T_{Torso,1}$ auch Objekte im Fernbereich platziert.

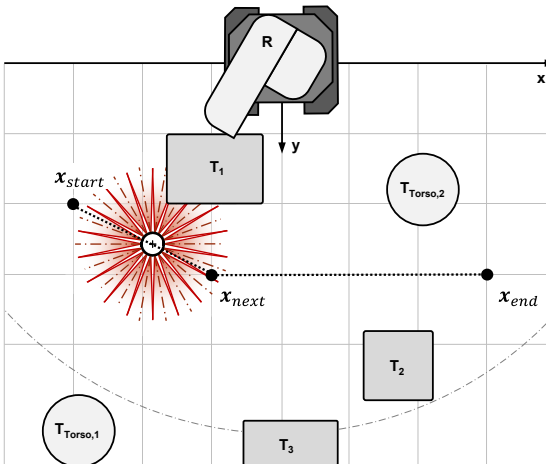


Abbildung 65: Aufbau von Szenario 2 für die Versuche zur Veränderungserkennung

7.2.2.2 Ergebnisse und Bewertung

Im zweiten Szenario lassen sich die Erkenntnisse des ersten Szenarios weitestgehend bestätigen, weshalb an dieser Stelle nur ergänzende Erkenntnisse diskutiert werden. Auffällig ist, dass durch die hohe Anzahl an Objekten im Arbeitsraum die Spezifität noch weiter absinkt. Der Einfluss der Sensoreigenschaften hat gegenüber den Karteneigenschaften weiter zugenommen. Speziell die Kombination aus hoher Kartengenauigkeit und geringer Sensorgenauigkeit erzeugt schlechte Sensitivität/Spezifitäts-Kombinationen.

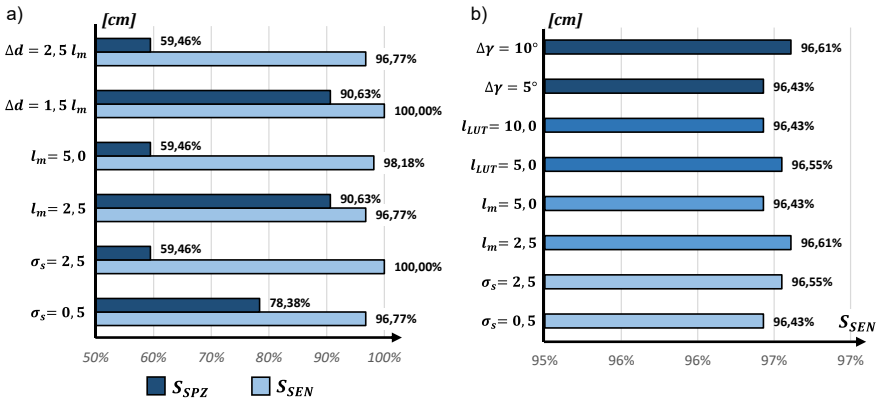


Abbildung 66: Sensitivität und Spezifität über ausgewählte Parameter im a) Online-Verfahren und b) Schwellwert-Verfahren für eine ideale Karte

Besitzt die aufgezeichnete Karte nur eine grobe Auflösung, nimmt die Sensitivität im Schwellwertverfahren deutlich stärker ab als beim Online-Verfahren. Abbildung 67 zeigt zwei Varianten für die erstellte Karte aus Szenario 2.

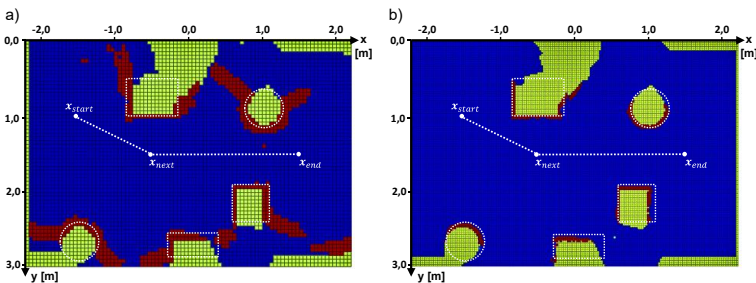


Abbildung 67: Karte mit a) grober und b) feiner Auflösung l_m (A_Nicklas 2018)

Blau dargestellt sind Voxel, die sicher leer sind und rot sind Voxel, welche sicher belegt sind. Grün bedeutet für diese Bereiche kann keine Aussage getroffen werden. Es ist erkennbar wie sich in der Karte mit grober Auflösung (a) deutlich Artefakte gebildet haben. D.h. es sind viele Bereiche als „belegt“ gekennzeichnet (rot), die eigentlich nicht belegt sind. Demgegenüber ist die Karte mit feiner Auflösung (b) mit deutlich weniger solcher Fehler behaftet. Dies verdeutlicht den notwendigen Kompromiss: Im Sinne der Rechenzeit sollte die Karte möglichst grob sein, aber im Sinne der korrekten Repräsentation der realen Umgebung muss die Karte auch hinreichend fein ausgelegt sein. Im Anwendungsfall sollten daher mehrere Karten erzeugt und bzgl. der Genauigkeit bewertet werden.

7.2.2.3 Berechnungsdauer

Der größte Nachteil des Online-Verfahrens wird bei Betrachtung der gemessenen Berechnungsdauer deutlich. Lediglich die Kombinationen mit grober Kartenauflösung können Rechenzeiten von 12ms erreichen. Oftmals lag die Berechnungsdauer jedoch sogar über 100ms. Das Sensorrauschen und die Aggregationsbreite haben hier quasi keinen Effekt, da sie die Anzahl an Verfahrensschritten nicht maßgeblich beeinflussen. Eine doppelte Kartenauflösung hat jedoch eine näherungsweise achtfache Rechenzeit zur Folge. Auch dieses Ergebnis ist plausibel, denn die Anzahl Voxel im Raum nimmt um den gleichen Faktor zu. Für eine Greifersteuerung sind diese Werte zu hoch, weshalb für Greifer lediglich das Schwellwertkarten-Verfahren zum Einsatz kommen kann. Für feine Winkelauflösungen von 5° kann hier eine mittlere Berechnungsdauer von 8ms erreicht werden. Wird nur eine grobe Auflösung verwendet, ist sogar eine mittlere Dauer von 3ms möglich.

Mit diesen Erkenntnissen wird nun die zweite Methode zur Kollisionsvermeidung untersucht. Eine Zusammenfassung aller Bewertungen erfolgt in Kapitel 7.5.

7.3 Validierung Modul Kollisionsvermeidung

Analog zur Validierung der Gefahrenbeurteilung wird auch die Validierung des Moduls „Kollisionsvermeidung“ erst in der SiL-Umgebung untersucht, um anschließend im realen Versuch getestet zu werden. Dies ist vor allem deshalb sinnvoll, weil die entwickelte Greifersteuerung erstmalig die Kontrolle über den Roboter übernimmt und eventuelle Steuerungsfehler in der Simulation keine Konsequenzen für die Hardware haben.

Da die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung bereits auf empirischen Daten beruht und nur wenige Einflussparameter besitzt, wird diese nicht im SiL-Ansatz überprüft. Daher umfasst die Simulation nur die Methoden zur Hindernisumfahrung.

7.3.1 Hindernisumfahrung – Szenario 1

Von den umfangreichen Arbeiten von Büsching (A_Büsching 2018) und Janzen (A_Janzen 2019) werden in dieser Arbeit exemplarisch die wichtigsten Erkenntnisse anhand zwei repräsentativer Szenarien vorgestellt, die die Methodik absichern.

7.3.1.1 Versuchsbeschreibung

Dieses Szenario überprüft die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Hindernisumfahrung und dient als Referenz beim Vergleich der beiden vorgestellten Methoden in Abschnitt 6.5. Der Roboter bewegt sich, wie in Risikofall A „Zusammenstoß“ beschrieben, auf einer linearen Trajektorie von Punkt *A* nach Punkt *B* (siehe Abbildung 68). Ein Mitarbeiter steht statisch leicht versetzt auf dem geplanten Pfad und der Roboter müsste den Handhabungsvorgang normalerweise unterbrechen. Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit bereits auf $v_{MRK} = 250\text{mm/s}$ reduziert ist und der Mensch bereits zum Start im Einflussbereich der Sensoren ist.

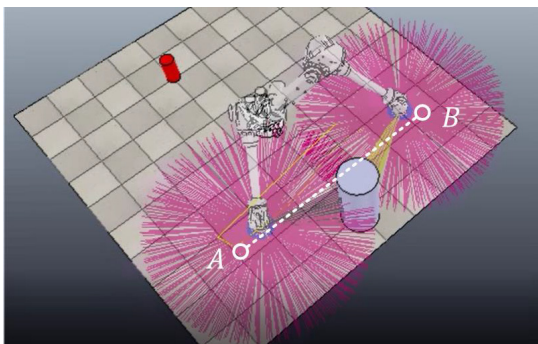


Abbildung 68: Software-in-the-Loop-Test der Hindernisumfahrung - Szenario 1

Nun soll der Roboter dem Hindernis ausweichen und auf Basis der Sensorik in der Greifersteuerung umfahren. Die Greifersteuerung sendet die Gelenkwinkelsignale über ein Interface an die Simulation und der virtuelle Knickarmroboter verfährt analog zum realen Modell.

7.3.1.2 Ergebnisse und Bewertung

Als wichtigste Erkenntnis gilt es festzuhalten, dass die Pfadgenerierung mittels der Sensordaten von der Greifersteuerung schnell genug berechnet werden kann, um den Regelkreis rechtzeitig und konstant mit neuen Soll-Vorgaben zu versorgen. Darüber hinaus wurde der virtuelle Roboter in jeder untersuchten Parameterkombination ohne Kollision zum Zielpunkt navigiert. Die generierte Trajektorie mit verschiedenen Verstärkungskoeffizienten ist in der Draufsicht in Abbildung 69 dargestellt.

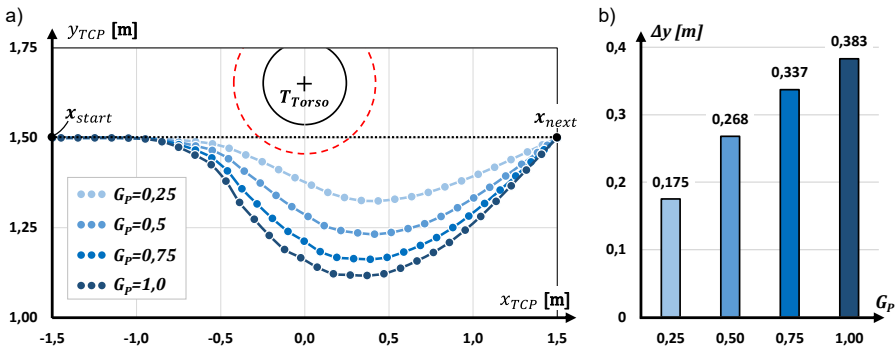


Abbildung 69: Versuchsergebnisse der adaptierten Potenzialfeldmethode: a) generierte Trajektorie für Szenario 1 und b) maximale Auslenkung je nach Verstärkungskoeffizient

Es ist leicht ersichtlich, dass mit steigendem Verstärkungskoeffizienten G_R die abstoßenden Kräfte des Hindernisses zu einer stärkeren Auslenkung der ursprünglichen Trajektorie führen. Mit steigendem Faktor wird der Einfluss etwas schwächer während er im unteren Bereich annähernd linear verstärkt. Dies ist plausibel, denn die hyperbolische Ansatzfunktion für F_R verläuft in gleichem Maße invertiert dazu.

Analog dazu verlängert sich auch die benötigte Zeit, um zum Zielpunkt zu gelangen: Während die eigentliche Prozesszeit bei 11,2s liegt, benötigt der ausweichende Roboter mit 12,65s rund 13% länger.

Beim Vergleich der beiden adaptierten Methoden fällt auf, dass der qualitative Verlauf der generierten Trajektorie fast identisch ist. Abbildung 70 zeigt die zurückgelegten Pfade für die adaptierte Potenzialfeldmethode basierend ausschließlich auf den Abstandsmessungen und die generalisierte Variante mit zusätzlicher Berücksichtigung

der geschwindigkeitsabhängigen Kräfte. Im zweiten Szenario wurden die Systemfunktionen bei deutlich erhöhter Komplexität erprobt.

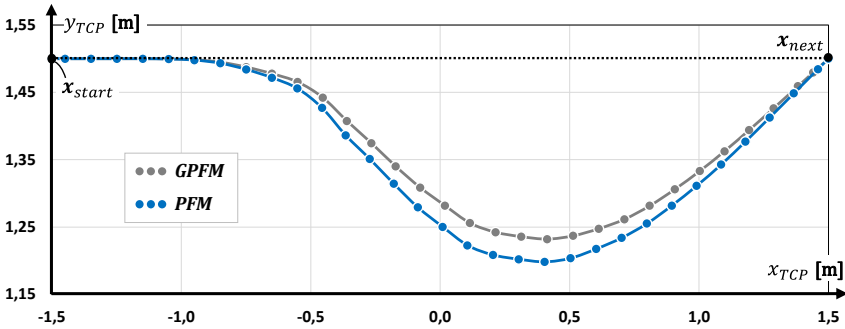


Abbildung 70: Vergleich der generierten Pfade von PFM und GPFM in Szenario 1

7.3.2 Hindernisumfahrung – Szenario 2

Das zweite Szenario dient als Stresstest für das System. Der Aufbau dient insbesondere der Validierung der Methode mit vielen simultanen Sensorwerten und damit konkurrierenden Kraftvektoren $F_{R,ij}$. Entscheidend ist ebenfalls, ob der Greifer trotz der vielen Objekte das Ziel erreichen kann.

7.3.2.1 Versuchsbeschreibung

Die geplante Trajektorie ist eine lineare Fahrt mit $v_{MRK} = 250\text{mm/s}$ von A nach B, dargestellt in Abbildung 71.

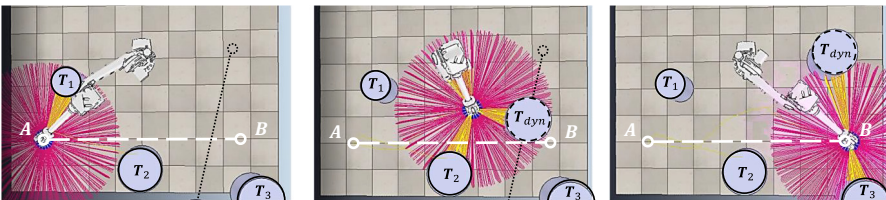


Abbildung 71: Software-in-the-Loop-Test der Hindernisumfahrung - Szenario 2

In der Szene befinden sich mehrere statische Objekte (T_1 bis T_3) und ein dynamisches Objekt, repräsentiert als Torsos bzw. angenähert als Zylinder. Erschwert wird die Ausweichbewegung dadurch, dass sich das dynamische Objekt T_{dyn} in Anlehnung an einen Menschen quer mit $v_{Mensch} = 200\text{mm/s}$ durch den Arbeitsraum bewegt. Der Greifer muss

sich reaktiv durch die Situation zum Zielpunkt arbeiten. Getestet wurden beide Varianten der Methode mit verschiedenen Verstärkungsfaktoren G_R .

7.3.2.2 Ergebnisse und Bewertung

Auch für das zweite Szenario wird das Ziel stets ohne Inkrafttreten eines Abbruchkriteriums erreicht. In Abbildung 72 ist ersichtlich, dass der generierte Pfad ab dem Startpunkt sofort unter Einfluss des Hindernis T_1 steht und abgelenkt wird.

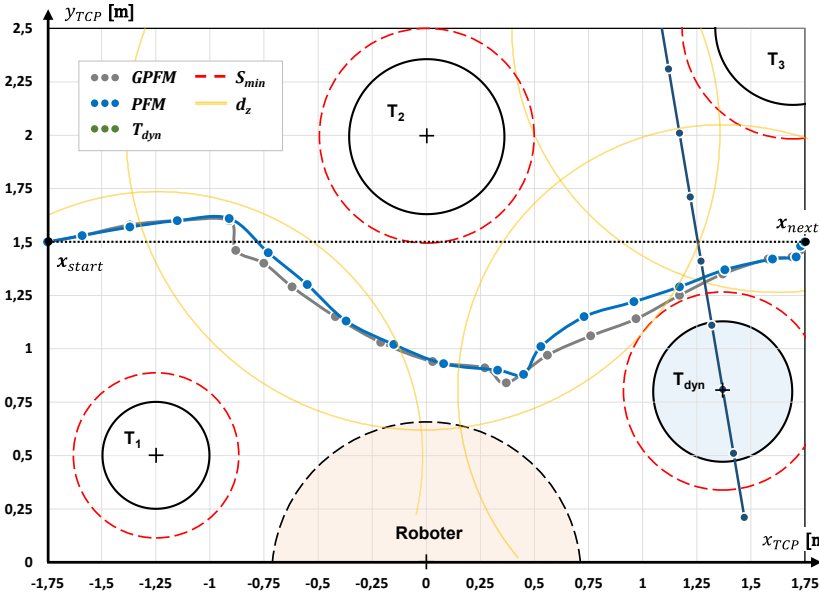


Abbildung 72: Vergleich der generierten Pfade von PFM und GPFM in Szenario 2

Im Bereich von $x = -0,8\text{m}$ beginnt das zweite Hindernis starken Einfluss zu nehmen und der Greifer wird deutlich umgelenkt. In der grau dargestellten, generalisierten Variante kommt es sogar zu einem abrupten Richtungswechsel. Anschließend wird der TCP in Richtung der Roboterkinematik gedrückt. Die abstoßende Schutzzone um den Roboter zeigt Wirkung und verhindert eine Selbstkollision. Vom dynamischen Hindernis geht eine abnehmende Wirkung aus, während es sich entfernt und der Greifer sein Ziel erreicht.

Im Vergleich zu einer idealen Fahrt ohne Hindernisse benötigt der Roboter für den Prozess im Fall der PFM 18,9% mehr Zeit. In der generalisierten Variante GPFM wird sogar 25,2% mehr Zeit benötigt. Zugleich ist die Trajektorie nicht glatter oder kürzer, sondern weist stärkere Schwankungen in der Richtungsänderung auf. Daher wird für die Versuche am realen Testsystem nur die Variante PFM mit positionsabhängigen Abstoßungskräften verwendet.

7.4 Validierung Gesamtsystem

Nach den Simulationsversuchen zur Validierung des Systems sollen diese Ergebnisse am realen Prüfstand verifiziert werden. Hierfür werden die drei Hauptbestandteile des Verfahrens in Kombination mit der entworfenen Sensorik sowie der Kommunikation zum konkreten Robotersystem untersucht.

Die Validierung orientiert sich hierbei an den in Kapitel 3 vorgestellten Risikofällen: Der Verletzungsgefahr durch Kollision mit dem Greifer und der Verletzungsgefahr durch Quetschung zwischen Robotersystem und der Umgebung.

7.4.1 Risikofall A: Stoßen

Nachfolgend werden die drei Varianten der Kollisionsvermeidung untersucht: Zunächst der Fall der Abstandsüberwachung mit sofortigem Stopp, anschließend die Geschwindigkeitsüberwachung und abschließend die Hindernisumfahrung. Alle Versuche wurden im produktionstechnischen Labor am *wbk Institut für Produktionstechnik* in Karlsruhe durchgeführt.

7.4.1.1 Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

In den Versuchen zur Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung soll verifiziert werden, ob ein Objekt rechtzeitig von der Sensorik erfasst wird und der Roboter vor einer Kollision zum Stehen kommt. Da für diese Versuche eine leere Referenzkarte hinterlegt wird, wird jedes Hindernis von der Gefahrenabschätzung als Gefahr erkannt. Aufgrund der Sensoreigenschaften ist zu erwarten, dass das Testobjekt einen Einfluss hat. Daher werden, wie in Tabelle 2 eingeführt, die Testobjekte T_{Hand} und T_{Torso} variiert: Jeweils mit hoher und geringer Reflexionsrate (siehe Abbildung 73).

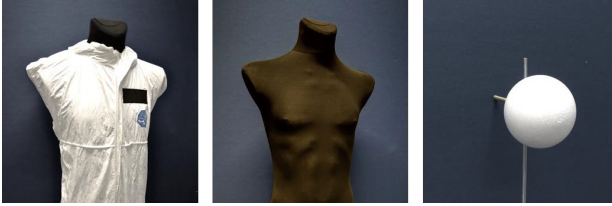


Abbildung 73: Testobjekte Torso, weiß $R>0,88$ (links); Torso, schwarz $R<0,17$ (Mitte) und Kugel, weiß $R>0,88$ (rechts)

Darüber hinaus wird die Robotergeschwindigkeit variiert. Da es ohne externe Messsysteme nicht möglich ist, die Bewegung von Testobjekten konstant und wiederholbar zu erfassen, wurden stattdessen Versuche mit stationären Hindernissen durchgeführt. Aus der Relativgeschwindigkeit lassen sich aber auch Rückschlüsse auf Fälle mit beweglichen Objekten ziehen. Es kann im Betrieb einer MRK-Anwendung nicht davon ausgegangen werden, dass die Annäherung an einen Mitarbeiter direkt in Sensororientierung erfolgt. Deshalb wird ebenfalls die relative Orientierung γ bzw. Verschiebung a variiert (siehe Abbildung 74).

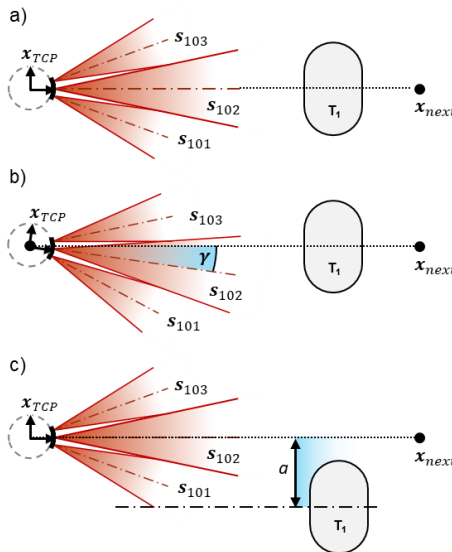


Abbildung 74: Variation der relativen Position zwischen Greifer und Testobjekt: a) direkt in Sensororientierung, b) verdreht um Winkel γ und c) verschoben um Abstand a

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 75 dargestellt und entspricht dem bereits mehrfach beschriebenen Risikofall A. Der Roboter bewegt den TCP auf einer linearen Trajektorie entlang der X-Achse, auf welcher sich das jeweilige Testobjekt befindet.

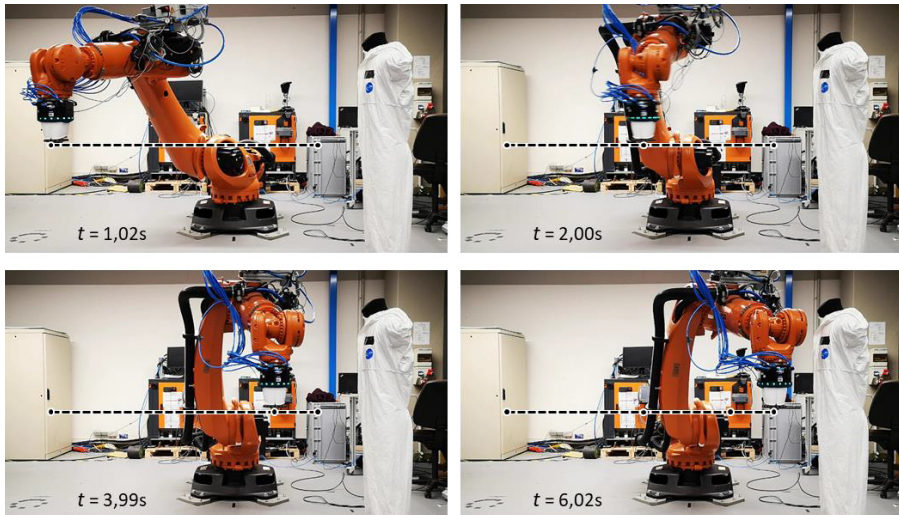


Abbildung 75: Versuchsaufbau der Abbremsversuche, Darstellung mit $v_R = 1\text{ m/s}$ und linearer Verzögerung bis S_{min}

Erkenntnisse und Bewertung

An dieser Stelle sollen die wichtigsten Erkenntnisse der verschiedenen Versuchsreihen aus Janzen (A_Janzen 2019) und weiteren Versuchen vorgestellt und eingeordnet werden.

Als wichtigste Erkenntnis lässt sich festhalten, dass die Bremsung nach der Detektion eines Hindernisses zuverlässig und in jedem Fall auslöst. Es muss jedoch eingeschränkt werden, dass das Testobjekt Hand in deutlich geringerem Abstand d_{real} (ca. 0,6m) als der Torso (ca. 1,3m) erkannt wird. Dies hat zur Folge, dass die Detektion erst kurz vor oder im Fall der Hand mit geringer Reflexionsrate $T_{Hand,S}$ erst nach dem sicheren Mindestabstand erfasst wird. Dies ist kritisch zu bewerten, da die Kollision bei hohen Robotergeschwindigkeiten lediglich aufgrund der Sicherheitsfaktoren in der Berechnung des sicheren Mindestabstands vermieden werden konnte. Für Anwendun-

gen, in denen die Stoßgefahr zwischen Händen und z.B. einem scharfkantigen Werkstück im Greifer vermieden werden muss, sollte daher eine Geschwindigkeit $<0,5\text{m/s}$ gewählt werden.

Abbildung 76 zeigt die Ergebnisse für die Versuche mit der Hand im Detail. In Diagramm a) ist zu erkennen, dass der Sensor den Abstand q_{max} stets etwas größer schätzt als die tatsächliche Distanz d_{real} . Diagramm b) zeigt den benötigten Bremsweg des Roboters S_R im Vergleich zum verbleibenden Restabstand zum Stillstand. Im letzten Diagramm c) ist zu erkennen, dass die Anhaltezeit T_R des Roboters gut mit dem benötigten Bremsweg S_R korreliert. Für den Nahfeldbereich sind diese Ergebnisse als gut zu bewerten. Wobei eingeschränkt werden muss, dass der Mensch im Sinne der Sicherheit helle Kleidung tragen sollte.

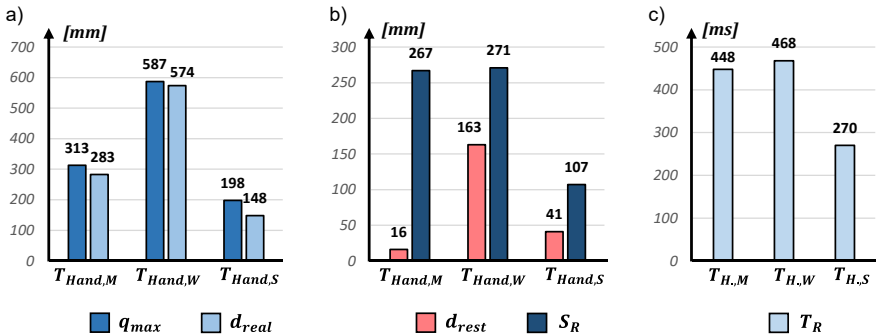


Abbildung 76: Ergebnisse der Versuche zur Abstandsüberwachung mit $v_R=1\text{m/s}$

Für das Testobjekt Torso lassen sich vergleichbare Aussagen treffen (Abbildung 77). Beim Testobjekt Torso ist der Unterschied in der Detektionsreichweite noch größer. Während der weiße Torso bei einer Geschwindigkeit von $v_R = 1\text{m/s}$ sicher im Abstand von 124cm erkannt wird kann der dunkle Torso erst ab 41cm Abstand erfasst werden. Damit ist der Abstand bereits kleiner als der kritische Sicherheitsabstand S_{min} von 53cm und die Bremsung wird sofort ausgelöst. Nur aufgrund der konservativen Abschätzung der Sicherheitsabstände ist der Bremsweg immer noch kurz genug, um eine Kollision zu vermeiden.

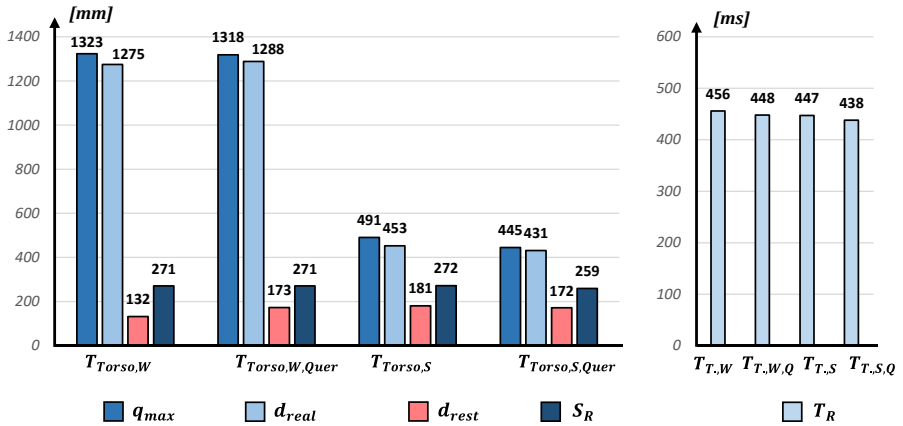


Abbildung 77: Ergebnisse der Versuche zur Abstandsüberwachung mit $v_R = 1m/s$

Als zweite wichtige Erkenntnis bestätigt sich, dass der von der Sensorik erfasste Abstand bei höheren Geschwindigkeiten konstant größer geschätzt wird, als er tatsächlich ist. Dies ist vermutlich der Verzögerung zwischen Messung und Übertragung des Messwerts an die Datenverarbeitung zuzuschreiben. In Abbildung 78 ist gut zu erkennen, dass der gemittelte Fehler mit geringerer Geschwindigkeit abnimmt und als Grenzwert gegen 0 strebt. Wichtig ist festzuhalten, dass diese Abweichung sich mit der sensorbedingten Messungenauigkeit überlagert. In weiteren Untersuchungen ist daher zu überlegen, ob ein zusätzlicher Term im Modell des kritischen Sicherheitsabstands zu berücksichtigen ist.

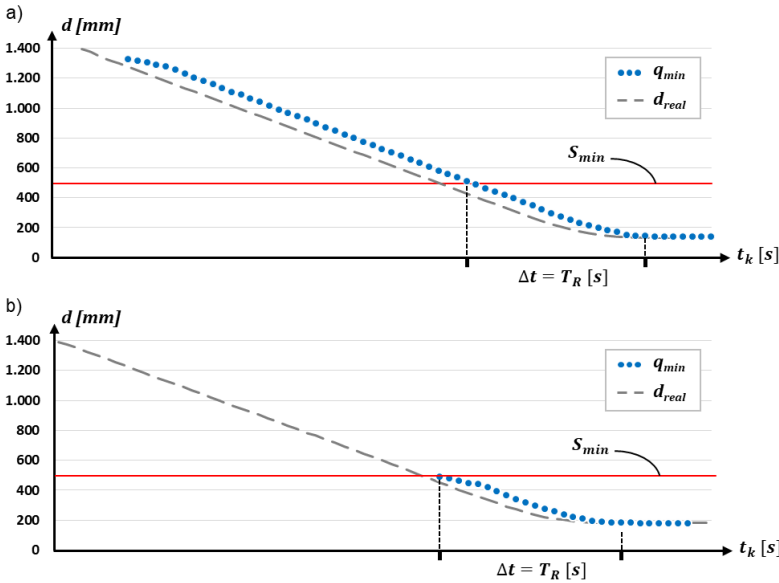


Abbildung 78: Vergleich der Abbremsung für das Testobjekt Torso
a)weiß und b)schwarz

7.4.1.2 Geschwindigkeitsregelung

Mithilfe der Versuche zur Geschwindigkeitsüberwachung soll validiert werden, ob und wie gut der Roboter die hinterlegten Geschwindigkeitsprofile aus Kapitel 6.4.1 einhält. Analog zu den Versuchen der Abstandsüberwachung wird das Testobjekt in verschiedenen Reflexionsgraden variiert. Versuche werden jedoch nur mit dem Torso durchgeführt, da nur dieser in ausreichendem Abstand erfasst werden kann. Der Aufbau bleibt konstant. Verändert werden die Geschwindigkeitsprofile je Abstand und die Eingangsrobotergeschwindigkeit.

Erkenntnisse und Bewertung

Als zentrale Erkenntnis lässt sich festhalten, dass der Roboter mit geringem Nachlauf den Soll-Vorgaben für die Geschwindigkeit aus der Greifersteuerung folgen kann. Die bereits im Roboter-Modell berücksichtigten Verzögerungen können eingehalten werden

und eignen sich für die Geschwindigkeitsregelung je Abstand. In Abbildung 79 ist ebenfalls gut zu erkennen, dass die Erfassung des Abstands kontinuierlich über mehrere Sensoren funktioniert. Zunächst wird der Abstand von Sensor q_{11} erfasst, dann von q_{12} und im weiteren Verlauf zusätzlich von q_{13} . Wichtig ist festzuhalten, dass der Übergang zwischen den Sensoren glatt ist und somit eine stabile Regelung der Geschwindigkeit ohne Sprünge ermöglicht.

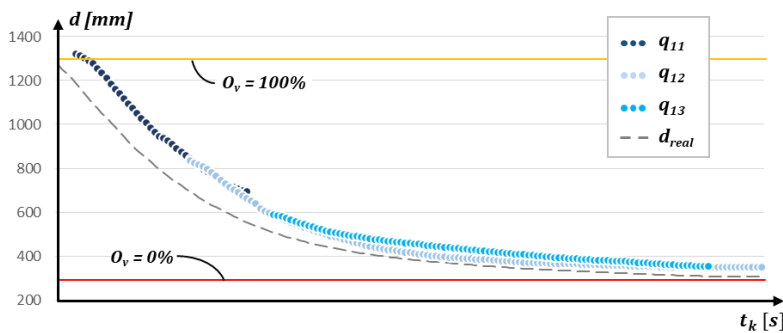


Abbildung 79: Kontinuierliche Abstandsmessung über mehrere Sensoren des Arrays

7.4.1.3 Hindernisumfahrung

Als dritte Funktion wird die Methodik der Hindernisumfahrung validiert. Hierfür soll das System ein unbekanntes Objekt umfahren, indem der Greifer die Roboterkinematik auf Basis der eigenen Sensordaten steuert. Als Ausgangsbasis dient weiterhin der Risikofall A „Zusammenstoßen“.

Versuchsbeschreibung & -planung

Als Szenario wird weiterhin der Versuchsaufbau aus Abbildung 74 verwendet. Der TCP soll eine lineare Trajektorie parallel zur X-Achse abfahren. Das Testobjekt wird im Punkt x_T platziert, sodass die Weiterfahrt nicht ohne Zusammenstoß möglich wäre. Geprüft werden soll nun, ob die entwickelten Methoden geeignet sind, das Objekt rechtzeitig zu erfassen und in den Greifer-Steuerungsmodus zu wechseln. In Abbildung 80 ist exemplarisch ein Ausweichmanöver im Versuchsaufbau zu sehen.

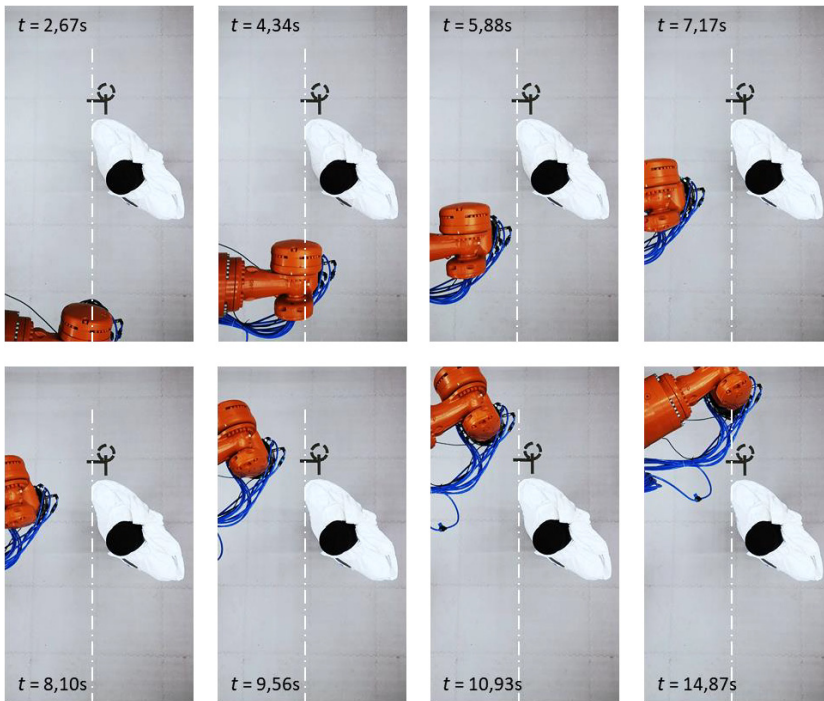


Abbildung 80: Darstellung der Abweichung von der programmierten Trajektorie (weiß dargestellt) über die Zeit, perspektivisch von oben.

Weiterhin soll evaluiert werden, wie gut die adaptierte Potenzialfeldmethode geeignet ist, um das Hindernis erfolgreich zu umfahren und somit das Ziel zu erreichen, ohne einen Menschen zu gefährden.

Es ist unrealistisch zu erwarten, dass die Hand eines Mitarbeiters umfahren werden muss. Der Mensch ist deutlich reaktionsschneller und würde die Hand umgehend zurückziehen. Aus diesem Grund wird nur der Torso als Versuchsobjekt gewählt. Als Robotergeschwindigkeit wird die erlaubte MRK-Geschwindigkeit von 250mm/s gewählt.

Erkenntnisse und Bewertung

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Methodik zum Umfahren von Hindernissen mit der Greifersteuerung grundsätzlich funktioniert. Kritisch für die erfolgreiche Hindernisumfahrung ist das korrekte und frühzeitige Erfassen des Testobjekts. Die in Versuchen erzielten Trajektorien sind in Abbildung 81 dargestellt.

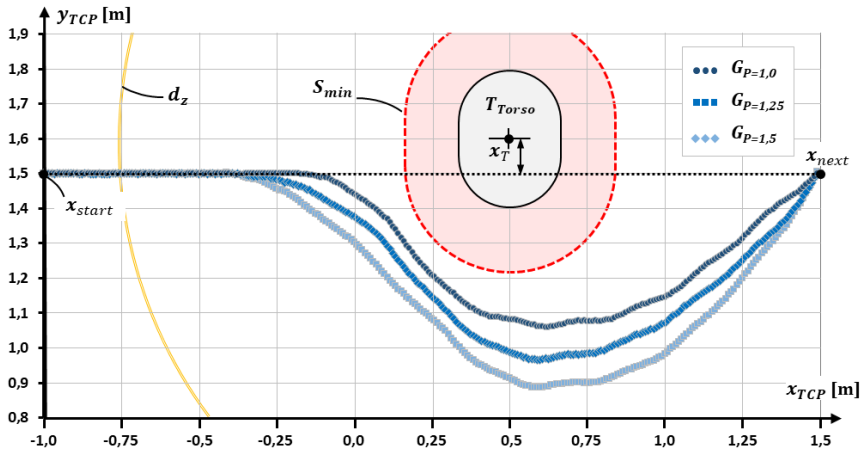


Abbildung 81: Generierte Pfade der adaptierten Potenzialfeldmethode für verschiedene Verstärkungskoeffizienten G_P

Im Fall des weißen Torsos ist, wie in den vorangegangenen Versuchen, eine Erfassung nahe der maximalen Detektionsreichweite der Sensoren zu beobachten. Dies führt dazu, dass beim Unterschreiten von d_z und damit dem Eindringen in die Detektionszone in sicherer Entfernung vom Objekt in den Greifer-Steuerungsmodus gewechselt wird. Hierfür muss der Roboter verzögert werden. Anschließend wird, wie in Kapitel 6.6 beschrieben, vom Greifer gesteuert, weiter gefahren.

In den Versuchen war zu erkennen, dass dieser Vorgang noch nicht vollständig ohne Verzögerungen abläuft. Bei einer Geschwindigkeit von $v_R = 0,25\text{m/s}$ kann der Übergang mit leichtem Ruckeln während der Fahrt vollzogen werden, jedoch ist dies für einen Dauerbetrieb nicht zu empfehlen. Bei höheren Eingangsgeschwindigkeiten wird daher wahlweise bis zu MRK-Geschwindigkeit $0,25\text{m/s}$ verzögert und dann die Steuerung übergeben oder kurzzeitig bis zum fast Stillstand abgebremst und dann die Steuerung umgeschaltet.

Bei Betrachtung der generierten Ausweichtrajektorien ist ersichtlich, dass die abstoßenden Kräfte zunächst keinen erkennbaren Einfluss haben. Erst in einem Abstand zwischen ca. 0,75m und 1m, je nach Verstärkungskoeffizient, beginnt langsam eine Richtungsänderung. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Sensororientierung zur Bewegungsrichtung genau zwischen zwei Sensoren gewählt wurde und somit die Ausweichrichtung zum Roboter hin erfolgt. Gemäß der hyperbolischen Ansatzfunktion für die virtuellen Kräfte ist zu beobachten, dass die Richtungsänderung bei höherem Verstärkungskoeffizient früher und flacher verläuft. Bei kleiner gewähltem Koeffizienten startet die Richtungsänderung später, aber dafür mit deutlich stärkerer Krümmung der Trajektorie. Aufgrund der frühen Detektion verlaufen alle Trajektorien stetig und ohne ruckartige Richtungsänderungen.

Im Vergleich zur Idealtrajektorie aus den Software-in-the-Loop-Validierungen fällt auf, dass die Richtungsänderung später startet und insgesamt stärker ausfällt als in der Simulation (siehe Abbildung 82). Dies ist vermutlich auf zwei Effekte zurückzuführen:

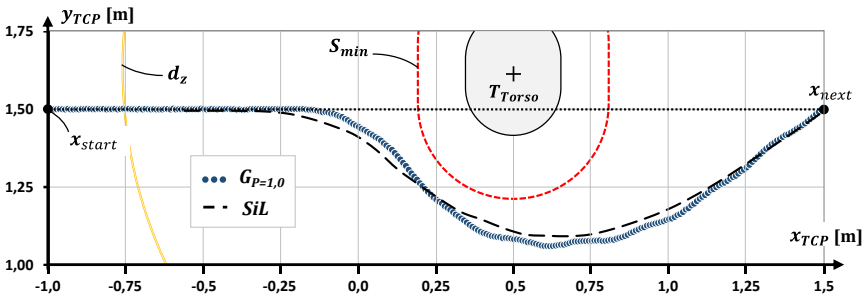


Abbildung 82: Vergleich der generierten Pfade aus Software-in-the-Loop-Simulation und realem Versuch mit $G_P=1,0$

- Abweichungen in den Abstraten und zusätzlichen Latenzen bei der Signalübertragung: Während die Simulation mit jedem Zeitschritt alle Signale verarbeitet hat, bewegt sich der Roboter auch zur Laufzeit. Darüber hinaus arbeitet der Verarbeitungsprozess für die Sensordaten mit einer geringeren Frequenz (50Hz) als der Interpolator (250Hz). Die entstehenden Latenzen führen zu einem nachgeführten Richtungsvektor im Vergleich zur Idealtrajektorie.
- Die Sensoren schätzen auch in den Versuchen zur Hindernisumfahrung den Abstand größer als er in Wirklichkeit ist. Demnach sind auch die virtuellen Abstoßungskräfte geringer. Folglich nähert sich der Greifer dem Objekt zuerst

stärker an, dann werden die Abstoßungskräfte größer und er wird weiter von dem Hindernis weggedrückt.

Die aufgezeichneten Ausweichpfade stellen erwartungsgemäß nicht die kürzeste Ausweichroute um das Objekt zwischen Start- und Zielpunkt dar. Nachdem der Greifer bereits das Objekt bei $x = 0,5\text{m}$ passiert hat, wird die Auslenkung nicht direkt kleiner, sondern steigt noch leicht an. Dies ist durch die weiterhin wirkenden Abstoßungskräfte begründet. Der Greifer befindet sich hier immer noch im starken Einflussbereich des Stör-objekts, weshalb erst ab $x = 1,1\text{m}$ im Abstand von $q_{min} = 732\text{mm}$ der Einfluss stark genug nachlässt und ein direkterer Weg zum Zielpunkt generiert wird.

Zyklische Doppelerfassung während des Ausweichens

Weiterhin fällt auf, dass die im Versuch generierten Trajektorien im Vergleich zum SiL-System nicht glatt sind, sondern charakteristische Wellen haben. Dies ist besonders gut zu erkennen an den Umkehrpunkten in Abbildung 83 im Bereich von $0,5\text{m}$ bis $0,9\text{m}$.

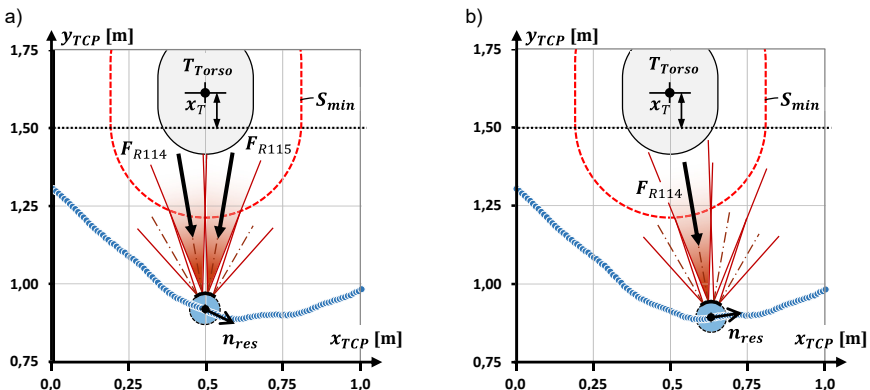


Abbildung 83: Oszillation des Richtungsvektors durch die zyklische Detektion des Objekts mit a) zwei Sensoren und b) einem Sensor des Arrays

Dieser Effekt ist auf die Doppelerfassung des Hindernisses durch zwei benachbarte Sensoren zurückzuführen. Im Gegensatz zum virtuellen Sensormodell ist der reale Kegel des Blickfelds nicht starr bei einem Öffnungswinkel von $\alpha = 10^\circ$ begrenzt. Wie bereits in den Versuchen zum Versatz, wird das Objekt im Übergang zwischen zwei Sen-

soren kurzzeitig von beiden detektiert. Damit werden die abstoßenden Kräfte mehrfach berücksichtigt und folglich ändert sich zyklisch die Orientierung des Richtungsvektors. Mit zeitlicher Verzögerung ist diese Oszillation im generierten Pfad erkennbar.

Zusammenfassung

Abschließend lässt sich festhalten, dass die entwickelte Methodik zur Hindernisumfahrung aktiv in MRK-Szenarien genutzt werden kann, um eine Kollision mit dem Menschen zu vermeiden. Voraussetzung ist jedoch, dass der Mensch seine Position beibehält. Für einen gehenden Menschen ist der Ausweichmechanismus aufgrund der Abstraten und Signalverarbeitungszeiten noch zu langsam. In weiteren Forschungsarbeiten sollte untersucht werden, wie eine Doppeldetektion rechnerisch gefiltert bzw. abgeschwächt und der Übergang zwischen Greifer- und Robotersteuerung verbessert werden kann.

7.4.2 Risikofall B: Quetschung

Um die Erkenntnisse der Simulation zu bestätigen, wird ein ähnlicher Versuch zu den simulierten Szenarien aufgebaut. Da in der Realität die Verschiebung eines Objekts im Raum aber schwieriger messbar ist, wird vereinfacht getestet, ob ein menschlicher Torso bzw. eine menschliche Hand gegenüber einer sicheren Referenzumgebung rechtzeitig erkannt wird. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 84 veranschaulicht:

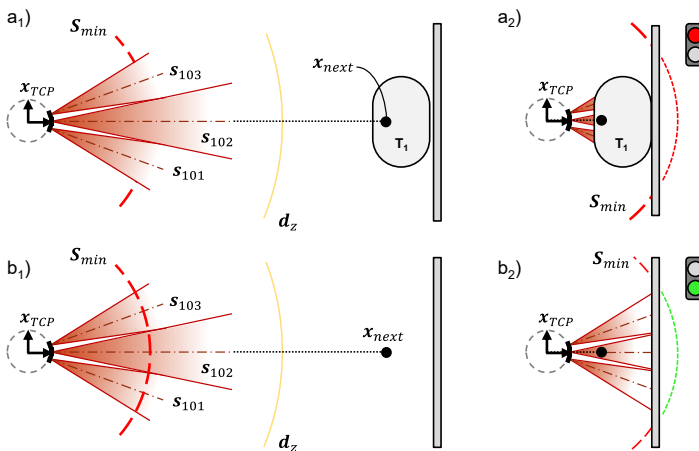


Abbildung 84: Aufbau von Risikofall B für die Versuche zur Veränderungserkennung

Versuchsbeschreibung

Der Roboter fährt linear auf eine Wand zu und soll a) richtig erkennen (= true positive), wenn ein Mensch das Ziel blockiert, jedoch b) weiterfahren (= true negative) wenn kein Hindernis vorliegt, obwohl der sichere Mindestabstand S_{min} unterschritten ist.

Ohne Gefahrenabschätzung würde der Roboter in diesem Fall immer von einem Hindernis ausgehen müssen, sobald der sichere Mindestabstand unterschritten wird. Das System muss anhalten und würde sein Ziel nicht erreichen. Für die Auswertung werden weiterhin die Sensitivität und Spezifität verwendet. Analog zu den Bremsversuchen werden Versuche mit dem Testobjekt Torso sowie Hand vorgenommen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 85 dargestellt.

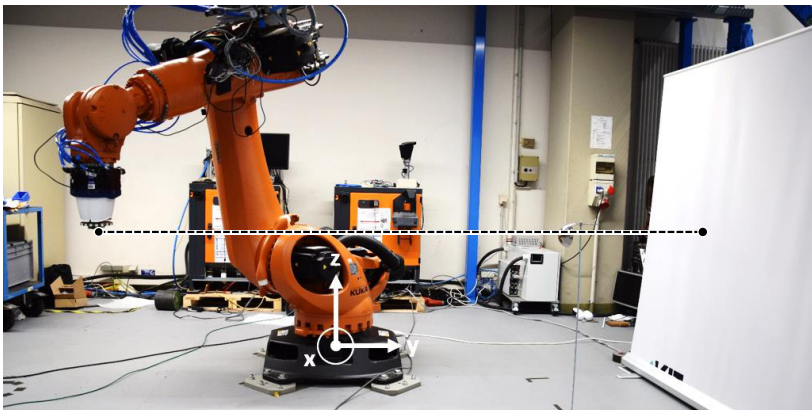


Abbildung 85: Versuchsaufbau der Veränderungserkennung

Ergebnisse & Bewertung

Die wesentlichen Erkenntnisse sollen exemplarisch am Versuch mit $v_R=0,25\text{m/s}$ und dem weißen Torso als Testobjekt diskutiert werden. Die Kennlinien des Versuchs sind in Abbildung 86 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die Messreihe ohne Hindernis (hellblau) nahezu ideal zum in der Karte hinterlegten Abstand (grau) verläuft. Eine Abweichung entsteht hauptsächlich durch die Diskretisierung des Abstands in der Karte. Bei der Messung mit aufgestelltem Torso hingegen (dunkelblau) nimmt die Abweichung zwischen Messwert und Karte zyklisch zu. Die Zyklen entstehen durch die Diskretisierung des Arbeitsraums in Form der Karte. Der Abstand wird nicht kontinuierlich berechnet, sondern springt jeweils zum nächstgelegenen Voxel.

In Diagramm c) ist die nachträglich ausgewertete Wahrscheinlichkeit P dargestellt. Erstmals bei einer Abweichung von 74mm und im Abstand von 726mm wird die potenzielle Gefahr detektiert. Dies ist bereits deutlich vor dem Unterschreiten des Mindestsicherheitsabstands. Es ist allerdings auch zu erkennen, dass die Abschätzung nach der ersten Detektion noch mehrfach schwankt, bis ab einem Abstand von 634mm kontinuierlich die unsichere Situation erkannt wird.

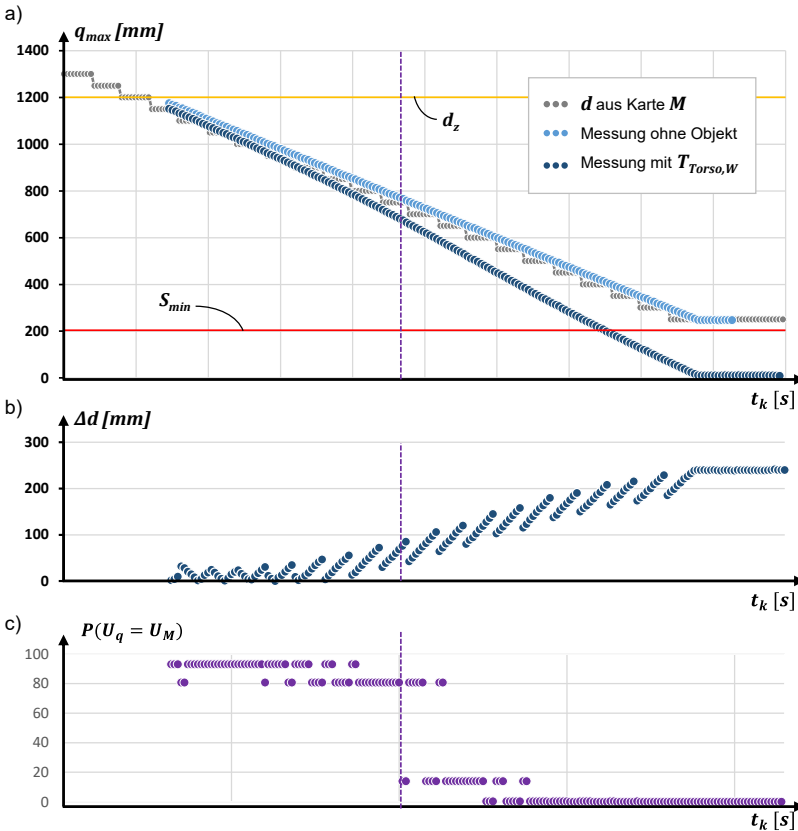


Abbildung 86: Verläufe der Abstandsmessungen bei $v_R=0,25m/s$ und Gefahrenabschätzung mittels idealer Karte und Berechnungsverfahren

Dieser Effekt wirkt sich negativ auf die Sensitivität des Verfahrens aus, da die hohe Anzahl falsch negativer Messungen in großem Abstand mit in die Kennzahl einfließt.

So liegt die Gesamtsensitivität lediglich bei $S_{\text{SEN.Ges}} = 58\%$. Dies täuscht, denn mit höherer Nähe zum Objekt steigt die Sensitivität auf bis zu 91% unterhalb eines Abstands von 700mm zu einem Hindernis. Der Grund ist, dass die Sensoren die Nearest-Target-Hypothese in der Realität bei großem Detektionsabstand nicht vollständig erfüllen und daher der Unterschied zwischen Torso und Wand soweit schwimmt, dass die Gefahrenabschätzung kein Urteil treffen kann.

Positiv ist hervorzuheben, dass die Spezifität in allen Fällen den Wert $S_{\text{SPZ}}=1$ annimmt. Das bedeutet, dass der Prozess nicht aufgrund von falsch positiven Messungen unterbrochen wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Prinzip der Gefahrenabschätzung über eine Veränderungserkennung grundsätzlich funktioniert. Eine Veränderung durch Anwesenheit eines menschlichen Torsos kann ab einer Detektionsreichweite von 0,7m sicher erfasst werden, um einen Zusammenstoß bzw. eine Quetschung zu vermeiden. Eine Hand, näherungsweise als Kugel 100mm Durchmesser, kann erst im Nahbereich von weniger als 0,4 m zuverlässig erkannt werden, wenn sie direkt vor einer Fläche angeordnet ist. Kritisch ist die niedrige Sensitivität des Verfahrens bei großen Abständen zu bewerten. Diese führt dazu, dass ein frühzeitiges Erkennen erschwert wird und damit eine Hindernisumfahrung seltener möglich ist. Ein Lösungsansatz könnte sein, die Abstandsüberwachung mit der Gefahrenabschätzung zu kombinieren, um eine Variable für die Geschwindigkeitsregelung zu definieren.

7.5 Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Validierung konnten bestätigen, dass der vorgestellte Ansatz der Kollisionsvermeidung für Industrieroboter in der MRK über Sensoren im Greifer funktioniert. In den Versuchen wurde gezeigt, dass die identifizierten Problemstellungen der Wahrnehmung, Gefahrenbeurteilung und Kollisionsvermeidung gelöst werden können.

Die neuartige LiDAR-Sensorik hat die Testobjekte, wie gefordert, in deutlich weiterem Abstand vom Greifer erfasst, als es im Stand der Technik bekannt war und kann mit dem in Kapitel 4 beschriebenen Ring-Konzept einen direkten Sicherheitsbereich um den Greifer bereitstellen. Speziell für den Einsatz für große Industrieroboter im MRK-Betrieb ist die Detektionsreichweite mit bis zu 1,3m ausreichend, um Bremsungen trotz großem Nachlauf zu ermöglichen.

Hinsichtlich dieser Kollisionsvermeidung wurde gezeigt, dass die entwickelten Methoden einen Zusammenstoß zwischen Mensch und Robotersystem rechtzeitig identifizieren und verhindern können. Bis zu einer Robotergeschwindigkeit von 1m/s konnte die Annäherung an einen menschlichen Torso in ausreichendem Abstand erfasst werden, um vom Greifer einen Stopp auszulösen und ohne Kollision zum Stillstand zu kommen. Hierbei müssen die Eigenschaften der Kleidung eines potenziellen Mitarbeiters im Arbeitsraum unbedingt Berücksichtigung finden. Im Fall der schlechtesten Reflexionsfähigkeit, einem schwarzen Textil, kann der Stopp nur sehr knapp mit 17cm Restabstand eingehalten werden. Demnach ist es empfehlenswert im Sinne der Sicherheit weiße Kleidung mit hoher Reflexionsfähigkeit vorzuschreiben. Diese wird von der Sensorik bereits im Abstand von ca. 1,30m erkannt und ermöglicht damit einen komfortablen Restabstand bzw. kompensiert eine mögliche Bewegung des Mitarbeiters in Richtung des Roboters.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Im Zeitalter von internationaler Marktpreisbildung stehen produzierende Unternehmen unter enormem Druck, Produkte effizient und kostengünstig zu fertigen. Dies gilt insbesondere für Hochlohnländer wie Deutschland. Zugleich sinken die Losgrößen gleicher Produkte aufgrund von Variantenvielfalt stark ab. Die Produktion der Zukunft benötigt daher einen Kompromiss aus der Flexibilität manueller Prozesse einerseits und der Zeit- und Kosteneffizienz einer vollautomatisierten Produktionsanlage andererseits. Die physische Zusammenarbeit zwischen Menschen und Robotern ist ein Ansatz Flexibilität und Effizienz miteinander zu verbinden.

Im vergangenen Jahrzehnt konnte diese Mensch-Roboter-Kollaboration mit der Einführung und Verbreitung kleinerer Leichtbau-Roboter mit Kraftbegrenzung ermöglicht werden. Die eingesetzten Werkzeuge am Flansch sind aber häufig nicht auf die besonderen Anforderungen an MRK-Applikationen angepasst. Kollisionen mit dem Mitarbeiter wurden z.T. in Kauf genommen, mussten aber biomechanisch ungefährlich sein.

Um Unfallfolgen weiter zu minimieren und die Akzeptanz bei Mitarbeitern zu erhöhen, werden abstandsüberwachende Systeme über dem Arbeitsbereich verwendet. Diese Ansätze haben jedoch den Nachteil, dass Verdeckungen auftreten können und Mitarbeiter nicht richtig erfasst werden. Vorteilhafter ist es daher Annäherungs- bzw. Abstandssensoren zur Detektion von Objekten direkt am Robotersystem anzubringen.

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Sensorprinzipien für die Integration in Endeffektoren am Beispiel von Kompaktgreifern verglichen. Kapazitive Sensoren in Greifern erreichen hohe Abtastraten, sie können Objekte aber nur über kurze Distanzen von weniger als 20cm erfassen. Zudem wird eine Annäherung oft ungenau detektiert, weshalb sie sich für leistungsfähigere Industrieroboter wenig eignen. Ultraschallsysteme leiden unter einer geringen Abtastfrequenz und langen Abklingraten. Lichtbasierte Laufzeitsysteme (ToF) haben im Gegensatz dazu höhere Abtastraten bei geringerer Laufzeit des Signals und eignen sich nach einem Vergleich der verschiedenen Prinzipien am besten für eine Integration in Greifer.

Aufbauend auf der Auswahl von ToF-Sensoren vom Typ *VL53L1x* der Fa. *STM* wurde ein Konzept für die Verschaltung mehrerer Einzelsensoren zu einem LiDAR-Array erarbeitet. Die Gestaltung in Form von Ringen für Kompaktgreifer hat sich als geeignet

erwiesen, um einen sphärischen Sicherheitsraum um den Greifer und sein Werkstück mit einer Reichweite von maximal 1,3m Radius zu schaffen. Damit kann ein größerer Sicherheitsabstand realisiert werden und somit eine höhere Verfahrensgeschwindigkeit gewählt werden.

Aus der großen Detektionsreichweite ergibt sich eine neue Problemstellung: Der Greifer nimmt einen großen Bereich seiner Umgebung wahr, kann jedoch nicht unterscheiden, ob es sich um einen Mensch, bei dem er anhalten müsste, oder die normale Umgebung, bei der er weiterfahren soll, handelt. Dieses Problem führt schlimmstenfalls zu Quetsch-unfällen, wenn das Robotersystem weiterhin mit Kraft weiterfährt, obwohl bereits ein Mensch zwischen Umgebung und Zielposition eingeklemmt ist. Es ist demnach notwendig ein Verfahren zu entwickeln, das abschätzt, ob eine Gefahr besteht oder nicht.

In Kapitel 5 wurde als Gefahrenbeurteilung der Ansatz der Veränderungserkennung vorgestellt. Der Greifer soll erkennen, ob die neuesten Messwerte des LiDAR-Systems identisch zu einer sicheren Referenzumgebung sind. Als Referenzumgebung wird der Arbeitsraum des Roboters zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme ohne Anwesenheit des Menschen definiert. Es wird folgend ein Verfahren entwickelt, um eine Belegtheitskarte aus dieser Referenzumgebung mittels des LiDAR-Systems aufzuzeichnen. Da von ungenauen Messungen ausgegangen werden muss, werden probabilistische Modelle verwendet. Ergebnis ist ein Verfahren, dass aus dem Datensatz einer Referenzfahrt für jeden Sensor den jeweiligen Messwert im Raum einer Karte zuordnet. Hierfür wird das Sensorblickfeld diskretisiert und über ein inverses Sensormodell die Wahrscheinlichkeitsdichte der Belegtheit für jede Messung iterativ berechnet.

Auf Basis dieser Referenzkarte kann der Greifer während des Prozesses prüfen, wie wahrscheinlich eine Veränderung der Umgebung stattgefunden hat oder nicht. Er liefert demnach eine Entscheidungsgrundlage, ob eine Reaktion notwendig ist oder nicht. Das Verfahren rastert das Blickfeld eines Sensors und vergleicht es mit dem betreffenden Ausschnitt der Belegtheitskarte über einen Opinion-Pooling Ansatz. Für eine Laufzeitoptimierte Variante im Schwellwertkarten-Verfahren wird eine diskretisierte Anzahl möglicher Orientierungs-Messwert-Kombinationen im Arbeitsraum vorberechnet. Über eine Hash-Funktion kann der aktuelle Messwert und die aktuelle Roboterposition einem Ergebnis zugewiesen werden, was die kritische Berechnungszeit deutlich verkürzt.

Um nach dem richtigen Erkennen einer Gefahr eine Kollision aktiv zu vermeiden, wurde in Kapitel 6 eine Methode entwickelt, mit der der Greifer den Roboter steuern kann. Je nach Risikobeurteilung kann der Greifer den Roboter abbremmen und im Bedarfsfall zusätzlich das Hindernis umfahren.

Hierfür wird eine Bewertung des einzuhaltenden, kritischen Sicherheitsabstands genutzt. Wird dieser unterschritten, löst der Greifer einen Sicherheitshalt aus. Darüber hinaus wurden für eine Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung verschiedene Geschwindigkeitsprofile entwickelt, welche je nach Fall die zulässige Maximalgeschwindigkeit regeln. Befindet sich das Hindernis permanent auf der Trajektorie, wurde im letzten Teilschritt der Methode eine Hindernisumfahrung implementiert, mit welcher der Greifer den Roboter am Hindernis vorbei steuern kann.

Für die Hindernisumfahrung wurden zwei Varianten der Potenzialfeldmethode an die entwickelte Umgebungserfassung adaptiert. Darüber hinaus wurde eine Architektur entwickelt, mit der der Greifer die nötigen Berechnungen durchführen kann, um den Roboter vollständig zu kontrollieren und die Ausweichbewegung auszuführen.

Die entwickelten Methoden wurden mittels Software-in-the-Loop Verfahren abgesichert, um die vielfältigen Verfahrensparameter so aufeinander abzustimmen, dass konsistente Berechnungsergebnisse in der notwendigen Antwortzeit erfolgen. Abschließend wurden in realen Versuchen am Gesamtsystem die vorgestellten Methoden und Systeme validiert.

Getestet wurden sowohl die Fähigkeiten zum rechtzeitigen Erfassen der Umgebung, der Gefahrenabschätzung und der Kollisionsvermeidung. In verschiedenen Versuchsaufbauten mit einem Industrieroboter vom Typ *KUKA KR180* und einem Greifer mit der integrierten LiDAR-Sensorik wurde die Annäherung an anthropomorphe Testobjekte untersucht. Hierbei wurden hauptsächlich Fälle der Kollisionsvermeidung mit einem menschlichen Torso und der Hand validiert.

In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Erfassung der Umgebung in einer Detektionsreichweite von bis zu 1,30m möglich ist und der Roboter aus einer Geschwindigkeit von 1m/s sicher abgebremst werden kann. Der Greifer ist dann fähig, eine alternative Trajektorie zu generieren und den Roboter mit sicherer MRK-Geschwindigkeit von 250mm/s zur Zielposition zu steuern. Die Gefahrenbeurteilung kann statische Objekte aus einer Referenzumgebung mit guter Wahrscheinlichkeit ausblenden und damit die Weiterfahrt trotz Detektion ermöglichen. Die Präsenz eines Menschen in geringen

Abständen und damit das Risiko von Quetschungen kann sicher erkannt und vermieden werden. Somit wurden die grundlegenden Eigenschaften der Methoden erfolgreich bestimmt und die Funktionsfähigkeit abgesichert.

8.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit entstandenen Systeme und Methoden sind im Bereich der MRK ein ergänzender Beitrag in Richtung von mehr Sicherheit für Mensch und Prozess. Trotz der umfangreichen Arbeiten gibt es weiterführende Fragestellungen, die in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden sollten.

Im Bereich der Umgebungserfassung sollte zunächst die Skalierung des aktuellen Systems im Fokus stehen. Grundsätzlich wurde das System für den Betrieb von bis zu drei Ringen in Kompaktgreifern ausgelegt. Für die grundlegenden Versuche der Validierung war jedoch bereits ein Ring ausreichend. Der nächste Schritt in Richtung industrieller Prototypen wäre daher, das System mit weiteren Modulen auszubauen und die Robustheit der vorgestellten Methoden auch mit einer größeren Sicherheitszone sicherzustellen. Darüber hinaus wurden während der Erstellung dieser Arbeit wieder neue Chipsysteme entwickelt, welche einerseits noch höhere Reichweiten von bis zu zwei Metern versprechen und andererseits den in Kapitel 5 erwähnten Ansatz mit Histogramm-basierten Sensormodellen ermöglichen. ToF-Sensoren mit Zonendetektion bieten daher das größte Potenzial für eine noch bessere Kollisionsvermeidung in Greifern. Eine weitere interessante Möglichkeit wäre die Kombination verschiedener Sensorprinzipien wie z.B. eine Hybridlösung aus RADAR und LiDAR-Sensorik.

Die Schwäche des aktuellen Systems zur Gefahrenbeurteilung liegt im Umgang mit verrauchten Sensordaten bei Abständen von mehr als einem Meter vom Greifer. Hierbei verliert sowohl die aus der Umgebung erstellte Karte als auch die Spezifität der Erkennung überproportional an Qualität. In weiteren Untersuchungen sollte daher die Methode hinsichtlich der Leistungsfähigkeit in komplexen Umgebungen und Präzision in der Kartengenerierung optimiert werden.

Die Hindernisumfahrung hat bereits mit bestehenden Methoden stabil gute Ergebnisse erzielt. Zukünftig sollten rechnerische Methoden zum Vermeiden von lokalen Minima und die Erweiterung der Berechnung auf eine variable Orientierung implementiert wer-

den. Der sinnvollste nächste Schritt um die Potenziale der Kollisionsvermeidung zu nutzen, wäre die Übertragung der Ansätze auf ein modernes Robotersystem mit Impedanzregelung. Kombiniert mit einer Optimierung der Rechenzeit z.B. mit einer leistungsfähigen externen Steuereinheit, die nicht mehr im Greifer platziert ist, sollten Ausweichmanöver damit in deutlich höherer Geschwindigkeit möglich sein.

9 Liste eigener Publikationen

Die nachfolgend aufgeführten Publikationen sind während der Tätigkeit des Verfassers der vorliegenden Arbeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik entstanden.

(Moll & Schäfer et al. 2018)

Moll, P.; Schäfer, M.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2018), „Aufbau einer modularen Produktionsanlage für hybride Faserverbundbauteile“, VDI-Z Integrierte Produktion, 160(11), S. 55–58.

(Moll & Jacob et al. 2018)

Moll, P.; Jacob, A.; Schäfer, M.; Coutandin, S.; Fleischer, J. & Lanza, G. (2018), „Plattformbasiertes Geschäftsmodell für rekonfigurierbare Produktionsanlagen im Leichtbau“, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113(9), S. 580–583.

(Moll & Schäfer et al. 2019)

Moll, P.; Schäfer, M.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Reconfigurable modular production plant for thermoplastic hybrid composites“, Production Engineering, 13(3-4), S. 469–477.

(Schäfer & Büsching et al. 2019)

Schäfer, M.; Büsching, M.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Safe Human Robot Collision Avoidance with an End-Effector integrated 360° LiDAR System“ in *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*, Hrsg. T. Schüppstuhl, K. Tracht & J. Roßmann, Springer, Berlin Heidelberg, S. 138–147.

(Schäfer & Moll et al. 2019)

Schäfer, M.; Moll, P.; Brocke, L.; Coutandin, S. & Fleischer, J. (2019), „Model for web-application based configuration of modular production plants with automated PLC line control code generation“, Procedia CIRP, 83, S. 292–297.

10 Literaturverzeichnis

Literaturangaben mit dem Präfix „A_“, beispielsweise (A_Büsching) bezeichnen studentische Abschlussarbeiten, die vom Verfasser der vorliegenden Arbeit angeleitet wurden.

A_Büsching 2018

A_Büsching, M. (2018), *Untersuchung von echtzeitfähigen Ausweichstrategien für Mensch-Roboter-Kollaborationssysteme*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Grzemba 2017

A_Grzemba, R. (2017), *Charakterisierung eines Optoelektronischen Sensorkonzeptes für die Mensch-Roboter-Kollaboration*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hellmann 2016

A_Hellmann, C. (2016), *Entwicklung und Konzeption eines sicheren und intelligenten Greifers für Mensch-Roboter-Kollaborationssysteme*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Janzen 2019

A_Janzen, J. (2019), *Untersuchung einer Annäherungssensorik für Mensch-Roboter-Kollaborationssysteme*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Nicklas 2018

A_Nicklas, P. L. (2018), *Probabilistisches Verfahren zur sensorgestützten Erkennung von Umgebungsveränderungen in der Mensch-Roboter-Kollaboration*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Adamides & Modur et al. 2019

Adamides, O. A.; Modur, A. S.; Kumar, S. & Sahin, F. (2019), „A Time-of-Flight On-Robot Proximity Sensing System to Achieve Human Detection for Collaborative Robots“ in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Hrsg. IEEE, S. 1230–1236.

Anand & Rahul et al. 2017

Anand, G.; Rahul, E. S. & Rao, R. B. (2017), „A Sensor Framework for Human-Robot Collaboration in Industrial Robot Work-Cell“ in *International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, S. 715–720.

Brock & Khatib 2002

Brock, O. & Khatib, O. (2002), „Elastic Strips: A Framework for Motion Generation in Human Environments“, *The International Journal of Robotics Research*, 21(12), S. 1031–1052.

DIN EN ISO 13855

DIN EN ISO 13855 (2010), *Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 10218-1

DIN 10218-1 (2011), *Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN ISO/TS 15066

DIN ISO/TS 15066 (2017), *Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 33402-2

DIN 33402-2 (2020), *Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte*, Beuth Verlag, Berlin.

EU 2006/42/EG

EU 2006/42/EG (2006), *Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG*.

Ferreira & Dias 2014

Ferreira, J. F. & Dias, J. (2014), *Probabilistic Approaches to Robotic Perception*, Springer International Publishing; Imprint: Springer, Cham. ISBN: 9783319020068.

Fragen & Rueb et al. 2011

Fragen, J.; Rueb, A. & Schlaich, P. (2011), *System und Verfahren zur Kollisionserkennung bei Fertigungs- oder Montageautomaten*, DE102009047033A1.

Geiger & Waldschmidt 2019

Geiger, M. & Waldschmidt, C. (2019), „160-GHz Radar Proximity Sensor With Distributed and Flexible Antennas for Collaborative Robots“, *IEEE Access*, 2019(7), S. 14977–14984.

Glogowski & Böhmer et al. 2021

Glogowski, P.; Böhmer, A.; Hypki, A. & Kuhlenkötter, B. (2021), „Robot Speed Adaption in Multiple Trajectory Planning and Integration in a Simulation Tool for Human-Robot Interaction“, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 102(25).

Hansard & Lee et al. 2012

Hansard, M.; Lee, S.; Choi, O. & Horaud, R. (2012), *Time of Flight Cameras: Principles, Methods, and Applications*, Springer, London. ISBN: 9781447146582.

Haun 2013

Haun, M. (2013), *Springer 2013 Handbuch Robotik. Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg. ISBN: 9783642398575.

Heiligensetzer & Steininger 2011

Heiligensetzer, P. & Steininger, F. (2011), *Einrichtung und Verfahren zum Sichern von Vorrichtungen mit frei im Raum beweglichen Teilen*, EP 2 338 651 A1.

Hesse & Malisa 2016

Hesse, S. & Malisa, V. (Hrsg.) (2016), *Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 9783446445499.

Himmelsbach & Wendt et al. 2019

Himmelsbach, U. B.; Wendt, T. M.; Hangst, N. & Gawron, P. (2019), „Single Pixel Time-of-Flight Sensors for Object Detection and Self-Detection in Three-Sectional Single-Arm Robot Manipulators“. *IEEE International Conference on*

Robotic Computing (IRC), Naples, Italy, IEEE, S. 250–253. ISBN: 9781538692455.

Himmelsbach & Wendt 2020

Himmelsbach, U. B. & Wendt, T. M. (2020), „Built-In 360 Degree Separation Monitoring for Grippers on Robotic Manipulators in Human-Robot Collaboration“. *2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC)*, Taichung, Taiwan, IEEE, S. 156–160. ISBN: 9781728152370.

Hornung & Wurm et al. 2013

Hornung, A.; Wurm, K. M.; Bennewitz, M.; Stachniss, C. & Burgard, W. (2013), „OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees“, *Autonomous Robots*, 34(3), S. 189–206.

Khatib 1985

Khatib, O. (1985), „Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots“. *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, S. 500–505.

Koeppe & Engelhardt et al. 2005

Koeppe, R.; Engelhardt, D.; Hagenauer, A.; Heiligensetzer, P.; Kneifel, B.; Knipfer, A. & Stoddard, K. (2005), „Robot-Robot and Human-Robot Cooperation in Commercial Robotics Applications“, *Robotics Research*, 15, S. 202–216.

Koren & Borenstein 1991

Koren, Y. & Borenstein, J. (1991), „Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation“ in *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation, Sacramento, 1991*, S. 1398–1404.

Kroger & Wahl 2010

Kroger, T. & Wahl, F. M. (2010), „Online Trajectory Generation: Basic Concepts for Instantaneous Reactions to Unforeseen Events“, *IEEE Transactions on Robotics*, 26(1), S. 94–111.

Krogh & Thorpe 1986

Krogh, B. H. & Thorpe, C. E. (1986), „Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicles“, *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, S. 1664–1669.

Kumar & Arora et al. 2019

Kumar, S.; Arora, S. & Sahin, F. (2019), „Speed and Separation Monitoring using on-robot Time-of-Flight laser-ranging sensor arrays" in *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Hrsg. IEEE, S. 1684–1691.

Kumar & Sahin 2019

Kumar, S. & Sahin, F. (2019), „Sensing Volume Coverage of Robot Workspace using On-Robot Time-of-Flight Sensor Arrays for Safe Human Robot Interaction" in *2019 IEEE International Conference Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Hrsg. IEEE, S. 378–384.

Kumar & Savur et al. 2018

Kumar, S.; Savur, C. & Sahin, F. (2018), „Dynamic Awareness of an Industrial Robotic Arm Using Time-of-Flight Laser-Ranging Sensors". *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Miyazaki, Japan, Hrsg. IEEE, IEEE, S. 2850–2857. ISBN: 9781538666500.

Lemmerz & Kuhlenkötter 2022

Lemmerz, K. & Kuhlenkötter, B. (2022), „Human Body Simulation Within a Hybrid Operating Method for a Safe and Efficient Human-Robot Collaboration" in *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*, Hrsg. T. Schüppstuhl, K. Tracht & A. Raatz, Springer International Publishing, Cham, S. 191–202.

Lu & Xu 2018

Lu, H. & Xu, X. (2018), *Artificial Intelligence and Robotics*, Springer International Publishing. ISBN: 9783319698762.

Menant & Steele et al. 2009

Menant, J. C.; Steele, J. R.; Menz, H. B.; Munro, B. J. & Lord, S. R. (2009), „Rapid gait termination: Effects of age, walking surfaces and footwear characteristics", *Gait & Posture*, 30(1), S. 65–70.

Migdall & Polyakov et al. 2013

Migdall, A.; Polyakov, S. V.; Fan, J. & Bienfang, J. C. (2013), *Single-photon generation and detection: physics and applications*, Academic Press. ISBN: 9780123876966.

Moravec & Elfes 1985

Moravec, H. P. & Elfes, A. (1985), „High Resolution Maps from Wide Angle Sonar“ in *Proceedings. 1985 IEEE international conference on robotics and automation(2)*, IEEE, S.116-121.

Müller & Franke et al. 2019

Müller, R.; Franke, J.; Kohlenkötter, B.; Raatz, A. & Verl, A. (Hrsg.) (2019), *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*, Hanser, München. ISBN: 9783446450165.

Ostermann 2014

Ostermann, B. (2014), *Entwicklung eines Konzepts zur sicheren Personenerfassung als Schutz Einrichtung an kollaborierenden Robotern*. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.

Parthier 2016

Parthier, R. (2016), *Messtechnik. Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*, Springer Vieweg. ISBN: 9783658135973.

Pauli & Gottel et al. 2017

Pauli, M.; Gottel, B.; Scherr, S.; Bhutani, A.; Ayhan, S.; Winkler, W. & Zwick, T. (2017), „Miniaturized Millimeter-Wave Radar Sensor for High-Accuracy Applications“, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(5), S. 1707–1715.

Roxana & Julien et al. 2017

Roxana, D.; Julien, M.; Tiana, R.; Diego, P. & Suzanne, L. (2017), „Evaluation of Occupancy Grid Resolution through a Novel Approach for Inverse Sensor Modeling“, *IFAC PapersOnLine Conference Paper Archive(50-1)*, S. 13841–13847.

S.S. Ge & Y.J. Cui 2002

S.S. Ge & Y.J. Cui (2002), „Dynamic Motion Planning for Mobile Robots Using Potential Field Method“, *Autonomous Robots(13)*, S. 207–222.

Siciliano & Khatib 2016

Siciliano, B. & Khatib, O. (2016), *Springer Handbook Of Robotics*, Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 9783319325507.

Stetco & Ubezio et al. 2020

Stetco, C.; Ubezio, B.; Mühlbacher-Karrer, S. & Zangl, H. (2020), „Radar Sensors in Collaborative Robotics: Fast Simulation and Experimental Validation“ in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, S. 10452–10458.

Syberfeldt & Mikel et al. 2016

Syberfeldt, A.; Mikel, A.; Magnus, H.; Lihui, W. & Lindgren-Brewster, R. (2016), „Localizing operators in the smart factory: A review of existing techniques and systems“ in *IEEE International Symposium on Flexible Automation*, Hrsg. IEEE, S. 179–185.

Tivolve 1990

Tivolve, R. B. (1990), „Local obstacle avoidance for mobile robots based on the Method of Artificial Potentials“, *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1990, S. 566–571.

Tong & Hu et al. 2021

Tong, Z.; Hu, H.; Wu, Z.; Xie, S.; Chen, G.; Zhang, S.; Lou, L. & Liu, H. (2021), „An Ultrasonic Proximity Sensing Skin for Robot Safety Control by Using Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (PMUTs)“, *IEEE Sensors Journal*, 22(18), S. 17351–17361.

Tsuji & Kohama 2019

Tsuji, S. & Kohama, T. (2019), „Proximity Skin Sensor Using Time-of-Flight Sensor for Human Collaborative Robot“, *IEEE Sensors Journal*, 19(14), S. 5859–5864.

VDI 2225

VDI 2225 (1998), *VDI 2225 Bl. 3 Entwurf Konstruktionsmethodik: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren | Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, Beuth Verlag, Berlin.

VDI 2206

VDI 2206 (2021), *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*, Beuth Verlag, Berlin.

Vranish & McConnel 1992

Vranish, J. M. & McConnel, R. L. (1992), *Driven shielding capacitive proximity sensor*, EP 0518836 A1.

Wolf & Schunk 2016

Wolf, A. & Schunk, H. (2016), *Greifer in Bewegung: Faszination der Automatisierung von Handhabungsaufgaben*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
ISBN: 9783446442412.

Zacharaki & Kostavelis et al. 2020

Zacharaki, A.; Kostavelis, I.; Gasteratos, A. & Dokas, I. (2020), „Safety bounds in human robot interaction: A survey“, *Safety Science*(127), S. 1–19.

Zlatanski & Sommer et al. 2018

Zlatanski, M.; Sommer, P.; Zurfluh, F. & Madonna, G. L. (2018), „Radar Sensor for Fenceless Machine Guarding and Collaborative Robotics“ in *2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR)*, S. 19–25.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Jährlich installierte Roboter nach Klasse gemäß IFR Report 2022 ¹	2
Abbildung 2: Verteilung der jährlich installierten Robotereinheiten nach Anwendung ²	3
Abbildung 3: Übersicht über die Aufteilung der vorliegenden Arbeit	5
Abbildung 4: Unterschiedliche Betriebsarten der Mensch-Roboter-Kollaboration	9
Abbildung 5: Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Ansätze der Pfadplanung und in dieser Arbeit verwendete Kombination (blau hinterlegt)	11
Abbildung 6: Beispielhafte Potenzialfelder für: a) anziehendes Potenzial des Ziels, b) und c) abstoßende Potenziale von Hindernissen	15
Abbildung 7: Beispielhaftes resultierendes Potenzialfeld und generierter Pfad in a) 3D-Ansicht und b) Draufsicht	15
Abbildung 8: Gliederung integrierter Sensorprinzipien für die MRK	18
Abbildung 9: Kapazitive Umgebungserfassung in einer MRK-Anwendung	19
Abbildung 10: Prinzip der RADAR-Messung in einer MRK-Anwendung	21
Abbildung 11: Prinzip des Laserscanners in einer MRK-Anwendung	24
Abbildung 12: Prinzip des Time-of-Flight-Sensors in einer MRK-Anwendung	25
Abbildung 13: Prinzip von Ultraschallsensoren in einer MRK-Anwendung	27
Abbildung 14: Risikofall A – Freie Kollision mit stehenden Mitarbeitern	33
Abbildung 15: Szenario Risikofall B – Quetschung des Mitarbeiters	35
Abbildung 16: V-Modell als Vorgehensstruktur zur Lösungsfindung	37
Abbildung 17: Betrachtete Elemente innerhalb der Systemgrenze	40
Abbildung 18: Funktionale Systemaufteilung in drei Module	42
Abbildung 19: Nutzwertanalyse der Sensorprinzipien an den ausgewählten Chipsystemen: a) kapazitiv, b)RADAR, c)Laserscanner, d)IR-ToF-Sensor und e)Ultraschall	52
Abbildung 20: Ishikawa-Diagramm mit Einflüssen auf eine Abstandsmessung	53

Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Sensoreigenschaften für a) Testobjekt Hand, b) Testobjekt Torso und c) Testobjekt Platte	57
Abbildung 22: Detektionsreichweite für weißen und schwarzen Torso in Abhängigkeit von der a) Signalamplitude, b) Pulsdauer und c) Messfrequenz	58
Abbildung 23: Detektionsreichweite für $T_{Hand,W}$ im Vergleich zu $T_{Torso,W}$ in Abhängigkeit von der a) Signalamplitude, b) Pulsdauer und c) Messfrequenz	59
Abbildung 24: Detektionsreichweite einer Platte ($R > 0,88$) für die Verdrehung der Platte in 15° Schritten von 0° bis 45° für a) Signalamplitude, b) Pulsdauer und c) Frequenz	60
Abbildung 25: Gemittelte Abweichung Δq vom realen Abstand in Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und a) $T_{Torso,W}$ bzw. b) $T_{Torso,S}$	61
Abbildung 26: Der Greifer wird über einen einhüllenden Zylinder modelliert. Aufgrund $d_{max} \gg a$ ergibt sich als mitbewegter Sicherheitsraum näherungsweise eine Kugel.	64
Abbildung 27: Beispielkonzept mit drei zueinander versetzten Ringen in der MRK-Hülle	65
Abbildung 28: Der Aufbau aus drei übereinander angeordneten und zueinander versetzten Ringen schafft einen nahezu lückenlosen Detektionsbereich	66
Abbildung 29: Veranschaulichung der blinden Zone im Sicherheitsraum	66
Abbildung 30: Funktionaler Prototyp des MRK-Greifers mit integriertem LiDAR-Array und LED-Visualisierung.	67
Abbildung 31: Ring-Prototyp mit 18 verschalteten Sensoren (li) sowie Aufbau des Prototyps mit Greifer, Sensorring, Schutzhülle und Unterkonstruktion (re)	68
Abbildung 32: Systemarchitektur des Prototypen-Systems	69
Abbildung 33: Das Robotersystem fährt auf der geplanten Trajektorie, die Sensorik detektiert eine Annäherung und löst fälschlicherweise eine Reaktion aus.	71
Abbildung 34: Die Sensorik muss Menschen erkennen und eine Reaktion auslösen.	72
Abbildung 35: Ansatz - Das Erkennen einer Veränderung gegenüber einer Referenz.	76
Abbildung 36: Workflow bis zur sicheren Anwendung	78

Abbildung 37: Flussdiagramm zur Berechnung der Referenzkarte	80
Abbildung 38: Vergleich von echter Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung mit der resultierenden Verteilung nach direktem und inversem Sensormodell.	82
Abbildung 39: Identifikation der im Kugelsektor des FoV gelegenen Voxel über einen „Bounding-Box“-Ansatz	84
Abbildung 40: Füllen der Belegungswahrscheinlichkeiten in der Bounding Box	85
Abbildung 41: Die Auswirkung der Zugehörigkeitsfunktion auf die Wahrscheinlichkeitsdichte im Blickfeld eines Sensors	87
Abbildung 42: Aggregation der Karteninformationen zu einem Vektor	90
Abbildung 43: Flussdiagramm des Online-Berechnungsverfahrens	93
Abbildung 44: Flussdiagramm des Schwellwertverfahrens	96
Abbildung 45: Schematische Darstellung der Szene und Optionen für die Reaktion auf ein Hindernis	100
Abbildung 46: Flussdiagramm für die Systemreaktion auf eine Gefahr	101
Abbildung 47: Zusammensetzung des kritischen Mindestabstands S_{\min} für die Fälle laufender Mensch (a), stoppender Mensch (b) und stehender Mensch (c)	106
Abbildung 48: Vorgehen zum Überprüfen, ob ein sofortiger Stopp zur Kollisionsvermeidung notwendig ist.	108
Abbildung 49: Veranschaulichung der Sicherheitszonen um den Greifer	109
Abbildung 50: Geschwindigkeits-Profile für den Fall H1	110
Abbildung 51: Geschwindigkeits-Profile für den Fall H2	110
Abbildung 52: Geschwindigkeits-Profile für den Fall H3	111
Abbildung 53: Vorgehen zur Hindernisumfahrung	113
Abbildung 54: Beispiel für den Zusammenhang einer abstoßenden Kraft je Sensor über den detektieren Abstand q je Verstärkungsfaktor G_P	115
Abbildung 55: Veranschaulichung der angepassten Potenzialfeldmethode	116
Abbildung 56: Flussdiagramm zur Berechnung der Ausweichrichtung	117

Abbildung 57: Zusätzliche virtuelle Kräfte durch die generalisierte Potenzialfeldmethode	118
Abbildung 58: Flussdiagramm für die generalisierte Richtungsberechnung	119
Abbildung 59: Blockschaltbild der Steuerungsarchitektur zwischen Roboter und Greifer	121
Abbildung 60: Vorgehen der Validierung nach V-Modell	124
Abbildung 61: Simulations-Modell für SiL-Versuche	127
Abbildung 62: Aufbau von Szenario 1 für die Versuche zur Veränderungserkennung	128
Abbildung 63: Sensitivität und Spezifität über ausgewählte Parameter für a) eine ideale Karte und b) eine aus Messdaten generierte Karte im Online-Verfahren	130
Abbildung 64: Sensitivität über ausgewählte Parameter für a) eine ideale Karte und b) eine aus Messdaten generierte Karte im Schwellwert-Verfahren	131
Abbildung 65: Aufbau von Szenario 2 für die Versuche zur Veränderungserkennung	132
Abbildung 66: Sensitivität und Spezifität über ausgewählte Parameter im a) Online-Verfahren und b) Schwellwert-Verfahren für eine ideale Karte	133
Abbildung 67: Karte mit a) grober und b) feiner Auflösung l_m (A_Nicklas 2018)	133
Abbildung 68: Software-in-the-Loop-Test der Hindernisumfahrung - Szenario 1	135
Abbildung 69: Versuchsergebnisse der adaptierten Potenzialfeldmethode: a) generierte Trajektorie für Szenario 1 und b) maximale Auslenkung je nach Verstärkungskoeffizient	136
Abbildung 70: Vergleich der generierten Pfade von PFM und GPFM in Szenario 1	137
Abbildung 71: Software-in-the-Loop-Test der Hindernisumfahrung - Szenario 2	137
Abbildung 72: Vergleich der generierten Pfade von PFM und GPFM in Szenario 2	138
Abbildung 73: Testobjekte Torso, weiß $R>0,88$ (links); Torso, schwarz $R<0,17$ (Mitte) und Kugel, weiß $R>0,88$ (rechts)	140

Abbildung 74: Variation der relativen Position zwischen Greifer und Testobjekt: a) direkt in Sensororientierung, b) verdreht um Winkel γ und c) verschoben um Abstand a	140
Abbildung 75: Versuchsaufbau der Abbremsversuche, Darstellung mit $v_R = 1\text{m/s}$ und linearer Verzögerung bis S_{\min}	141
Abbildung 76: Ergebnisse der Versuche zur Abstandsüberwachung mit $v_R = 1\text{m/s}$	142
Abbildung 77: Ergebnisse der Versuche zur Abstandsüberwachung mit $v_R = 1\text{m/s}$	143
Abbildung 78: Vergleich der Abbremsung für das Testobjekt Torso a)weiß und b)schwarz	144
Abbildung 79: Kontinuierliche Abstandsmessung über mehrere Sensoren des Arrays	145
Abbildung 80: Darstellung der Abweichung von der programmierten Trajektorie (weiß dargestellt) über die Zeit, perspektivisch von oben.	146
Abbildung 81: Generierte Pfade der adaptierten Potenzialfeldmethode für verschiedene Verstärkungskoeffizienten G_P	147
Abbildung 82: Vergleich der generierten Pfade aus Software-in-the-Loop-Simulation und realem Versuch mit $G_P = 1,0$	148
Abbildung 83: Oszillation des Richtungsvektors durch die zyklische Detektion des Objekts mit a) zwei Sensoren und b) einem Sensor des Arrays	149
Abbildung 84: Aufbau von Risikofall B für die Versuche zur Veränderungserkennung	150
Abbildung 85: Versuchsaufbau der Veränderungserkennung	151
Abbildung 86: Verläufe der Abstandsmessungen bei $v_R = 0,25\text{m/s}$ und Gefahrenabschätzung mittels idealer Karte und Berechnungsverfahren	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der relevantesten Arbeiten	30
Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Testobjekte	43
Tabelle 3: Übersicht der variierten Parameter der Versuchsreihen	57
Tabelle 4: Gemittelte Standardabweichung σ_s und Varianz σ_s^2 über verschiedene Testobjekte für unterschiedliche Parameterkombinationen	62

Forschungsberichte aus dem **wbk**
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünffachsignen Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montage system

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbueger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkabbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. Wirtschaftsingenieur Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünfachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasive Strahl schneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskraftrichtungsangepasste Frässtrategien zur schadigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspannbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetriebe

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebs-elementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-effizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme
Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry**

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung**

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

Hochiterative Technologieplanung

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und

Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von

Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhaut

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an

Kugelgewindetriebspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindtrieben mittels

Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur

Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwalgwindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitatsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositaterkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Ruckfuhrungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitatsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

