# STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

**KAI PFEIFFER** 

Autonome Sensorsonden für mobile Überwachungsroboter und deren Ausbringstrategien





Universität Stuttgart



# STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 32

# Herausgeber:

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

Kai Pfeiffer

# Autonome Sensorsonden für mobile Überwachungsroboter und deren Ausbringstrategien

### Kontaktadresse:

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

### STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG

### Herausgeber:

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

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

Titelbild: © Autor

### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar. ISSN: 2195-2892 ISBN (Print): 978-3-8396-0708-4

#### D 93

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

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

### © by FRAUNHOFER VERLAG, 2014

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart Telefon 07 11 9 70-25 00 Telefax 07 11 9 70-25 08 E-Mail verlag@fraunhofer.de URL http://verlag.fraunhofer.de

#### Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

# GELEITWORT DER HERAUSGEBER

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

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

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

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

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

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

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

# Autonome Sensorsonden für mobile Überwachungsroboter und deren Ausbringstrategien

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

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Kai Pfeiffer aus Olpe

Hauptberichter: Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn

Tag der mündlichen Prüfung:16.01.2014

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2014

# Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Roboter- und Assistenzsysteme am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Alexander Verl für die offenen Gespräche, die wertvollen Hinweise und die Übernahme des Hauptberichtes danken. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinz Wörn danke ich für seine freundliche Unterstützung und die Übernahme des Mitberichtes.

Meinem Abteilungsleiter Herrn Dipl.-Ing. Martin Hägele, M.Sc. möchte ich für den kollegialen Umgang, das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit danken, ein Thema auch ohne Bezug auf laufende Projekte weiter verfolgen zu können. Meinem Kollegen Herrn Dipl.-Ing. Gernot Gebhard möchte ich für seine Geduld während unserer Diskussionen und für seine Unterstützung beim Aufbau der Hardware danken. Meinem Freund Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Matthias Bengel danke ich für die motivierenden Gespräche und die gelegentlichen Schubser nach vorne. Auch für die Korrekturvorschläge ein herzliches Dankeschön. Für die zahlreichen Korrekturvorschläge, die mich zuweilen auf den Boden zurückgeholt haben, möchte ich Frau Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Birgit Graf, Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Dipl.-Kauf. Nikolaus Blümlein und Herrn Dr.-Ing. Christian Connette herzlich danken. Frau Luzia Schuhmacher, M.A. danke ich dafür, dieses Werk einer abschließenden Prüfung auf Herz und Nieren unterzogen zu haben. Frau Dipl.-Bibl. Melanie Pfefferle möchte ich für die Geduld und Hilfe bei der Korrektur des Literaturverzeichnisses danken. Ein besonderer Dank geht an die gute Seele des Fraunhofer IPA, Frau Heide Kreuzburg. Ohne sie wäre der Schlusssprint steiniger, frustrierender und nebliger gewesen. Meine Eltern Klaus und Waltraud Pfeiffer haben durch ihre Liebe, Förderung und Erziehung diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht. Sie haben den Weg bereitet und niemals verlangt, dass ich ihn beschreite. Ich danke ihnen dafür.

Von meiner Frau Regina habe ich auf meinem Weg immer Verständnis, Unterstützung, Anschub, Hilfe, aufmunternde Worte und vieles mehr erfahren. Sie hat dadurch in diese Arbeit ebenso viel Zeit investiert wie ich. Ohne sie gäbe es diese Arbeit nicht. Dafür und für alles andere liebe ich sie!

Widmen möchte ich diese Arbeit meiner Tochter Lea Marie, da sie mir für die Fertigstellung dieser Arbeit bereitwillig einen Teil der ihr zustehenden Elternzeit abgetreten hat und sie mein Leben jeden Tag aufs Neue bereichert.

# Kurzinhalt

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erweiterung des Nutzens von mobilen Überwachungsrobotern. Durch den Einsatz von autonomen Sensorsonden wird die zeitgleich überwachte Fläche bzw. Grenzlinie von Überwachungsrobotern signifikant vergrößert.

Dieses System umfasst Sensorsonden, Ausbringeinheiten, mit denen Überwachungsroboter Sonden positionieren und nach dem Einsatz wieder aufnehmen können, sowie Algorithmen zur Bestimmung der optimalen Position der Sonden je nach Einsatzfall. Für die Sonden wurde eine Schnittstelle konzipiert, die es den Ausbringeinheiten ermöglicht, sowohl einen eventuellen Offset in horizontaler Richtung beim Aufnehmen der Sonden auszugleichen, als auch eine mögliche Verdrehung der Sonde ohne die Verwendung zusätzlicher Sensoren oder Aktoren zu korrigieren. Weiterhin wurden kommerziell verfügbare Komponenten für die Ausrüstung der Sensorsonden untersucht. Für die Ausbringeinheiten wurde ein effizientes Konzept zur Aufbewahrung und Handhabung der Sensorsonden entwickelt, das den Einsatz von Sensoren und Aktoren auf ein Minimum beschränkt und bei der Handhabung mit einem einzigen Freiheitsgrad auskommt.

Zur Steuerung der Ausbringeinheiten durch Überwachungsroboter wurde eine über Ethernet kommunizierende Ablaufsteuerung entwickelt. Für die effiziente Positionierung der Sonden wurden zwei Verfahren, Genetische Algorithmen und Gridmap mit Greedy-Algorithmus, ausgewählt und an das Problem angepasst. In einer eigens entwickelten Simulationsumgebung wurden die Parameter beider Verfahren optimiert und die Ergebnisse miteinander verglichen.

Zur Quantifizierung des Mehrnutzens durch Sensorsonden für Überwachungsroboter wurde die Größe der mittleren Abdeckung eingeführt. Beim Vergleich zwischen dem Einsatz eines Überwachungsroboters alleine und mit Sensorsonden wurde eine Verbesserung der mittleren Abdeckung um das 4,3- bis 7,5-fache nachgewiesen. Somit wurde eine effiziente Erweiterung für mobile Überwachungsroboter entwickelt, welche deren Überwachungsleistung signifikant steigern kann.

# **Short Summary**

The presented thesis deals with the enhancement of the use of mobile security and surveillance robots. By using autonomous sensor probes the simultaneously covered area respective borderline by security and surveillance robots can be increased significantly. This system includes sensor probes, deployment unit, which enables a security robot to place and recollect sensor probes, as well as algorithms to identify the best positions for the sensor probes depending on the use case. For the sensor probes an interface was invented that enables the deployment units both to compensate a potential offset in horizontal direction when recollecting the probes and to correct a potential rotation without the use of additional sensors or actors. Furthermore, commercially available components for the equipment of the sensor probes have been analyzed. For the deployment units an efficient concept for storage and handling of sensor probes, which reduces the use of sensors and actors to a minimum and manages probe handling with only one degree of freedom, was invented.

In order to control the deployment units by the surveillance robot a controller has been developed which communicates over Ethernet. For the efficient placement of the probes two methods, Genetic algorithm and grid map with Greedy algorithm, have been chosen and adapted to the problem. With a specially developed simulation environment the parameters of both methods have been optimized and the results have been compared.

In order to quantify the added value for security and surveillance robots by the use of sensor probes the value of average coverage was introduced. The comparison of the use of security and surveillance robots alone and in combination with sensor probes verified an enhancement by factors 4,3 to 7,5. Consequently an efficient extension for mobile security and surveillance robots has been developed, which significantly increases the surveillance performance.

# Inhalt

V	orwort		II
K	urzinhalt		
Sł	10rt Summ	ary	IV
A	bkürzungs	verzeichnis	IX
A	bbildungsv	erzeichnis	XIV
Т	abellenverz	eichnis	XVIII
1	Einleitung	ξ	1
	1.1 Moti	vation	1
	1.2 Inha	lt der Arbeit	
	1.3 Prob	lemstellung	3
	1.4 Glie	derung der Arbeit	4
2	Ausgangs	situation	6
	2.1 Begr	iffe und Definitionen	6
	2.2 Beka	nnte Überwachungsstrategien	
	2.2.1	Wachpersonal	
	2.2.2	Festinstallationen	9
	2.2.3	Sicherheitsroboter	9
	2.3 Anal	yse von Einsatzfällen	
	2.3.1	Anwendungsfälle im Innenbereich	
	2.3.2	Anwendungsfälle im Außenbereich	
	2.3.3	Definition der für diese Arbeit relevanten potentiellen Einsatzszenarien	
3	Stand der	Technik	
	3.1 Drah	tlose Sensornetzwerke zur Überwachung	
	3.2 Funk	protokolle	
	3.3 Aust	pringstrategien	
	3.3.1	Genetische Algorithmen	
	3.3.2	Potenzialfelder	
	3.3.3	Maximal-Breach Path Optimierung mit Voronoi-Diagrammen	
	3.3.4	Gridkarten	
	3.4 Sens	orsonden	

	3.4.1	Potentielle Sensoren zur Bestückung von Sensorsonden	24
	3.4.2	Drahtlose Übertragungsformen	24
	3.4.3	Geeignete Schnittstellen zwischen Sensor und drahtloser Übertragung	25
	3.4.4	Energieversorgung von Sensorsonden	
4	Anforder	ungsanalyse	
	4.1 Anfe	orderungen an Sensorsonden	
	4.1.1	Grundsätzliche Anforderungen	
	4.1.2	Weiterführende Anforderungen	
	4.2 Anfe	orderungen an Ausbringeinheiten	
	4.2.1	Allgemeine Anforderungen	
	4.2.2	Mechanische Anforderungen	
	4.2.3	Elektrische Anforderungen	
	4.3 Aus	bringstrategien	
	4.3.1	Analyse der Hauptszenarien und abgeleitete Anforderungen	
	4.3.2	Analyse der verschiedenen Ausbringstrategien	
5	Konzepti	D <b>n</b>	
	5.1 Kon	zeption der Sensorsonden	
	5.1.1	Konzeption der Schnittstelle von Sensorsonden	
	5.1.2	Lösbarer Kraftschluss	
	5.1.3	Offsetausgleich	
	5.1.4	Verdrehungsausgleich	
	5.1.5	Elektrische Schnittstelle	47
	5.1.6	Bereitzustellende Informationen	47
	5.1.7	Zusammenfassung der Konzeption der Sensorsonde	
	5.2 Kon	zeption einer Ausbringeinheit	
	5.2.1	Aufbewahrung der Sonden	
	5.2.2	Handhabung der Sonden	
	5.2.3	Identifikation der Sensorsonden	
	5.2.4	Steuerung der Ausbringeinheit	
	5.2.5	Schnittstelle zum Überwachungsroboter	61
	5.2.6	Zusammenfassung der Konzeption einer Ausbringeinheit	
	5.3 Kon	zeption der Ausbringstrategien	
	5.3.1	Genetische Algorithmen	64
	5.3.2	Gridkartenansatz	72
6	Realisier	ıng	76
	6.1 Real	lisierung der Sensorsonden	

	6.1.1	Verwendete Sensoren	76
	6.1.2	Verwendete drahtlose Übertragungsform	77
6.1.3 F		Funkprotokolle	79
	6.1.4	Verwendete Energieversorgung	80
	6.1.5	Zusammenfassung der Realisierung von Sensorsonden	81
	6.2 Rea	lisierung einer Ausbringeinheit	83
	6.3 Auf	bau der Simulationsumgebung	87
	6.3.1	Anforderungen	88
	6.3.2	Vereinfachungen	88
	6.3.3	Darstellung der Umgebung	89
	6.3.4	Darstellung der Sensoren	89
	6.3.5	Berechnung der abgedeckten Fläche	90
	6.3.6	Berechnung der abgedeckten Grenzlinie	93
	6.3.7	Ergebnis	94
	6.4 Der	nonstrator Überwachungsroboter	95
7	Optimier	ung und Bewertung der Ausbringstrategien	96
7.1 Beschreibung der Einsatzfälle		96	
	7.1.1	Fertigungshalle mit Foyer	96
	7.1.2	Bürogebäude	97
	7.1.3	Lagerhalle	99
	7.1.4	Definition eines Benchmarks	100
	7.2 Exp	erimentelle Verifikation und Benchmark in simulierten Beispielszenarien	102
	7.2.1	Genetischer Algorithmus zur Positionierung der Sensorsonden	102
	7.2.2	Gridkartenansatz mit Greedy-Algorithmus zur Sensorsondenpositionierung	103
	7.2.3	Quantifizierung der zusätzlichen Überwachungsleistung durch Sensorsonden	104
	7.3 Erg	ebnisse der Simulation	105
	7.3.1	Optimierung genetischer Algorithmus – Erster Abschnitt	105
	7.3.2	Optimierung genetischer Algorithmus – Zweiter Abschnitt	110
	7.3.3	Optimierung Gridmap mit Greedy Ansatz	117
	7.3.4	Ergebnis Roboter ohne Sensorsonden	119
	7.3.5	Ergebnis für Roboter mit Sensorsonden	120
	7.4 Rea	ler Überwachungseinsatz und Vergleich mit den Simulationsergebnissen	121
	7.5 Faz	it	124
8	Zusamm	enfassung und Ausblick	126
8.1 Zusammer		ammenfassung	126
8.2 Erg		ebnisanalyse	128

	8.3	Aktuelle Weiterentwicklungen	
	8.4	Ausblick	
9	Sum	mary	131
10	Liter	aturverzeichnis	134
11	Anha	ng	139
	11.1	Ergebnisse der Simulationen des GA – Erste Optimierungsphase	
	11	.1.1 Plots der arithmetischen Mittelwerte der Perimeterabdeckungen	139
	11	.1.2 Plots der Standardabweichungen	143
	11	.1.3 Plots der Berechnungsdauern	147
	11	.1.4 Ergebnisse in tabellarischer Form	150
	11	.1.5 Darstellung der Abdeckung der jeweils besten Individuen	157
	11.2	Ergebnisse der Simulationen zur Optimierung des GA – Zweiter Abschnitt	
	11	.2.1 Plots der arithmetischen Mittelwerte der Perimeterabdeckungen	
	11	.2.2 Plots der Standardabweichungen	167
	11	.2.3 Plots der Berechnungsdauern	171
	11	.2.4 Ergebnisse in tabellarischer Form	174
	11	.2.5 Darstellung der Abdeckung der jeweils besten Individuen	
	11.3	Trajektorien für Überwachungsroboter ohne Sensorsonden	

# Abkürzungsverzeichnis

# Abkürzungen

AODV	Ad-hoc On-demand Distance Vector
B.A.T.M.A.N.	Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking
DSR	Dynamic Source Routing
EDR	Enhanced Data Rate
EI	Effective Independence
FOV	Field of View
G	Gewerbeobjekt
GA	Genetischer Algorithmus
GPRS	General Packet Radio Service
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GSM	Global System for Mobile Communications
HSMR	Home Security Mobile Robot
HSSM	Home Security Sensor Networks
ID	Identifikation
IDS	Intrusion Detection System
LED	Light Emitting Diode
Li-Ion	Lithium Ionen
Li-Po	Lithium Polymer
MB	Megabyte
MKE	Modal Kinetic Energy
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithms
MOO	Multi-Objective Optimization
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Ni-Mh	Nickel-Metalhydrid
Ö	Öffentliches Objekt
ODIS	Omni Directional Inspection System
OLSR	Optimized Link State Routing
PDR	Packet Delivery Ratio

## Abkürzungsverzeichnis

PIR	Passiv Infrarot
RFID	Radio Frequency Identification
SEM	Square-Encircled Method
SSM	Slow-Start Method
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TORA	Temporally Ordered Routing Algorithm
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra Wide Band
VSN	Visuelle Sensornetzwerke
W	Wohnobjekt
WLAN	Wireless Local Area Network

## Großbuchstaben

Α	[m <sup>2</sup> ]	Abgedeckte Fläche
$A_{ges}$	[m <sup>2</sup> ]	Gesamte Fläche
$\Delta A_i$	[m <sup>2</sup> ]	Gridkartenelement i
$A_{S,i}$	[]	i-te Sichtbarkeitsfläche
В	[]	Begrenzungspolygon
$C_i$	[]	Abdeckung eines Bereiches
$C_{i,ges}$	[]	Größe eines Bereiches
Ε	[]	Tatsächlicher Erfassungsbereich eines Sensors
$\overline{F}$	[]	Arithmetischer Mittelwert der Fitness
$\overline{\overline{F}}$	[]	Arithmetischer Mittelwert von $\overline{F}$ über drei Szenarien
$F_B$	[]	Fitness bezüglich Flächenabdeckung
$F_m$	[]	Mittlere Fitness eines Roboters
$F_{m+}$	[]	Mittlere Fitness eines Roboters mit Sensorsonden
$F_P$	[]	Fitness bezüglich Perimeterabdeckung
$F_R$	[N]	Rückstellende Kraft
G	[]	Aktuelle Anzahl von Generationen
$G_{max}$	[]	Maximale Anzahl von Generationen

Н	[]	Hindernispolygon
Ĥ	[]	Hindernispolygon mit Abschattungsbereich
ID	[]	Eindeutige Identifikation einer Sensorsonde
I <sub>m</sub>	[]	Individuum m
Μ	[]	Rest nach Division
$M_R$	[Nm]	Rückstellendes Drehmoment
Р	[m]	Abgedeckter Perimeter
Pges	[m]	Gesamter Perimeter
$\Delta P_i$	[m]	Perimeterelement i
R	[m]	Radius eines Konus
$\Delta R$	[m]	Maximal kompensierbare Positionierungenauigkeit
$R_T$	[]	Position des Roboters auf einer Trajektorie
S	[]	Ursprüngliches Sensorpolygon
Ś	[]	Sensorpolygon mit Abschattung
$S_F$	[]	Steigerung der mittleren Abdeckung
SP	[]	Menge der Eckpunkte von Diskretisierungsquadraten
Т	[]	Menge der Punkte einer Trajektorie
V	[m <sup>3</sup> ]	Bauvolumen eines Offsetausgleichs
$Z_P$	[]	Primäre Zielerfüllung

## Kleinbuchstaben

а	[]	Anteil der Perimeterfitness an der Gesamtfitness
b	[]	Anteil der Flächenfitness an der Gesamtfitness
$\Delta d$	[m]	Diskretisierungsparameter für Sondenpositionen und Fläche
$d_{Itf}$	[m]	Durchmesser des Zylinders am mechanischen Interface
$d_R$	[m]	Durchmesser der Rolle
$g_{A,i}$	[]	Gewichtung des Flächenanteils i
$g_i$	[]	Gewichtung eines Bereiches
$g_{P,i}$	[]	Gewichtung des Perimeteranteils i
$h_{GL}$	[m]	Höhe eines Gleitlagers
$h_{KS}$	[m]	Höhe eines Kreissegments
i	[]	Laufindex

l	[m]	Abstand zwischen Wirkungslinie und Mittelpunkt
$\Delta l$	[m]	Diskretisierungsparameter für Perimeter
$l_{GLS}$	[m]	Länge eines Gleitlagerschlittens
$\Delta l_T$	[m]	Diskretisierungsparameter für Robotertrajektorien
$l_{T,ges}$	[m]	Gesamtlänge einer Robotertrajektorie
l <sub>ü</sub>	[m]	Länge einer Trajektorie durch Flächen mit der Überlappungsmenge $n_{\ddot{u}}$
m	[]	Laufindex
n	[]	Laufindex
$n_{\ddot{O}W}$	[]	Anzahl von Sensorsonden unterschiedlicher Blickwinkel
$n_{\ddot{\mathrm{u}}}$	[]	Anzahl von sich überlappenden Flächen
n <sub>ü,max</sub>	[]	Maximale Anzahl von Überlappungsflächen
ή <sub>ü,max</sub>	[]	Anzahl Überlappungsflächen nach Entfernen der Überlap- pungsflächen einer gewählten Position
$p_{C}$	[]	Wahrscheinlichkeit des Cross-Over
$p_M$	[]	Mutationswahrscheinlichkeit
$p_{M,0}$	[]	Anfängliche Mutationswahrscheinlichkeit
r	[m]	Reichweite eines Sensors
r <sub>ltf</sub>	[m]	Radius des Zylinders am mechanischen Interface
S	[]	Anzahl zu unterscheidender Bereiche des Perimeters
t	[s]	Berechnungsdauer
u	[]	Anzahl zu unterscheidender Bereiche der Fläche
W	[rad]	Menge der Winkel zwischen Sondenposition und Eckpunkten eines Hindernispolygons
x	[m]	x-Koordinate einer Position
у	[m]	y-Koordinate einer Position
Griechische Bu	ıchstaben	
α	[rad]	Horizontaler Blickwinkel eines Sensors
$\alpha_{GL}$	[rad]	Verkippungswinkel der Gleitlager
$\alpha_{GL,min}$	[rad]	Minimaler Verkippungswinkel der Gleitlager
$\alpha_{KS}$	[rad]	Öffnungswinkel eines Kreissegments

$\delta_n$	[rad]	Winkel zwischen Sondenposition und n-tem Eckpunkt eines Hindernispolygons
ε	[]	Abbruchkriterium
λ	[]	Anzahl der gezeugten Kinder einer Generation
μ	[]	Anzahl der Individuen der jeweils aktuellen Generation
$\mu_H$	[]	Haftkoeffizient der Gleitlager
σ	[]	Standardabweichung der Fitness bei mehreren Simulationen
$\bar{\sigma}$	[]	Arithmetischer Mittelwert der Standardabweichungen über drei Szenarien
ω	[rad]	Orientierung einer Sensorsonde
$\Delta \omega$	[rad]	Diskretisierungsparameter für Sondenausrichtung

# Abbildungsverzeichnis

1.1:	Positionierung mobiler Sensornetzwerke	2
2.1:	Hardware-Übersicht des Roboters Secur-O-bot	
3.1:	Einordnung drahtloser Übertragungsprotokolle	25
5.1:	Prinzipskizzen zum lösbaren Kraftschluss trotz Positionierungenauigkeit	
5.2:	Prinzipskizze des Offsetausgleichs mit Gleitlagern und Rückstellfedern	
5.3:	Offsetausgleich in eine Richtung mit Schwerkraftrückstellung	
5.4:	Prinzipskizze eines sensorlosen Verdrehungsausgleichs	45
5.5:	Erweiterter Verdrehungsausgleich (obere Hälfte) zur exakten Ausrichtung	
5.6:	Prinzip einer chaotischen Aufbewahrung	50
5.7:	Anordnung von Kinematik und Magazinpositionen bei geradliniger Anordnung	
5.8:	Anordnung von Kinematik und Magazinpositionen bei kreisförmiger Anordnung	
5.9:	Prinzipskizze der Handhabung von Sensorsonden	55
5.10:	Prinzipskizze der Haltung der Sonden in den Magazinpositionen	
5.11:	Prinzipskizze des automatischen Verdrehungsausgleichs	
5.12:	Ablaufdiagramm des Ausbringvorgangs einer Sonde.	59
5.13:	Ablaufdiagramm des Einholvorgangs einer Sonde.	60
5.14:	Mechanische Schnittstelle zwischen Ausbringeinheit und Roboter	
5.15:	Schematische Darstellung eines Individuums bestehend aus n Chromosomen	65
5.16:	Darstellung von Sichtbarkeits- und Überlappungsflächen.	
5.17:	Beispiel für die optimierte Verteilung der initialen Positionen (Sterne).	67
5.18:	Schematische Darstellung von Chromosom, Parameter und Bit Cross-Over	
5.19:	Diskretisierung des Überwachungsareals und der Sondenpositionen (Punkte).	74
5.20:	Diskretisierung des Perimeters.	74
6.1:	CAD-Zeichnung des Aufbaus einer Sensorsonde	
6.2:	Halteposition für Sonden mit federbelasteter Arretierung im Magazin	
6.3:	Magazin mit Sonde in Halteposition	
6.4:	Schnitt durch das Magazin	
6.5:	Linearantrieb mit angeschlossenem Konus, montiert an der Ausbringeinheit	
6.6:	Steuerung der Ausbringeinheit mit geöffnetem Gehäuse	
6.7:	Demonstrator der Ausbringeinheit mit Sensorsonden im Magazin ohne Hülle	
6.8:	Vektorielle Darstellung einer Umgebung (links) und eines Hindernisses	
6.9:	Vektorielle Darstellung der Sensoren und der Positionierung	91
6.10:	Flächendifferenz (schraffiert) zwischen Kreis und Rechteck	91
6.11:	Abschattungspolygon H' (dunkelgrau) zu Hindernispolygon H (weiß)	

6.12:	Resultierende Erfassungsfläche (hellgrau) eines 360°-Sensors (Kreuz)	93
6.13:	Visualisierung und resultierende Werte einer Simulation mit 4 Sensoren	94
6.14:	Benutzerschnittstelle des Überwachungsroboters Secur-O-bot	95
7.1:	Links: Ansicht der Fertigungshalle, Rechts: angegliedertes Foyer.	96
7.2:	Darstellung der Fertigungshalle und des Foyers in der Simulationsumgebung.	97
7.3:	Bild der für die Tests verwendeten Büroetage	98
7.4:	Abstrahierte Büroetage in Simulationsumgebung.	99
7.5:	Ansichten der Lagerhalle für Exponate.	. 100
7.6:	Darstellung der Lagerhalle in der Simulationsumgebung.	. 100
7.7:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	. 106
7.8:	Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	107
7.9:	Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer-Einsatzfall 1	. 107
7.10:	Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 4-Einsatzfall 1	. 109
7.11:	Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 10-Einsatzfall 1	. 109
7.12:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1	. 111
7.13:	Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1	112
7.14:	Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1	112
7.15:	Darstellung der Perimeterabdeckung der besten Individuen jeder Generation	. 115
7.16:	Kurze Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 3 Lagerhalle	119
7.17:	Sichtfeld einer realen Sonde im Einsatzfall 2 Büroetage.	. 122
7.18:	Beispiel reale Sichtfeldbeeinträchtigung durch Türen und nicht kartierte Hindernisse	. 122
7.19:	Sichtfeld einer realen Sonde im Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer.	. 123
11.1:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 2	. 139
11.2:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	. 140
11.3:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 3	. 140
11.4:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 2	. 141
11.5:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	. 141
11.6:	Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 3	. 142
11.7:	Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2	. 143
11.8:	Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1	. 144
11.9:	Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3	. 144
11.10:	Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2	. 145
11.11:	: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1	. 145
11.12:	: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3	. 146
11.13:	Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2	. 147
11.14:	: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1	. 148
11.15:	Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3	. 148

11.16: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2	149
11.17: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1	149
11.18: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3	150
11.19: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 6-Einsatzfall 2	157
11.20: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 17-Einsatzfall 2	158
11.21: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 2-Einsatzfall 1	159
11.22: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 3-Einsatzfall 1	160
11.23: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 11-Einsatzfall 3	161
11.24: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 5 – Einsatzfall 3	162
11.25: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 2	163
11.26: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	164
11.27: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 3	164
11.28: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 2	165
11.29: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	165
11.30: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 3	166
11.31: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 2	167
11.32: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	168
11.33: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 3	168
11.34: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2	169
11.35: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation)-Einsatzfall 1	169
11.36: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3	170
11.37: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2	171
11.38: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1	172
11.39: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3	172
11.40: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2	173
11.41: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer - Einsatzfall 1	173
11.42: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3	174
11.43: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 16-Einsatzfall 2	180
11.44: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 19-Einsatzfall 2	181
11.45: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 21-Einsatzfall 1	182
11.46: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 17-Einsatzfall 1	183
11.47: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 18-Einsatzfall 3	184
11.48: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 12-Einsatzfall 3	185
11.49: Kurze Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 2 Büroetage	186
11.50: Lange Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 2 Büroetage	187
11.51: Kurze Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer	188
11.52: Lange Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer	189

11.53: Kurze Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 3 Lagerhalle	190
11.54: Lange Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 3 Lagerhalle	190

# Tabellenverzeichnis

1.1:	Marktübersicht und Vorhersage für Sicherheits- und Überwachungsroboter	2
2.1:	Überblick über kommerziell erhältliche Sicherheits- und Überwachungsroboter	11
2.2:	Analyse von exemplarischen Innen-Anwendungen	14
2.3:	Analyse von exemplarischen Außen-Anwendungen	15
3.1:	Sensorgruppen und Untergruppen zur Bestückung von Sensorsonden	24
4.1:	Auswirkung der Vergrößerung der Fläche sowie der Anzahl von Hindernissen	34
4.2:	Analyse der Eignung von Methoden zur Bestimmung optimaler Sondenpositionen	36
5.1:	Morphologischer Kasten für die Konzeption von Sensorsonden.	37
5.2:	Gegenüberstellung verschiedener Varianten des lösbaren Kraftschlusses	40
5.3:	Untersuchte Paarungen konischer Gegenstücke	41
5.4:	Analyse von elektrischen Schnittstellen bezogen auf die Anforderungen	47
5.5:	Beispiel zur erzielten Genauigkeit für Informationen der Sensorsonden	48
5.6:	Konzepte für die Aufgaben der Schnittstelle der Sensorsonden.	49
5.7:	Morphologischer Kasten für die Konzeption einer Ausbringeinheit	49
5.8:	Auswirkung der kinematischen Freiheitsgrade auf die Sondenaufbewahrung	51
5.9:	Konzepte für die Teilkomponenten der Ausbringeinheit.	63
5.10:	Auswertung Morphologischer Kasten für die Konzeption der Ausbringeinheit	63
6.1:	Analyse von Sensorarten bezogen auf die Anforderungen an Sensorsonden	77
6.2:	Analyse von Übertragungsprotokollen	78
6.3:	Analyse drahtloser Übertragungsformen bezogen auf die Anforderungen	79
6.4:	Qualitative Bewertung von Routingprotokollen für Ad-hoc Netzwerke	80
6.5:	Analyse von Energiespeichern bezogen auf die Anforderungen an Sensorsonden	81
6.6:	Auswahl von Teilkomponenten der Sensorsonden	81
6.7:	Auswertung Morphologischer Kasten zur Konzeption der Sensorsonden	82
7.1:	Beschreibung der Zielgrößen der vier Hauptszenarien und die jeweilige Messgröße	101
7.2:	Wertebereich der Parameter für die Optimierung des genetischen Algorithmus	103
7.3:	Werte der Parameter $\Delta d$ und $\Delta \omega$ für die Optimierung des Gridkartenansatzes	104
7.4:	Nummerierung der Parametersätze zur Bestimmung der optimalen Werte	106
7.5:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse der jeweils besten Individuen	108
7.6:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse der jeweils besten Individuen	108
7.7:	Zusammenfassung der Mittelwerte von <i>F</i> über alle Einsatzfälle	110
7.8:	Nummerierung der Parametersätze zur Bestimmung der optimalen Werte von $\mu$ und $\lambda$ .	111
7.9:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für $F$ , $\sigma$ und $t$	113
7.10:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für $F, \sigma$ und $t$	113

7.11:	Mittelwerte von F über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen	114
7.12:	Mittelwerte von $\sigma$ über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen	114
7.13:	Gegenüberstellung der Werte für $F$ und $t$ für ausgewählte Parametersätze	116
7.14:	Optimale Konfiguration des genetischen Algorithmus	116
7.15:	Ergebnisse für <i>F</i> und <i>t</i> der Simulationen des Gridmap mit Greedy-Ansatzes	117
7.16:	Ergebnisse für <i>F</i> und <i>t</i> der Simulationen des Gridmap mit Greedy-Ansatzes	117
7.17:	Simulationsergebnisse der mittleren Abdeckung <b>Fm</b> für beispielhafte Trajektorien	120
7.18:	Simulationsergebnisse der mittleren Abdeckung $Fm$ + für beispielhafte Trajektorien	120
7.19:	Steigerung der mittleren Abdeckung eines Überwachungsroboters	121
11.1:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für $F$ , $\sigma$ und $t$	150
11.2:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für $F$ , $\sigma$ und $t$	152
11.3:	Mittelwerte von <i>F</i> über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen	155
11.4:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für $F$ , $\sigma$ und $t$	174
11.5:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für $F$ , $\sigma$ und $t$	175
11.6:	Mittelwerte von <i>F</i> über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen	177
11.7:	Mittelwerte von $\sigma$ über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen	178

# 1 Einleitung

# 1.1 Motivation

Der kombinierte Einsatz von Überwachungspersonal und fest installierten Überwachungssensoren kann als klassische Überwachungsmethode bezeichnet werden. Die Sensoren sorgen für eine simultane, flächendeckende Überwachung, der Mensch für Flexibilität und intelligente Reaktionen auf ungeplante Ereignisse. Als technologische Weiterentwicklung zum Wachpersonal kann in dieser Kombination der mobile Überwachungsroboter gesehen werden. Bei ähnlicher Beweglichkeit und Flexibilität können leistungsfähigere Sensoren wie z.B. Wärmebildkameras eingesetzt werden. Darüber hinaus sind Roboter im Vergleich zum menschlichen Wachpersonal unermüdlich, unbestechlich und ihre Aufmerksamkeit stumpft bei monotoner Arbeit nicht ab. Ein weiterer Vorteil des Robotereinsatzes ist die Risikominimierung für den Menschen. Allerdings gibt es durch die Mobilität den Nachteil, dass die Überwachung nicht simultan, sondern sequentiell erfolgt.

Nicht nur der Einsatz von Überwachungspersonal birgt Nachteile, auch fest installierte Überwachungssensoren bringen Probleme mit sich. Zunächst sind hier die Kosten und der Aufwand für die Installation zu nennen, deren Planung und Durchführung von Experten übernommen werden müssen. Jeder Sensor muss korrekt angebracht, mit Energie versorgt und mit einem Datenanschluss versehen werden. Auch müssen die Positionen der Sensoren derart bestimmt werden, dass zwar alle möglichen Szenarien eines Einbruchs abgedeckt werden, die Zahl der Sensoren und damit die Anschaffungskosten aber minimal bleiben. Die starre Installation bedingt des Weiteren, dass leistungsfähige Sensoren kaum eingesetzt werden, da deren Einzelkosten mit der Anzahl von Installationspunkten multipliziert werden müssen. So sind Kameras häufig die teuersten Sensoren in einer Festinstallation. Sind die Kosten für eine komplette Absicherung nicht wirtschaftlich, wird verstärkt auf den Einsatz von Wachpersonal gesetzt bzw. die Sicherheit vernachlässigt.

Bezogen auf mobile Überwachungsroboter zeigen renommierte Studien wie die World Robotics Studie 2012 der IFR (Hägele & (Mitarb.) u.a., 2012) den stetig wachsenden Einsatz derartiger Systeme. Wie man in Tabelle 1.1 erkennen kann, wurde erwartet, dass die Zahl der verkauften Überwachungsroboter von 2012 bis 2015 auf im Schnitt 900 Stück pro Jahr ansteigt. Die tatsächlichen Verkaufszahlen der Jahre 2008 bis 2011 zeigen jedoch ein gewisses Stagnationsverhalten. Waren es 2008 noch 182 neu installierte Systeme ging die Zahl in 2009 schon auf 119 zurück, 2010 sogar auf 47. Erst 2011 war wieder eine Zunahme des Wachstums mit 53 neu installierten Robotern zu verzeichnen. Eine Möglichkeit, diesen Aufwärtstrend zu unterstützen, ist die Erweiterung des Nutzens derartiger Robotersysteme für den Endnutzer.

In der vorliegenden Arbeit werden mobile, flexible Sensornetzwerke als logische, technische Weiterentwicklung fest installierter Sensoren in der Überwachungstechnik eingesetzt, da sie keinen Installationsaufwand bedingen, positionsvariant sind und aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren bestehen können. Kombiniert man diese mit Überwachungspersonal, so wird dieses in die Lage versetzt, die Sensoren flexibel an das zu überwachende Areal anzupassen, sowie einzelne, höherwertige Sensoren individuell zu positionieren. Werden diese flexiblen Sensornetzwerke zusammen mit mobilen Überwachungsrobotern eingesetzt, so erreicht man alle zuvor genannten Verbesserungen und man kompensiert das Problem, dass Roboter wie Menschen immer nur an einem Ort sein können. Mit Hilfe des Sensornetzwerks ist der Roboter quasi omnipräsent und erreicht einen höheren Nutzwert. Die Einordnung der mobilen Sensornetzwerke im Vergleich zur klassischen Überwachungstechnik und Überwachungsrobotern ist in Abbildung 1.1 skizziert.

Tabelle 1.1:Marktübersicht und Vorhersage für Sicherheits- und Überwachungsroboter.Quelle:World Robotics Studie 2010-2012 (Hägele & (Mitarb.) u.a., 2010), (Hägele & (Mitarb.) u.a., 2011), (Hägele & (Mitarb.) u.a., 2012)

Types of robots	Sales in 2008	Sales in 2009	Sales in 2010	Sales in 2011	Forecast 2010- 2013	Forecast 2011- 2014	Forecast 2012- 2015
	units	units	units	units	units	units	units
Rescue and security app.	324	241	70	95	1.440	4.760	3.725
- Surveillance/security robots	182	119	47	53	1.200	4.200	3.600



### Abbildung 1.1: Positionierung mobiler Sensornetzwerke in Relation zu klassischer Überwachungstechnik (oben) mit mobilen Überwachungsrobotern als technologische Weiterentwicklung fest installierter Überwachungssensoren.

Die Flexibilität der Sensornetzwerke bringt die Frage mit sich, wie die Sensoren je nach Einsatzfall und Überwachungsgebiet am effizientesten positioniert werden können. Es existieren bereits mehrere Methoden, welche die besten Positionen für die einzelnen Knoten eines Sensornetzwerks bestimmen. Jedoch beziehen sich die meisten dieser Methoden auf die ausschließliche Nutzung und nicht die Kombination mit mobilen Robotern. Auch wird die Flexibilität der Sensornetzwerke in den Methoden ausschließlich bei der anfänglichen Positionierung berücksichtigt. Eine spätere absichtliche Umpositionierung der einzelnen Knoten ist nicht vorgesehen. Ein weiterer Nachteil bestehender Methoden ist die verwendete Menge an Sensoren, die häufig weit über hundert liegt (vgl. (Cărbunar u.a., 2006), (Dhillon & Chakrabarty, 2003), (Howard, Matarić & Sukhatme, 2002) oder Stolkin, Vickers & Nickerson, 2007).

Kombiniert man mobile Überwachungsroboter mit Sensornetzwerken, können diese die Positionierung der einzelnen Knoten vornehmen und nach Bedarf im Einsatz verändern. Die Menge der zur Verfügung stehenden Sensorknoten ist jedoch durch die Nutzlast und den Laderaum des Roboters begrenzt. Dies gilt es bei der Entwicklung einer Methode zur optimalen Positionsbestimmung zu berücksichtigen.

Der Nutzen der beschriebenen Erweiterung eines Überwachungsroboters mit einem Sensornetzwerk liegt darin, dass:

- der zeitgleich überwachte Bereich vergrößert wird,
- Flexibilität im Einsatz gewährleistet ist,
- keine Festinstallation erforderlich ist,
- Zufallsmuster in der Positionierung der Sensoren gezieltes Ausschalten oder Umgehen erschweren und
- die Kosten für die Erweiterung des zeitgleich überwachten Bereiches für Sensornetzwerke geringer sind als für weitere Roboter.

Somit bietet die hier vorgestellte Lösung das Potential, der eingangs beschriebenen Stagnation bei den Neuinstallationen mobiler Überwachungsroboter entgegenzuwirken.

## 1.2 Inhalt der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Kombination von Überwachungsrobotern und Sensornetzwerken. Beide für sich separat existierende Lösungen werden für einen gemeinsamen Einsatz aneinander angepasst. Die einzelnen Knoten des Sensornetzwerkes werden zu sogenannten autonomen Sensorsonden ausgebaut, welche durch den Roboter transportiert, ausgebracht und wieder eingeholt werden können. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, wird eine Ausbringeinheit als Erweiterung für den Roboter konzipiert.

Des Weiteren werden Methoden identifiziert, die die optimale Ausbringung der Sensorsonden in Abhängigkeit von der jeweiligen Umgebung und Überwachungsaufgabe gewährleisten. Diese Methoden werden analysiert, an die Anforderungen des neuen Einsatzes angepasst und miteinander verglichen, um die bestmögliche Methode zu ermitteln.

Es wird somit ein Gesamtsystem geschaffen, das aus Überwachungsroboter, Ausbringeinheit, Sensorsonden und Ausbringstrategien besteht und sowohl in Simulationen als auch im realen Einsatz auf seine Leistungsfähigkeit hin untersucht wird.

## 1.3 Problemstellung

Bei Objekt-, Gebäude- und Geländeschutz geht es um die Identifikation und Meldung von unerwünschten Ereignissen oder Abweichungen vom Regelverhalten bzw. Nominalzustand wie:

- Eindringen von unbefugten Personen,
- Entwendung oder Beschädigung von Objekten und
- Beschädigungen oder Gefahr durch z.B. Feuer oder Wasser.

Im ersten Fall wird häufig eine Perimeterabsicherung durch Überwachungssensoren vorgenommen, also eine möglichst lückenlose Erfassung eines geschlossenen Linienzuges um das zu überwachende Objekt, Gebäude oder Gelände (Barrier Coverage Problem).

Im zweiten Fall wird in Kombination mit dem ersten Fall noch eine flächige Überwachung sensibler Bereiche hinzugefügt. Darüber hinaus können Sensoren dazu verwendet werden, den Weg vom Perimeter zu den sensiblen Bereichen zusätzlich zu überwachen (Maximum-Breach-Path).

Im dritten Fall wird eine möglichst flächendeckende Überwachung mit Sensoren vorgenommen (statisches Blanket Coverage Problem).

Die Problemstellung bei der Kopplung eines mobilen Sicherheitsroboters mit der stationären Überwachungstechnik ist die Adressierung der oben angesprochenen Punkte. Darüber hinaus kommen noch drei weitere Faktoren hinzu:

- Passive Mobilität der Sensoren (Positionierung der Sensoren durch den Roboter)
- Konnektivität der Sensoren mit dem Roboter und ggf. einer Basis (Sicherstellen der Verbindung untereinander)
- Begrenzte Energieversorgung (der Roboter muss Sensoren mit erschöpften Energiequellen regelmäßig auswechseln)

Die genannten Einsatzszenarien und Rahmenbedingungen existieren auf algorithmischer bzw. planerischer Seite und sind bei der Identifikation bzw. Entwicklung von entsprechenden Ausbringstrategien zu berücksichtigen.

Auf der Seite der Hardware stellen die Kosten die vorrangige Einsatzbarriere dar. Da die naheliegende Alternative zum kombinierten Einsatz eines Überwachungsroboters mit Sensorsonden die Nutzung von mehreren Überwachungsrobotern ist, gilt es, die Kosten für die Erweiterung des Roboters geringer zu halten als die Kosten des Roboters selbst. Um später einen möglichst breiten Markt mit der entwickelten Lösung adressieren zu können, muss diese für bestehende Roboter nachrüstbar gestaltet sein. Wird für das Verhältnis zwischen Kosten für Grundmodell und für Sonderausstattungen bzw. Extras ein ähnliches Investitionsverhalten bei Käufern von Überwachungsrobotern angenommen wie bei Käufern von PKWs ("Mini-Kunden legen nach Angaben des Herstellers ein sattes Fünftel des Kaufpreises in Zusatzausstattung an." Kolwitz & Anker, 16.12.2012, 2012), dann sollte die Erweiterung maximal 20% des Preises für einen Roboter ausmachen.

### 1.4 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 wird die Ausgangssituation für diese Arbeit dargelegt. Eingangs wird erklärt, wie in der Literatur unterschiedlich gebrauchte Begriffe im Zusammenhang mit dieser Arbeit verwendet werden. Dazu gehören auch einige Definitionen. Weiterhin werden Grundlagen zum Thema Überwachung und Objektschutz dargestellt, auf welchen diese Arbeit aufbaut. Nach einem Überblick über bekannte Überwachungsstrategien vom klassischen Wachpersonal bis hin zum Überwachungsroboter werden potentielle Einsatzfälle für Sensorsonden analysiert und die für diese Arbeit relevanten ausgewählt.

In Kapitel 3 wird der Stand der Technik erläutert. Zunächst werden drahtlose Sensornetzwerke näher beleuchtet, insbesondere deren Einsatz zu Überwachungszwecken. Als zwei für Sensornetzwerke relevante Teilbereiche werden Funkprotokolle für Ad-hoc Netzwerke und Methoden zur Positionierung der Sensoren im weiteren Verlauf beschrieben. Abschließend wird der Stand der Technik im Bereich von Sensorsonden dargelegt.

Kapitel 4 beginnt mit einer Analyse der Anforderungen an Sensorsonden sowie an die für die Verwendung mit mobilen Überwachungsrobotern erforderlichen Ausbringeinheiten. Zum Schluss werden Anforderungen an die Strategien zur Ausbringung der Sensorsonden definiert und analysiert.

Ausgehend vom Stand der Technik und den definierten Anforderungen wird in Kapitel 5 die Konzeption sowohl der Sensorsonden als auch einer Ausbringeinheit vorgenommen. Im Weiteren werden zwei ausgewählte Ausbringstrategien an die identifizierten Anforderungen angepasst. Für die spätere Verifikation wird abschließend eine Simulationsumgebung erstellt, welche quantifizierbare Ergebnisse über die Leistungsfähigkeit der Ausbringstrategien liefern kann.

In Kapitel 6 wird die Realisierung des Prototypen bestehend aus Sensorsonden und Ausbringeinheit sowie der verwendete Überwachungsroboter vorgestellt. Kapitel 7 beschreibt zunächst die für die Experimente verwendeten Einsatzfälle und Umgebungen. Anschließend wird der Benchmark definiert, mit dem die Ausbringstrategien gemessen werden. Dies geschieht zuerst in Simulationen zum Optimieren der Ausbringstrategien und danach unter realen Bedingungen.

Das Fazit aus den Ergebnissen der simulierten und realen Tests wird in Kapitel 8 gezogen, welches mit einem Ausblick schließt.

# 2 Ausgangssituation

Im Folgenden wird zunächst die Verwendung einiger zentraler Begriffe geklärt, die für diese Arbeit maßgebend sind, und es werden grundlegende Definitionen erläutert. Anschließend werden Grundlagen zur Überwachung und zum Objektschutz dargelegt, auf denen diese Arbeit aufbaut. Danach werden potentielle Einsatzfelder analysiert und die für diese Arbeit relevanten definiert.

## 2.1 Begriffe und Definitionen

Einige in dieser Arbeit verwendeten Begriffe werden sowohl in der Robotik als auch in anderen Domänen mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet. Um Mehrdeutigkeiten vorzubeugen wird im Folgenden dargestellt, wie die Begriffe im Kontext dieser Arbeit zu verstehen sind.

### Autonom

Der Begriff "autonom" bezeichnet im Kontext mit Robotern "die Fähigkeit gewünschte Aufgaben auf Basis des aktuellen Zustandes und von Sensorinformationen ohne menschliche Intervention durchführen zu können". (ISO 8373:2012, 2012). In dieser Arbeit wird der Begriff in den folgenden zwei Zusammenhängen verwendet:

• Autonomer Roboter

Hierunter werden selbstverwaltete, selbständige und teilweise entscheidungsfreie Roboter verstanden. Diese Roboter sind unabhängig von externen Energieversorgungen und Steuerungseinheiten und können im Rahmen einer vorgegebenen Mission und ggf. unter Einhaltung von Randparametern die genaue Vorgehensweise zur Aufgabenerfüllung selbst wählen.

• Autonome Sensorsonde Im Zusammenhang mit Sensorsonden wird der Begriff "autonom" lediglich als Unabhängigkeit von externen Steuerungen und Energieversorgungen verwendet, da Sensorsonden nicht in der Lage sind, aktiv zu agieren.

## Roboter

Im Kontext dieser Arbeit werden Roboter immer als autonome, mobile Systeme verstanden, die in der Lage sind, sich in ihrer Umgebung zu lokalisieren, darin zu navigieren und mit dieser mittels Aktorik aktiv oder mittels Sensoren passiv zu interagieren.

## Überwachungsroboter

Überwachungsroboter bilden eine durch ihre primäre Aufgabe gekennzeichnete Untergruppe der mobilen Roboter. Ihre Aufgabe besteht in der sensoriellen Erfassung von Objekten. Dies können Grundstücke, Gebäude, spezielle Räume oder Wertobjekte sein. Durch die Erfassung unterschiedlicher Zustände und deren zeitlicher Änderung können etwaige Schäden an den Objekten frühzeitig erkannt und ggf. vermieden werden.

### (Drahtloses) Sensornetzwerk

"Ein Wireless-Sensornetzwerk (WSN) ist ein drahtloses Netzwerk aus räumlich verteilten autonomen Geräten, die mit Sensoren physikalische Größen erfassen und so die Umgebungsbedingungen abbilden". (National Instruments, 2008) In dieser Arbeit werden Sensornetzwerke vorrangig für die Unterstützung von Überwachungsrobotern eingesetzt.

### Sensorsonde

Wie in (Pfeiffer & Schraft, 2004) beschrieben, handelt es sich bei Sensorsonden um mobile Überwachungseinheiten ohne kostspielige Komponenten zur Mobilität wie Antriebe, Navigationssensorik oder Steuerungshard- und -software. Die Sonden werden als Zusatz für mobile Roboter verwendet. Sie verfügen über keinen eigenen Antrieb, sondern müssen, meist von mobilen Plattformen, ausgesetzt und wieder aufgenommen werden. Eine Sensorsonde besteht mindestens aus den folgenden Komponenten:

- Sensor
- Kommunikationsschnittstelle mit Verstärkerfunktion
- Energieversorgung
- Schnittstelle zum Aufladen der Energieversorgung
- Mechanische Schnittstelle für die Aufnahme und den Transport durch Roboter

Obwohl die Sonden ihre Aufgaben eigenständig und ohne externe Energieversorgung durchführen, können die aufgenommenen Sensordaten allenfalls in geringem Maße durch die Sonden ausgewertet werden. Somit ist es notwendig, die Daten über ein drahtloses Netzwerk an einen Roboter oder eine Basisstation weiterzuleiten. Die hierfür benötigte Infrastruktur ist nicht immer vorhanden. Daher bilden die Kommunikationsschnittstellen der Sonden mit Hilfe ihrer Verstärkerfunktion eine eigene Infrastruktur, welche den Datenaustausch zwischen Sonden, Roboter und Basisstation ermöglicht.

## Node

In Computer- und Sensornetzwerken bezeichnen Nodes (zu Deutsch: Knoten) die einzelnen Teilnehmer an der Datenkommunikation. Dabei wird nicht unterschieden ob Daten gesendet, empfangen oder lediglich weitergeleitet werden.

## Topologie

In der vorliegenden Arbeit wird Topologie im Zusammenhang mit Computernetzwerken verwendet. In diesem Kontext bezeichnet der Begriff die Art und Weise, mit der die einzelnen Nodes eines Netzwerkes miteinander verbunden sind.

### Protokoll

Im Folgenden wird der Begriff Protokoll als Kurzform von Kommunikationsprotokoll verwendet und beschreibt die Art und Weise, wie Informationen zwischen Kommunikationspartnern ausgetauscht werden.

## (Ad-hoc) Routing

Der Begriff Routing bezeichnet "eine Wegwahlfunktion zur Vermittlung von Nachrichten zwischen LANs, LANs und WANs sowie zwischen WANs" (ITWissen, 2012b). In der vorliegenden Arbeit wird Routing häufig im Zusammenhang mit Ad-hoc Netzwerken (vgl. ITWissen, 2012a) verwendet. Diese speziellen Routingverfahren werden Ad-hoc Routing genannt.

## 2.2 Bekannte Überwachungsstrategien

## 2.2.1 Wachpersonal

Die klassische Variante des Objektschutzes ist der Einsatz von Wachpersonal. Hierbei gibt es unterschiedliche Staffelungen, von gelegentlichen Streifen und Kontrollgängen externer Sicherheitsorganisationen über einen stationären, nächtlichen Wachdienst bis hin zum eigenen Wachschutz rund um die Uhr.

Ausgebildetes Personal zur Überwachung einzusetzen, bietet viele Vorteile. So stehen bei der Überwachung alle menschlichen Sinne zur Verfügung. Da der Mensch von Natur aus Veränderungen stärker wahrnimmt als gleichbleibende Sinneseindrücke (Myers & Reiss, 2008), wird Ungewöhnliches meist sofort entdeckt. Natürlich muss das Personal hierzu auf Erinnerungen an Bilder, Geräusche oder Gerüche von früheren Rundgängen zurückgreifen können. Sind solche Änderungen erst einmal bemerkt worden, kann das Personal von seiner vorgegebenen Routine abweichen, um der Ursache dieser Änderung auf den Grund zu gehen und sie gegebenenfalls beseitigen. Im Falle eines Eindringlings kann dieser möglicherweise gefasst und den Ordnungskräften überstellt werden.

Neben der Überwachungstätigkeit erfüllt Wachpersonal noch weitere Funktionen. So kann auf einem Kontrollgang überprüft werden, ob alle Türen, Fenster oder Luken, die geschlossen oder verschlossen sein sollen, dies auch wirklich sind. Außerdem können nicht benötigte Lichtquellen oder Geräte wie Monitore, Kaffeemaschinen, Ventilatoren usw., die versehentlich angelassen wurden, vom Wachpersonal abgeschaltet werden. Dies ist nicht nur aus Gründen der Energieersparnis sinnvoll, sondern auch, weil solche Geräte potentielle Brandquellen darstellen können.

Neben den Vorteilen hat der Einsatz von Wachpersonal jedoch auch Nachteile. Hier sind zunächst menschliche Schwächen zu nennen. Abstumpfung, Müdigkeit, Bestechlichkeit, Erpressbarkeit und Gleichgültigkeit seien hier als die für den Objektschutz unangenehmsten aufgelistet. Die Betreiber eines durch Wachpersonal geschützten Betriebes müssen diesen Schwächen, soweit es möglich ist, gezielt entgegenwirken. Zu diesem, letztendlich finanziellen Aufwand kommt noch der soziale Aspekt hinzu. Für das Personal ist die Arbeit mit Belastungen und Risiken verbunden. Wenn in Schichten gearbeitet werden muss, stellt die Nachtschicht eine erhöhte körperliche Belastung dar (vgl. Beermann, 2008). Gleichzeitig ist das Risiko von Einbrüchen in der Nacht am größten und somit ist höchste Konzentration gefordert. Sollte es zu Auseinandersetzungen mit Eindringlingen kommen, besteht die Gefahr von Verletzungen, im schlimmsten Fall mit Todesfolge. Vom menschlichen Aspekt dieser Belastungen und Risiken abgesehen, erzeugen diese beim Betreiber einer Anlage zusätzliche Kosten.

Ein weiterer Nachteil beim alleinigen Einsatz von Überwachungspersonal ist die Tatsache, dass das Personal nicht überall gleichzeitig sein kann. Je nach Größe eines zu überwachenden Komplexes bleiben große Teile selbst bei kontinuierlichen Rundgängen die meiste Zeit unbeaufsichtigt. Hier besteht die Gefahr, dass Unregelmäßigkeiten oder ein Eindringen nicht rechtzeitig erkannt werden. Abhilfe dagegen wird meistens durch die Kombination mit fest installierten Überwachungssensoren geschaffen.

### 2.2.2 Festinstallationen

Mit Hilfe von fest installierten Sensoren können große Areale kontinuierlich und flächendeckend überwacht werden. Die Art der eingesetzten Sensoren hängt von der erwünschten Überwachung ab. Bei der Überwachung gegen unbefugtes Betreten kommen Sensoren von einfachen Bewegungsmeldern bis hin zu Wärmebildkameras mit intelligenter Bildverarbeitung zum Einsatz. Es werden aber auch Sensoren zur frühzeitigen Erkennung von anderen Gefährdungen wie zum Beispiel Bränden oder Wasserrohrbrüchen eingesetzt. Auch hierfür reicht die Palette von einfachen Rauchmeldern bis hin zu berührungslosen Branddetektoren, die sowohl das infrarote als auch das ultraviolette Spektrum analysieren, um Fehlalarme auszuschließen.

Wie der Name schon sagt, müssen alle diese Sensoren fest in die zu überwachende Infrastruktur integriert werden und zwar mechanisch, elektrisch und informationstechnisch. Der Aufwand hierfür steigt in angegebener Reihenfolge.

Um die Kosten für die Verlegung von Datenleitungen einzusparen, werden vermehrt Sensoren mit kabelloser Netzwerkanbindung angeboten, z.B. WLAN-Kameras. In diesen Fällen muss jedoch ein besonderes Augenmerk auf die Zuverlässigkeit und Integrität der Datenübertragung gelegt werden, da anders als bei Festinstallationen kein Zugang zu Datenleitungen vorliegen muss, um übermittelte Daten abzufangen oder zu verändern.

### 2.2.3 Sicherheitsroboter

Der Markt für mobile Sicherheits- und Überwachungsroboter ist noch im Entstehen begriffen. Die meisten der heutzutage erhältlichen Modelle sind nur für den Einsatz in Gebäuden geeignet. Es gibt zurzeit nur wenige Modelle, die auch für den Außenbereich geeignet sind, wie z.B. Banryu (Akihiko & Wentz, 2009) oder T-34 (Ishikawa, 2009) von Tmsuk und Ofro (RoboWatch, 2004) von Robowatch. Banryu ist ein sechsbeiniger Roboter, ausgerüstet mit einer Kamera, Mikrofonen und einem Geruchssensor. Er kann über Sprache oder über Video-Mobiltelefone gesteuert werden, eignet sich aber aufgrund mangelnder Navigation und Lokalisierung nur für den privaten Heimbereich. Beim T-34 handelt es sich um einen radgetriebenen Roboter, welcher in der Lage ist, ein Fangnetz abzuschießen, um Personen bewegungsunfähig zu machen. Ofro eignet sich eher für den industriellen Einsatz. Der kettengetriebene Roboter ist mit einer Thermokamera, DGPS Navigation, GSM und WLAN ausgerüstet. Des Weiteren können Detektoren für Gas und Explosivstoffe hinzugefügt werden. Durch die Kommunikation über WLAN können mehrere dieser Roboter im Verbund von einer Zentrale aus betrieben werden, was den professionellen Einsatz ermöglicht. Einige dieser Modelle wurden während der Fußball WM 2006 in diversen Stadien und während der Olympischen Spiele 2008 in Peking eingesetzt (Spiegel, 06.08.2008, 2008).

Überwachungsroboter werden auch im militärischen Einsatz verwendet. ODIS (Omni Directional Inspection System) (Flann, Moore & Ma, 2002) ist ein extrem flacher, omnidirektional fahrender Roboter zur Unterbodeninspektion von Fahrzeugen. Der Roboter wird eingesetzt, um Sprengstoffanschläge mit Autobomben z.B. im Irak und in Afghanistan zu verhindern. Ebenfalls zur Inspekti-

on, aber auch zum Entschärfen von Sprengsätzen und ähnlichen für den Menschen riskanten Tätigkeiten ist die PackBot Familie (iRobot, 2011) von iRobot entwickelt worden. Es handelt sich um kettengetriebene, tragbare Roboter, die durch zwei weitere schwenkbare Antriebsketten auch Hindernisse und Treppen überwinden können.

Die Auswahl an Sicherheitsrobotern für den Innenbereich ist etwas größer. Der kleinste unter ihnen ist zurzeit der T7-4 Roborior (TechJapan, 2005) von Tmsuk. Er hat die Größe einer Wassermelone, besitzt eine Kamera und kann Livebilder an das Handy des Besitzers schicken, sollten Eindringlinge erkannt worden sein. Er ist ausschließlich für den privaten Gebrauch im Innenbereich entwickelt worden. Darüber hinaus kann der Roborior in unterschiedlichen Farben leuchten und kann somit zusätzlich als bewegtes Beleuchtungsobjekt verwendet werden. Etwas größer ist Mosro Mini (RoboWatch, 2002) von Robowatch, bei dem es sich um eine mobile Webcam handelt, die mit Passiv-Infrarot-Detektoren und Lautsprechern ausgerüstet ist. Aufgrund der Größe und der eingeschränkten Mobilität eignet er sich vor allem für private Heim- und kleinere Büroraumanwendungen. Nichtsdestotrotz kann er optional mit Gas- und Rauchmeldern ausgestattet werden. Ebenfalls von Robowatch kommt Mosro 1 (RoboWatch, 2003), der "große Bruder" des Mosro Mini. Er ist besser ausgestattet als die Mini-Version und hat eine auf Ultraschall und Infrarot basierende Navigation. Dies ermöglicht den Einsatz in größeren Arealen wie z.B. Bürogebäuden.

Der Secur-O-bot (Pfeiffer, 2004a), entwickelt vom Fraunhofer IPA und der Firma Neobotix, eignet sich ebenfalls für den großflächigen Einsatz. Dieser Roboter zeichnet sich sowohl durch eine robuste Mechanik als auch durch eine leistungsfähige und präzise, auf Laserscannern basierende Navigation aus. Die Plattform ist mit einer Pan-Tilt-Kamera mit 21-fachem optischem Zoom ausgestattet. Des Weiteren sind Passiv-Infrarot-Detektoren, ein Radarsensor, Mikrofon sowie ein Sensor zur Absturzsicherung eingebaut. Der differenzialradgetriebene Roboter wird über zwei 12 Volt Batterien versorgt, wodurch ein kontinuierlicher Einsatz von ca. 10 Stunden erreicht wird. Durch die Nutzlast von mehr als 30 kg können je nach Anwendung optional weitere Sensoren wie Thermokameras, Gasdetektoren sowie Feuer- und Rauchmelder eingebaut werden. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit wird Secur-O-bot als Trägerplattform für den Demonstrator eingesetzt. Eine Übersicht der Hardware ist in Abbildung 2.1 gegeben.



Abbildung 2.1: Hardware-Übersicht des Roboters Secur-O-bot

Einige weitere Sicherheitsroboter sind SMIS von Robosoft, Robot X (SECOM, 2009) von Secom, RoboGuard von Quadrox (Birk, 2002) und C4 von Alsok (ALSOK, 2006). In Tabelle 2.1 ist ein exemplarischer Überblick über erhältliche Sicherheits- und Überwachungsroboter gegeben.

Tabelle 2.1:	Überblick über kommerziell erhältliche Sicherheits- und Überwachungsrobotei
(exemplarisc	).

Roboter	Hersteller	Anwendungsbereich	Sensorausstattung	Interaktions- möglichkeiten	Preis
Banryu	Tmsuk	Außenbereich, Privatanwender	Kamera, Mikrofon, "Geruchssensor"	Akustisch	ca 14 T€
Ofro	Robowatch	Außenbereich, Industrie	Thermokamera, DGPS, Detektor für Gase & Sprengstoffe	Optisch & akustisch	ab 67 T€
T7-4 Roborior	Tmsuk	Innenbereich, Heimanwendung	Kamera	Optisch & akustisch	ca 2,2 T€
ODIS	Tardec	Außenbereich, Militär	Kamera	Optisch	k.A.
PackBot	iRobot	Außenbereich, Militär	Kamera, opt. Detek- tor für Gase, Kampf- & Explosivstoffe	Optisch, akustisch, Manipulation	ca 93 T€
Mosro Mini	Robowatch	Innenbereich, Heim- oder Büro- Anwendung	Kamera, PIR, Mikrofon, optional Gassensor	Optisch & akustisch	ab 1,2 T€
Mosro	Robowatch	Innenbereich, Bürogebäude und Industrie	Kamera, Radar, Gas- & Rauchmelder, PIR, optional Mikrofone	Optisch & akustisch	ab 15 T€
Secur-O- bot	Fraunhofer IPA & Ne- obotix	Innenbereich, Büro- gebäude und Industrie	Kamera, Radar, PIR, Mikrofone, opt. Gas- & Feuermelder	Optisch & akustisch	ab 18 T€
Robot X	Secom	Innenbereich, Bürogebäude	360° Kamera	Optisch, akustisch und Nebelwerfer	k.A.
SMIS	Robosoft	Innenbereich, Bürogebäude	Kamera, Mikrofon	Optisch & akustisch	k.A.
C4	ALSOK Innenbereich, Bürogebäude		Kamera, Mikrofon, PIR, Feuersensor	Optisch & akustisch	ca. 152 T€
Weitere Systeme, die es noch nicht zur Marktreife gebracht haben, sind z.B. der Guard Robot (Shimosasa u.a., 1999) und der Chung-Cheng-I (Luo & Su, 2003), (Luo u.a., 2006) und (Luo, Lin & Su, 2009). Der erstgenannte der beiden fährt nachts Patrouillen in Gebäuden und wird dabei von Sicherheitspersonal überwacht. Der letztgenannte wurde speziell für Branderkennung und -meldung per GSM-Modem entwickelt. Ein Roboter, der bei Branderkennung auch Brandbekämpfungsmaßnahmen einleiten kann, wird in (Chien u.a., 2007) vorgestellt. Das System kann sowohl über WLAN als auch über ein GSM-Modem gesteuert werden. Aktiv eingreifen kann auch ROBART III (Everett, Gilbreath & Ciccimaro, 2001), ein Sicherheitsroboter mit einer Betäubungswaffe zum Aufhalten identifizierter Eindringlinge. Um diesem Roboter einen größeren Überwachungsbereich und eine höhere Kommunikationsreichweite zu ermöglichen, kann er eine Gruppe kleiner Laufroboter kontrollieren (Ciccimaro u.a., 1999). Diese sind mit Sensoren und Funkeinheiten ausgestattet und folgen dem ROBART III nach einem definierten Muster und bilden somit ein Netzwerk aus Überwachungsrobotern.

Ebenfalls auf ein Netzwerk greift ein in (Yoon-Gu Kim u.a., 2006) vorgestellter "Home Security Mobile Robot" (HSMR) zurück. An festen Positionen sind kabellose Sensoren als Knotenpunkte eines "Home Security Sensor Networks" (HSSN) (Tian & Geng, 2009b), (Tian & Geng, 2009a) angebracht. Diese erfassen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Gaskonzentration und detektieren Feuer und Bewegung. Der Roboter wertet die Zustände des HSSN aus und meldet bei Überschreitung von Grenzwerten einen Alarm an den Benutzer.

Die Idee hinter all diesen Robotern ist stets die gleiche. Sie werden mit hochwertigen Sensoren wie Farb- oder Thermobildkameras, Radarsensoren, Gas- und Rauchmeldern, PIR-Bewegungsmeldern und sogar chemischen Detektoren ausgestattet. All diese Sensoren werden an die Steuerung des Roboters, meist einen Industrie-PC, angeschlossen. Wird von einem oder mehreren der Sensoren etwas Ungewöhnliches aufgezeichnet, so wird von diesem PC ein optischer oder akustischer Alarm aktiviert und, wenn möglich, an einen zentralen Kontrollraum zur Auswertung durch einen Menschen weitergeleitet. Die Effektivität dieses Vorgehens wird unter anderem von der Reichweite der Sensoren bestimmt. Anders als bei flächendeckenden Festinstallationen können die Roboter das Einsatzgebiet, je nach Anwendung und Anzahl der eingesetzten Roboter, nur abschnittsweise überwachen. Begeben sich die Roboter auf ihrer Überwachungsfahrt in ein Gebäude, so sind für diesen Zeitraum die anderen Gebäude sowie die Außenanlagen ungeschützt. Der Ansatz von ROBART III versucht dieses Problem mit den kleinen Laufrobotern zu umgehen, erkauft sich die Vergrößerung des Überwachungsgebietes jedoch durch die hohen Kosten weiterer mobiler Roboter. Einzig die zuletzt genannte Kombination mit kabellosen Sensornetzwerken ermöglicht eine wirklich flächendeckende Überwachung, bedingt allerdings den Installationsaufwand für die Sensoren.

#### 2.3 Analyse von Einsatzfällen

Das Spektrum von Einsatzmöglichkeiten für mobile Roboter und somit auch für die Anwendung von Sensorsonden erstreckt sich sowohl auf den Innen- als auch auf den Außenbereich. Exemplarische Anwendungsfälle sind für den Innenbereich in Kapitel 2.3.1 und für den Außenbereich in Kapitel 2.3.2 aufgeführt. Für eine Analyse dieser Anwendungsfälle werden zunächst Kriterien aus der DIN EN 1627 (DIN EN 1627 2011-09, 2011) verwendet. Diese Norm beschreibt die Anforderungen an und die Klassifizierung von Einbruchshemmung bei Türen, Fenstern, Vorhangfassaden, Git-

terelementen und Abschlüssen. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem die Klassifizierung von Interesse. Es werden drei Kategorien von Einsatzorten unterschieden:

- A: Wohnobjekte
- B: Gewerbeobjekte und öffentliche Objekte
- C: Gewerbeobjekte und öffentliche Objekte mit hoher Gefährdung

Darüber hinaus werden sechs Widerstandsklassen definiert, die mit einem erwarteten Tätertyp bzw. einem mutmaßlichen Täterverhalten korreliert sind:

- WK 1: Schutz gegen Aufbruchsversuche mit körperlicher Gewalt und Vandalismus
- WK 2: Schutz gegen Gelegenheitstäter mit einfachen Werkzeugen
- WK 3: Schutz gegen Aufbruchsversuche mit Hebelwerkzeugen
- WK 4: Schutz gegen erfahrene Täter mit schweren Schlag- und Sägewerkzeugen
- WK 5: Schutz gegen erfahrene Täter mit Elektrowerkzeugen
- WK 6: Schutz gegen erfahrene Täter mit schweren Elektrowerkzeugen

Für Wohnobjekte empfiehlt (Metzger, 2010) je nach Gefährdung zwischen WK 2 und WK 3 in geschützter und bis zu WK 4 in ungeschützter Lage für Einfamilienhäuser. Für Mehrfamilienhäuser wird zwischen WK 2 und WK 3, für gewerbliche Objekte wird je nach Lage und Gefährdung zwischen WK 4 und WK 6 empfohlen.

Aus der beschriebenen Klassifizierung lassen sich für die Analyse von Einsatzfällen folgende Beurteilungskriterien ableiten:

- Nutzungsart: Hierbei wird die Nutzung als Wohnobjekt oder als Gewerbe- oder öffentliches Objekt unterschieden.
- Gefährdung: Kann als Maß für das Interesse an unbefugtem Eindringen verstanden werden. Im Falle von Orten für Massenveranstaltungen oder öffentlichen Transportknotenpunkten muss jedoch die Gefährdung anders beurteilt werden. Hierbei steht die Gefährdung für die Wahrscheinlichkeit, Ziel eines terroristischen Aktes zu werden.
- Lage: Zentral gelegene Objekte sind geschützter als abgelegene Objekte.

Auch wenn eine gewisse Verbindung zum zuvor genannten besteht, werden darüber hinaus noch die folgenden Kriterien berücksichtigt:

- Zugang: Objekte mit wenigen, regulierten Zugängen werden anders klassifiziert als Objekte mit vielen, unbeaufsichtigten Zugängen.
- Personenverkehr: Kann sich positiv auswirken, da das Risiko für einen unbefugten Eindringling steigt, erschwert aber auch die Unterscheidung zwischen befugten und unbefugten Personen.

Bei der Analyse der einzelnen Anwendungsfälle wird ggf. noch zwischen Tag und Nacht unterschieden. Bürogebäude in einem Büroviertel sind tagsüber z.B. in einer belebten Lage mit hohem Personenverkehr, nachts jedoch sind sie zumeist entlegen und menschenleer.

#### 2.3.1 Anwendungsfälle im Innenbereich

Bei Innenbereichen, die öffentlich zugänglich sind, gibt es selten sensible Areale. Falls doch, handelt es sich meistens um Zugänge zu nicht öffentlichen Bereichen, die dann in einen der anderen Anwendungsfälle wie z.B. Bürogebäude oder Lagerhalle fallen und dort wiederum einen Zugangspunkt auf dem Perimeter darstellen. Einzig bei Museen kommt es vor, dass sensible Bereiche innerhalb des öffentlichen Areals existieren. Bei Flughäfen kann der Abflugbereich als teilweise öffentlicher Bereich angesehen werden, bei dem erhöhte Sicherheitsanforderungen gelten.

Bei Gewerbe- oder Wohnobjekten handelt es sich in den meisten Fällen um strukturierte Umgebungen mit rechtwinkligem Wandverlauf, Verbindungsgängen und offenen bzw. abgegrenzten Räumen. In Gewerbeobjekten gibt es Zeiten, zu denen sich Personen nicht in diesen Bereichen aufhalten sollen. Auch gibt es Fälle, in denen innerhalb der Bereiche Teilbereiche mit besonderer Sicherheitsanforderung existieren, so z.B. Serverräume in Büros, abgesperrte Lagerbereiche für Waren großen Werts etc. Die Sicherung dieser Bereiche genießt eine höhere Priorität und soll ebenfalls bei der Erarbeitung der Lösung berücksichtigt werden.

Die Anwendungsfälle mit hoher Gefährdung liegen in Bereichen, in denen eine große Anzahl von Objekten von großem Wert gelagert sind (Ausnahme Flughafen, siehe oben). Dies führt zur Annahme, dass die Bewachung von sensiblen Bereichen bzw. von wichtigen Objekten zur Hauptaufgabe eines Überwachungsroboters im Innenbereich gehört. Gleichzeitig sieht man in Tabelle 2.2, dass diese Bereiche schlecht kontrollierte bzw. kontrollierbare Zugänge aufweisen. Die Erkennung von Eindringlingen wird demnach ebenfalls eine Hauptaufgabe eines Überwachungsroboters sein. Da in den Bereichen hoher Gefährdung zumindest nachts sehr wenig Personenverkehr herrscht, kann auch eine flächendeckende Überwachung z.B. auf Wasserschäden, Rauch oder aber zur Regulierung von Umweltparametern sequenziell erforderlich sein.

#### Tabelle 2.2: Analyse von exemplarischen Innen-Anwendungen

(G: Gewerbeobjekt, W: Wohnobjekt, Ö: öffentliches Objekt, --: sehr wenig/gering/schlecht, -: wenig/gering/schlecht, 0: mittel, +: viel/hoch/gut, ++: sehr viel/hoch/gut; zwei Angaben stehen für die Bewertung Tag/Nacht)

Anwendungsfall	Nutzungsart	Gefährdung	Lage	Zugang	Personenverkehr
Bürogebäude	G	0	+/0	+	+/
Wohngebäude	W	0	+	0	++
Fertigungshalle	G	-	0	+	++/-
Lagerhalle	G	+	-	-	
Messehalle	Ö/G	+		-/	++/
Parkhaus	Ö	+	0		++/-
Einkaufszentrum	Ö/G	++	0	-	++/
Flughafen	Ö	++	0		++

Beim Einsatz von Überwachungsrobotern und Sensorsonden wird im Innenbereich vor allem der Einfluss von Hindernissen relevant, da diese sich sowohl auf den Erfassungsbereich der Sensoren als auch auf die Reichweite der Kommunikation auswirken.

#### 2.3.2 Anwendungsfälle im Außenbereich

Bei den Anwendungsfällen im Außenbereich beschränken sich die sensiblen Bereiche fast ausschließlich auf die Gebäudeumgebung bzw. explizit auf die Zugänge zum Gebäude. Einzig bei (petro-)chemischen Anlagen können z.B. Tanks von Gefahrstoffen als sensible Bereiche auftreten, die nicht in diese Kategorie fallen. Die meisten in Tabelle 2.3 aufgeführten Anwendungsfälle haben eine sehr schlechte bis mittlere Zugangsüberwachung. Auch hier bilden die (petro-)chemischen Anlagen mit gut gesicherten Zugängen eine Ausnahme. In allen Fällen besteht zumindest nachts nur mittlerer bis sehr geringer Personenverkehr. Der Einsatz von Überwachungsrobotern bezieht sich hier also auf die Sicherung des Perimeters und ggf. noch des Weges zu sensiblen Bereichen. Eine sequenzielle Flächenüberwachung kann auch im Außenbereich interessant sein. Vor allem bei den (petro-)chemischen Anlagen ist eine Überwachung auf austretende Gefahrstoffe wichtig. Bei Parkplätzen kann die Flächenüberwachung als Maßnahme zur Vermeidung von Vandalismus fungieren.

Bis auf die Fälle Lagerstätte und Parkplatz handelt es sich größtenteils um Umgebungen mit wenig variabler Anordnung. Jedoch sind diese immer noch weniger strukturiert, als es im Vergleich zum Innenbereich der Fall ist. Dies stellt höhere Anforderungen an die Navigation und Ortung der Überwachungsroboter. In der Natur der Anwendungsfälle im Außenbereich liegt auch, dass die Roboter der Witterung ausgesetzt sind, was höhere Anforderungen sowohl an die Auswerteverfahren der Sensorsignale als auch an die verwendete Hardware stellt. Eine weitere Anforderung an die Hardware resultiert aus der abgeschiedenen Lage der Anwendungsfälle. Die Roboter müssen zum einen fehlertolerant sein, damit Grundfunktionalitäten bis zum Eintreffen von Wartungspersonal erhalten bleiben, zum anderen müssen die Roboter über eine gewisse Robustheit verfügen, damit sie im Falle von Sabotage lange genug funktionsfähig bleiben, bis diese gemeldet werden kann. Im Idealfall widersteht der Roboter diesen Versuchen, bis Sicherheitskräfte das Objekt erreichen.

#### Tabelle 2.3: Analyse von exemplarischen Außen-Anwendungen

(G: Gewerbeobjekt, W: Wohnobjekt, Ö: öffentliches Objekt, --: sehr wenig/gering/schlecht, -: wenig/gering/schlecht, 0: mittel, +: viel/hoch/gut, ++: sehr viel/hoch/gut; zwei Angaben stehen für die Bewertung Tag/Nacht)

Anwendungsfall	Nutzungsart	Gefährdung	Lage	Zugang	Personenverkehr
Fabrikgelände	G	0	-	0	0
Lagerstätte	G	0			
Stadion	Ö	++	0	0/-	++/
Parkplatz	Ö	+	-		+/
(Petro-)Chemi- sche Anlagen	G	-		+	0

Auch im Außenbereich können Hindernisse auftreten, jedoch meist in geringerem Umfang als im Innenbereich. Darüber hinaus kann die Topografie Einfluss auf die Sichtweite der Sensoren und die Reichweite der Kommunikation haben.

#### 2.3.3 Definition der für diese Arbeit relevanten potentiellen Einsatzszenarien

Durch die vorangegangene Darstellung potentieller Einsatzszenarien wird ersichtlich, dass sowohl im Innen- als auch im Außenbereich die gleichen Überwachungsfunktionen benötigt werden:

- Perimeterüberwachung
- Überwachung sensibler Bereiche
- Sequenzielle Flächenüberwachung

Die Anforderungen sowohl an die Hardware als auch an die Navigations- und Lokalisierungssoftware sind im Falle von Außenraumeinsätzen größer, die Anforderungen an die Positionierung von Sensoren jedoch durch die höhere Anzahl von Hindernissen im Innenbereich komplexer. Da es in dieser Arbeit vorrangig um die Identifizierung und den Vergleich geeigneter Ausbringstrategien und nicht um die Entwicklung outdoor-tauglicher Hardware oder Navigationsverfahren geht, werden in der vorliegenden Arbeit Einsatzszenarien im Innenbereich herangezogen.

### 3 Stand der Technik

Als Basis für die Entwicklungen in den weiteren Kapiteln wird zunächst der Stand der Technik betrachtet. In Kapitel 3.1 wird auf drahtlose Sensornetzwerke und deren unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten eingegangen. Da die Grundidee dieser Sensornetzwerke Pate für die Entwicklung der Sensorsonden stand, werden in Kapitel 3.2 die verschiedenen Funkprotokolle für den Aufbau von Ad-hoc Netzwerken beleuchtet. Ebenfalls aus dem Bereich der drahtlosen Sensornetzwerke kommen Strategien für die optimale Positionierung der Sensoren. Eine Sammlung der gängigsten Methoden wird in Kapitel 3.3 dargestellt. Ein Überblick über mögliche Komponenten von Sensoren, drahtlose Übertragungsformen und Energieversorgungen für Sensorsonden findet sich dann in Kapitel 3.4.

#### 3.1 Drahtlose Sensornetzwerke zur Überwachung

Drahtlose Sensornetzwerke werden in unterschiedlichen Bereichen zum Einsatz gebracht. In (Lewis, 2004) wird z.B. die Verwendung in sog. "Smart Environments" also "Intelligenten Umgebungen" beschrieben und exemplarisch die folgenden Einsatzbereiche genannt:

- Schiffe
- Maschinen
- Habitat von Tieren
- Fahrzeuge
- Medizin
- Haushalt

In (Polastre u.a., 2006) und (Adriaens, Megerian & Potkonjak, 2006) werden ebenfalls Einsatzmöglichkeiten zur Habitatüberwachung von Tieren dargestellt, wobei letzterer auch Straßen und öffentliche Plätze mit einschließt. Eine interessante Anwendung im medizinischen Bereich beschreibt das Projekt "Life-Saving Sensor Networks for Post Disaster Applications" des IEEE Humanitarian Technology Network (Humanitarian Technology Network, 2009). Hier sollen kleine, kostengünstige Sensoren medizinische Daten von Verletzten nach Katastrophen wie Schiffsunglücken oder Flugzeugabstürzen bereitstellen. Eine Anwendung im häuslichen Umfeld beschreibt (Tian & Geng, 2009b). Es wird ein Sensornetzwerk vorgestellt, welches aus Temperatur-, Luftfeuchtigkeits-, Gas-, Feuer- und Einbruchssensoren besteht und mit dessen Hilfe sowohl für ein angenehmes Raumklima als auch für die Sicherheit der Bewohner gesorgt wird. Wie bereits in Kapitel 2.2.3 erwähnt, ist dieses Sensornetzwerk mit einem mobilen Roboter verbunden, der die Werte der einzelnen Sensoren auswertet und sich bei Überschreitung einzelner Grenzwerte zu den jeweiligen Sensoren begibt sowie ggf. dem Benutzer eine Alarmmeldung zukommen lässt.

In (Lewis, 2004) werden auch einige kommerziell erhältliche, drahtlose Sensornetzwerke, wie z.B. Crossbow Berkley Motes und Microstrain's X-Link Measurement System beschrieben. Beide Beispiele sind aufgrund der begrenzten Übertragungsrate (40 kBit/s bzw. 150 kBit/s) eher für eindimensional messende Sensoren wie Temperatur, Druck oder Gaskonzentration geeignet, als für die

Übertragung mehrdimensionaler Sensordaten, wie es z.B. bei Kamerabildern oder Laser-Scans der Fall ist, da diese ein erhebliches Datenaufkommen verursachen.

Die in (Ciccimaro u.a., 1999) vorgestellte Kombination des ROBART III mit kleinen Laufrobotern kann als eine Vorstufe der dieser Arbeit zugrundeliegenden Kombination von mobilen Sicherheitsrobotern mit Sensornetzwerken angesehen werden. Die Verwendung von Laufrobotern als Basis für die Nodes des Sensornetzwerkes bedingt jedoch einen Nachteil dieses Konzeptes, da jeder Node Antriebstechnik, Steuerung und Energieversorgung für die Mobilität benötigt, was jeweils für Laufmaschinen aufwändiger ist als für radbasierte Roboter. In der Patentschrift (Sood, 2000) werden autonome Sensoren zur Überwachung von maritimen Arealen beschrieben. Die Ausbringung erfolgt ungeplant und eine Bergung der Sensoren ist nicht vorgesehen. Die in dieser Arbeit entwickelte Verwendung passiv mobiler Nodes mit Robotern wurde erstmals in der Patentschrift (Pfeiffer, 2004b) dargelegt. Das Patent beschreibt einen Sicherheitsroboter mit einer Vorrichtung, in der autonome Sensoren eines Sensornetzwerks bevorratet sind. Die einzelnen Sensorpakete werden Sensorsonden genannt.

Ein wichtiger Aspekt bei drahtlosen Sensornetzwerken ist die Wahl des jeweiligen Kommunikationsprotokolls für die drahtlose Übertragung. Eine Übersicht über häufig verwendete und diskutierte Protokolle findet sich im folgenden Abschnitt.

#### 3.2 Funkprotokolle

Eine Übersicht über Kommunikationsnetzwerke, verwendete Topologien, Protokolle und Routingverfahren sowie einiger Standards findet sich in (Lewis, 2004). Da in drahtlosen Sensornetzwerken eine variable Topologie vorliegt, sind vor allem selbstorganisierende, sogenannte Ad-Hoc Routingprotokolle von Interesse. Beim Vergleichen dieser Protokolle werden häufig folgende Kriterien untersucht:

- Delay Dieser Wert beschreibt die Zeit vom Verschicken bis zum Empfangen einer Nachricht. In den meisten Fällen wird der Mittelwert über einen längeren Zeitraum betrachtet.
- Packet Delivery Ratio (PDR) Das Verhältnis zwischen vom Empfänger erhaltenen und vom Sender verschickten Paketen. (Arora & Rama Krishna, 2010:392)
- Re-Routing Zeit Beschreibt die Zeit, die benötigt wird, um nach einem Kommunikationsabbruch eine neue Route vom Sender zum Empfänger zu bestimmen, also die Zeit, bis die Kommunikation wieder hergestellt ist.
- Routing Overhead Ist ein Maß für die Menge an Routinginformationen, die im Header eines jeden Paketes mitgeführt werden muss.

Bei Routingprotokollen sind drei Varianten zu unterscheiden:

- Proaktive: Proaktive Protokolle bestimmen für die aktuelle Topologie der Nodes die jeweils beste Route für eine Nachricht im Voraus. Diese Routinginformation wird im Header jeder Nachricht mitgeführt, was zu einem größeren Overhead führt. Jedoch ist das Delay bei proaktiven Protokollen geringer als bei reaktiven. Ändert sich die Topologie der Nodes, müssen jedoch alle Routinginformationen neu berechnet werden.
- Reaktive: Im Falle reaktiver Protokolle werden die Routen für jede Nachricht immer neu berechnet. Dies führt zu einem größeren Delay als bei den proaktiven Protokollen, kommt aber

mit geringerem Routing Overhead aus. Bei einer Änderung der Topologie der Nodes werden keine zusätzlichen Berechnungen notwendig.

• Hybride: Diese Protokolle haben eine proaktive und eine reaktive Phase. In der proaktiven Phase werden die Nodes zu Zonen oder Gruppen zusammengefasst und aktuelle Routinginformationen zu sogenannten Bordergateways vorgehalten. In der reaktiven Phase wird dann der Pfad einer Nachricht zwischen den Bordergateways berechnet. (Katevas u.a., 2007:221)

Zu den im Zusammenhang mit drahtlosen Sensornetzwerken am häufigsten diskutierten Routingprotokollen gehören:

- AODV (Ad-hoc On-demand Distance Vector) (Perkins & Royer, 1999),
- DSR (Dynamic Source Routing) (Johnson & Maltz, 1996),
- OLSR (Optimized Link State Routing) (Jacquet u.a., 2001),
- GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) (Karp u.a., 2000),
- TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm) (Park & Corson, 1997 // 2002, c1997) und
- B.A.T.M.A.N. (Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking) (Johnson, Ntlatlapa & Aichele).

Eine Übersicht über diese und weitere Routingprotokolle findet sich zum Beispiel bei (Abusalah, Khokhar & Guizani, 2008). Darüber hinaus werden in dieser Veröffentlichung die Protokolle AODV, DSR, OLSR und TORA hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Sicherheit untersucht. Hinsichtlich des Delays schnitten bei dieser Untersuchung AODV und OLSR besser ab, bezüglich der benötigten Routinginformationen waren allerdings DSR und TORA überlegen. Dies ist insofern interessant, als dass es sich bei AODV um ein reaktives Protokoll handelt, welches wenig Routinginformationen benötigen sollte. Bei dieser Untersuchung wurden 15 Nodes verwendet.

Für den Einsatz bei der Kommunikation von unbemannten Flugsystemen (Unmanned Aereal Vehicle, kurz UAV) untersucht (Hyland u.a., 2007) GPSR, OLSR und AODV. Hier wurde GPSR sowohl in Bezug auf PDR als auch auf Delay als leistungsfähigstes Protokoll der drei identifiziert. AODV schnitt im Vergleich als schlechtestes Protokoll ab. Für die Betrachtung wurden 100 Nodes verwendet.

In (Zeiger, Kraemer & Schilling, 2008) werden die vier Protokolle AODV, OLSR, DSR und B.A.T.M.A.N. verglichen. Einsatzszenario ist die Teleoperation von Robotern. Verwendet werden fünf ortsgebundene Nodes (vier davon Roboter) und ein mobiler. Die Erkenntnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit von AODV und OLSR decken sich mit den zuvor beschriebenen. Bei DSR wurde der geringste Packet Loss und die schnellste Re-Routingzeit festgestellt. Die schlechte Performance von AODV und OLSR wird auf die geringe Anzahl der verwendeten Nodes zurückgeführt, da beide Protokolle ursprünglich für eine große Anzahl mobiler Nodes entwickelt wurden. Obwohl B.A.T.M.A.N. als Nachfolger von OLSR gehandelt wird, konnte mit diesem Protokoll in jedem Testdurchlauf beim ersten Re-Routing über mehr als einen Node die Verbindung nicht innerhalb von 50 Sekunden wiederhergestellt werden. Das Testszenario konnte daher nicht abgeschlossen und somit auch kein Vergleich angestellt werden.

OLSR und AODV werden bei (Katevas u.a., 2007) für die Eignung bei Visuellen Sensornetzwerken (VSN) verglichen. Für den Vergleich wurden vier ortsfeste und ein mobiler Node verwendet. Als

reaktives Protokoll hat AODV Stärken bezüglich Routing Overhead, erzeugt aber ein größeres Delay. Das proaktive Protokoll OLSR hat erwartungsgemäß ein niedrigeres Delay, jedoch Schwächen beim Routing Overhead. Als Empfehlung wird für VSN die Verwendung von reaktiven Protokollen ausgesprochen. Dies wird mit dem Umstand der überschaubaren Anzahl von Nodes begründet. Bei einer wachsenden Anzahl von Nodes steigt jedoch der Delay an und proaktive Protokolle liefern bessere Ergebnisse.

#### 3.3 Ausbringstrategien

Das Problem der optimalen Positionierung von Sensoren zur Überwachung von bestimmten Arealen geht zurück auf das "Art Gallery Problem", das 1973 von Victor Klee gestellt wurde. Klee stellte die Frage nach der minimal notwendigen Anzahl von Sicherheitskräften, um einen Raum, dessen Umrandung durch ein Polygon mit n Kanten dargestellt werden kann, in seiner Gesamtheit zu überwachen. Darauf aufbauend stellte Vasek Chvátal 1975 das "Chvátal's Art Gallery Theorem" (Chvatal, 1975) auf, welches besagt, dass n/3 Sicherheitskräfte hierfür ausreichend und manchmal notwendig sind. Seit 1975 wurden verschiedenste Ansätze zur numerischen Lösung des "Art Gallery Problems" erarbeitet und diskutiert. In (O'Rourke, 1987) finden sich gesammelt verschiedenste mathematische und geometrische Ansätze. In (Marengoni u.a., 2000) wird eine Lösung diskutiert, die mittels einer Kombination aus geometrischer Berechnung, "Graph Coloring" (Chiba, Nishizeki & Saito, 1981) und "Set Coverage" (Cormen, Leiserson & Rivest, 1990) die optimale Anzahl und Positionierung der Überwacher für die dreidimensionale Variante des Problems bestimmt.

In realen Szenarien existieren Randbedingungen, die durch das "Art Gallery Problem" nicht abgedeckt sind, wie z.B.:

- Sensoren haben eine begrenzte Reichweite
- Einige Sensoren haben ein begrenztes Sichtfeld
- Sensoren müssen untereinander kommunizieren können
- Sensoren können ausfallen
- Einige Bereiche müssen vorrangig überwacht, einige können vernachlässigt werden
- Es existieren Hindernisse, die nicht zum Polygon der Umgebung gehören
- Es existieren dynamische Effekte

Diese Randbedingungen führen dazu, dass immer wieder neue Lösungsansätze für explizite Szenarien entwickelt werden. Dabei wird in der Regel auf einen mehr oder weniger festen Satz von Methoden zurückgegriffen, von welchen die häufigsten im Folgenden kurz beschrieben werden.

#### 3.3.1 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen (GA) (Goldberg, 1989) verwenden das Prinzip des Überlebens der Stärkeren aus der Darwin'schen Evolutionstheorie, um bei komplexen Optimierungsproblemen Lösungen zu bestimmen. Hierbei werden mögliche Lösungen als Individuen dargestellt, die gegeneinander verglichen werden. Die Besten werden dann zur Bildung einer neuen Generation von Individuen herangezogen, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird.

Bei der Positionierung von Sensoren wurden genetische Algorithmen z.B. in (Cruz, Vélez & Thomson, 2010) verwendet. Dabei ging es um die Bestimmung der Eigenschaften großer Struk-

turen wie beispielsweise Stadien und es wurde eine maximale Anzahl von 20 Sensoren verwendet. Die Ergebnisse, die mit genetischen Algorithmen erreicht wurden, wurden mit Ergebnissen aus Effective Independence (EI) und Modal Kinetic Energy (MKE) Methoden verglichen. Die genetischen Algorithmen gingen aus dem Vergleich als beste Methode hervor.

In (Mattikalli u.a., 2007) werden gleich vier Methoden zur optimalen Auswahl und Positionierung von Sensoren zur Perimetersicherung verglichen. Dabei wird festgehalten, dass genetische Algorithmen sehr komplexe Probleme lösen können, jedoch eine große Anzahl von Durchläufen und Berechnungen nötig sind und nicht sichergestellt werden kann, dass die qualitativ beste Lösung erreicht wurde. (Mattikalli u.a., 2007:918)

Genetische Algorithmen werden auch auf einem verwandten Gebiet eingesetzt: Der Platzierung von sogenannten Intrusion Detection System (IDS) Sensoren. Diese Sensoren sollen das Eindringen in ein Kommunikationsnetzwerk aufspüren bzw. erschweren. Mit diesem Thema beschäftigen sich z.B. (Chen u.a., 2009) und (Herrero u.a., 2009). Trotz der unterschiedlichen Anwendung bestehen Parallelen zu Sensoren, die zur Überwachung von realen Objekten eingesetzt werden. Die Vorgehensweise bei der Beschreibung der Individuen und die Parametrierung des GA können als Ausgangsbasis für eigene Betrachtungen verwendet werden. In (Hao Chen u.a., 2010) werden Multi-Objective Genetic Algorithms (MOGA) eingeführt, welche eine Kombination von GA mit Multi-Objective Optimization (MOO) Methoden darstellen. Im vorliegenden Fall werden als Objectives Detektionsrate und False-Alarm Rate verwendet. Auch hier ist ein Transfer der Erkenntnisse auf reale Szenarien und Sensoren denkbar.

#### 3.3.2 Potenzialfelder

Potenzialfelder werden in der Robotik erstmals in (Khatib, 1985) erwähnt. Dabei handelt es sich um die Ausnutzung eines physikalischen Phänomens. Es werden anziehende und abstoßende Kräfte ähnlich denen in magnetischen Potenzialfeldern eingeführt. Bei der Navigation beispielsweise werden Hindernissen abstoßende Kräfte zugeordnet, die gewünschte Zielposition dagegen bekommt anziehende Kräfte zugewiesen. Generiert man Bewegungsbefehle für den Roboter anhand der resultierenden Kräfte, so bewegt sich der Roboter im Idealfall mit maximalem Abstand zu den Hindernissen auf sein Ziel zu.

Seit der ersten Erwähnung wurde der Potenzialfeldansatz für immer mehr Anwendungen eingesetzt und angepasst, so auch bei der Positionierung von Sensoren und Sensornetzwerken. In (Howard, Matarić & Sukhatme, 2002) beispielsweise werden Potenzialfelder für die Positionierung von mobilen chemischen Sensoren eingesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Sensoren in der Lage sind, Hindernisse und andere Sensoren zu detektieren. Auch von den Sensoren werden Potenzialfelder erzeugt, um einen möglichst großen Abstand zwischen den Sensoren zu erreichen. Insgesamt wurden 100 Sensoren verwendet. Zusätzlich zu den Potentialkräften wurden Reibungskräfte eingeführt, die zu einer stabilen Endlage des Gesamtsystems führen sollen.

In (Poduri & Sukhatme, 2004) wurde der Potenzialfeldansatz für die Verteilung mobiler Sensoren in einem unbekannten Gebiet verwendet. Dabei ist eine Unterstützung der mobilen durch stationäre Sensoren möglich. Einsatzszenario waren Rettungseinsätze im Innenbereich ohne Zugriff auf GPS-Information und es wurden bis zu 64 Sensoren betrachtet.

(Wojciechowski, 2006a) führt zusätzlich zu den abstoßenden Kräften von Sensoren und Hindernissen noch anziehende Kräfte von Objekten von Interesse ein. Anwendungsfall war die Unterstützung von Benutzern bei der Steuerung von Kameras durch virtuelle Umgebungen. Durch die anziehenden Kräfte der interessanten Objekte wurde die Ausrichtung der Kameras gesteuert. Die Blickrichtung wurde somit von den Objekten angezogen, während die abstoßenden Kräfte verhinderten, dass die Kameras in Objekte gesteuert wurden. In (Wojciechowski, 2006b) wird noch explizit darauf eingegangen, dass das Wissen über die Potenzialfelder a priori bekannt ist, es sich also um eine rein statische Betrachtung handelt.

#### 3.3.3 Maximal-Breach Path Optimierung mit Voronoi-Diagrammen

Bei Voronoi-Diagrammen handelt es sich um eine der wichtigsten Datenstrukturen im Feld geometrischer Berechnungen. Eine ausführliche Untersuchung ist in (Aurenhammer, 1991) zu finden. Grundsätzlich beschreiben Voronoi-Diagramme äquidistante Grenzlinien zwischen Punkten. So besteht das Voronoi-Diagramm von zwei Punkten aus der Mittelsenkrechten der Verbindungsstrecke der beiden Punkte. Folgt man also den Linien eines Voronoi-Diagramms, so hält man immer den maximal möglichen Abstand zu allen Punkten ein, zu denen das Diagramm gehört.

Erzeugt man nun für die Sensoren eines Netzwerks das Voronoi-Diagramm, so erhält man mit den Linien des Diagramms die Wege, die am weitesten von allen Sensoren entfernt liegen. Für den Weg von einem Punkt I zu einem Punkt J durch das Sensornetzwerk kann man mit Hilfe der Graphentheorie den Pfad mit den maximal möglichen Werten ermitteln (Meguerdichian u.a., 2001). Dieser Pfad ist der sogenannte Maximal-Breach Path, also der Pfad, auf dem es am wahrscheinlichsten ist, von Sensoren unbemerkt von I nach J zu kommen. In (Meguerdichian u.a., 2001) und (Megerian u.a., 2005) wird die Berechnung des Maximum-Breach Path dazu genutzt, ein bestehendes Sensornetzwerk zu optimieren. Dies wird dadurch erreicht, dass weitere Sensoren auf den Teilsegmenten des Maximum-Breach Path mit den größten Abständen zu den Sensoren platziert werden. Experimente zeigen, dass bei einem Netzwerk von fünf Sensoren, im Schnitt die Qualität des Netzwerks durch derartiges Hinzufügen eines weiteren Sensors um 50% gesteigert werden kann. Bei 100 Sensoren kann durch einen weiteren Sensor noch eine Verbesserung um 10% erreicht werden.

Im Falle der zuvor betrachteten Arbeiten lassen sich die Ergebnisse nur auf Sensoren anwenden, die einen 360° Sichtbereich haben. Sensoren mit begrenztem Sichtfeld werden nicht berücksichtigt. Dieses Problem wird in (Adriaens, Megerian & Potkonjak, 2006) adressiert. Dort wird ein Algorithmus vorgestellt, der für die sogenannte Field of View (FOV) der Sensoren den Maximum-Breach Path identifiziert. Ein Optimierungsverfahren wurde allerdings nicht angewendet.

Eine weitere Möglichkeit der Optimierung von Sensornetzwerken mittels Voronoi-Diagrammen wird in (Cărbunar u.a., 2006) vorgestellt. Ziel ist die Identifizierung und Entfernung redundanter Sensoren in einem Netzwerk. Hierbei werden nicht die Kanten des resultierenden Voronoi-Diagramms, sondern die um die Sensoren entstehenden Sektoren zur Betrachtung herangezogen.

Generell kann festgehalten werden, dass Voronoi-Diagramme eine einfache Möglichkeit darstellen, die Qualität eines Sensornetzwerkes zu quantifizieren.

#### 3.3.4 Gridkarten

Mit Hilfe von Gridkarten werden stetige oder vektorielle in diskrete Probleme umgewandelt. Hierbei wird über eine reale Karte ein Raster gelegt. Jedem Feld des Rasters werden dann Informationen zugeordnet, z.B. ob in dem Feld ein Hindernis oder eine Umrandung liegt oder nicht (sog. Occupancy Grid). Durch Zusammenfassen von benachbarten Feldern gleicher Information können Suchund Berechnungsverfahren optimiert werden. Im Falle drahtloser Sensornetzwerke können mit Gridkarten die Bereiche identifiziert werden, die von den Sensoren abgedeckt sind bzw. abgedeckt werden müssen.

In (Chakrabarty u.a., 2001) werden Gridkarten genutzt, um den Auslöser von Alarmen in einem Sensornetzwerk gezielt zu lokalisieren. Ziel der vorgestellten Lösung ist es, jedes Feld der Gridkarte mit einer einzigartigen Kombination an Sensoren abzudecken. Anhand der Sensoren, die einen Alarm melden, kann dann auf das entsprechende Feld rückgeschlossen werden. In (Chakrabarty u.a., 2002) wird die Arbeit noch um die Betrachtung und Optimierung von Kosten erweitert. Da für den Ansatz eine Vielzahl überlappender Sensoren benötigt wird, steht die optimierte Abdeckung weniger im Vordergrund. Auch werden nur 360°-Sensoren verwendet.

Ebenfalls mit 360°-Sensoren aber mit einem Sensormodell, das von einer mit der Entfernung abnehmenden Detektionswahrscheinlichkeit ausgeht, beschäftigt sich (Dhillon, Chakrabarty & Iyengar, 2002). Es werden sowohl 2D- als auch 3D-Gridkarten betrachtet. Zunächst wird jedoch der Einsatz von Gridkarten für dieses Problem aufgrund hoher Berechnungskomplexität verworfen. In (Dhillon & Chakrabarty, 2003)wird dieser Ansatz wieder aufgegriffen und auf große Gelände angewendet. Hier werden sowohl Gelände- als auch Umgebungsinformationen in der Gridkarte berücksichtigt. Der Ansatz verwendet über 50 Sensoren und identifiziert die Lokalisierung der Sensoren als ein zentrales Problem.

In (Kung, Huang & Ku, 2008) werden zwei Methoden für die Ausbringung von Sensoren mittels Gridkarte explizit vorgestellt: Die Slow-Start Method (SSM) und die Square-Encircled Method (SEM). Beide Methoden werden bei unbekannter Umgebung angewendet und können mit Sensoren unterschiedlicher Reichweite umgehen. Bei SSM handelt es sich um einen einfachen, schrittweisen Explorations- und Positionieralgorithmus, der eine Gridkarte beginnend von links unten mit Über-wachungsquadraten füllt. Werden Hindernisse erkannt, werden die Quadrate sukzessive reduziert. Anhand der Größe der erkannten Quadrate werden Sensoren mit entsprechender Reichweite ausgewählt. Die SEM geht ähnlich vor. Hier werden die Quadrate mittels einer Zick-Zack-Suchmethode ermittelt.

In (Mattikalli u.a., 2007) werden vier verschiedene Ansätze zur Positionierung von Sensornetzwerken untersucht. Als Fazit werden alle Ansätze als zu komplex erachtet und die Verwendung von Gridkarten in Kombination mit heuristischen Verfahren als mögliche Lösung im Falle der Verwendung vieler Sensoren empfohlen. (Mattikalli u.a., 2007:918)

#### 3.4 Sensorsonden

Bei Sensorsonden handelt es sich um die Sensorknoten eines drahtlosen Sensornetzwerks, welches von einem Überwachungsroboter ausgebracht, verwaltet und verwendet wird. Die genaue Definition von Sensorsonden wird in Kapitel 2.1 gegeben. Nachfolgend werden mögliche Komponenten für

diese Sonden vom Sensor bis zur Energieversorgung dargelegt. Dies dient als Basis für die Analyse und Konzeption in den folgenden Kapiteln.

#### 3.4.1 Potentielle Sensoren zur Bestückung von Sensorsonden

Bei der Auswahl der Sensoren zur Bestückung von Sensorsonden kommen alle Arten in Frage, die auch in mobilen Überwachungsrobotern verwendet werden. Hierbei lassen sich die in Tabelle 3.1 dargestellten Gruppen und Untergruppen definieren.

Sensorgruppe	Untergruppen		
Bildgebende Sensoren	Farbkamera		
	Wärmebildkamera		
	Millimeterwellenkamera		
Akustische Sensoren	Mikrofon		
Bewegungsmeldende Sensoren	Passiv Infrarot Melder		
	Radarsensor		
	Ultraschallsensor		
	Laserscanner		
Beschleunigungssensoren	IMU		
Klimasensoren	Temperatursensor		
	Luftfeuchtesensor		
	Luftgütesensor		

 Tabelle 3.1:
 Sensorgruppen und Untergruppen zur Bestückung von Sensorsonden.

Die Gruppe der Klimasensoren dient nicht der Überwachung im sicherheitstechnischen Sinn. Vielmehr sind diese Sensoren zur Gewährleistung von Arbeits- und Lagerraumklima gedacht.

#### 3.4.2 Drahtlose Übertragungsformen

Die für die Verwendung von Sensorsonden notwendige drahtlose Übertragung von Daten kann aufgrund der Menge der Daten und der Sondenaufstellungen, welche meist keine direkte Sichtverbindung zulassen, nur mittels Funk realisiert werden. Es bleibt lediglich die Wahl eines geeigneten Kommunikationsprotokolls. Die bekanntesten Protokolle sind WLAN (IEEE 802.11a/b/g/n), Bluetooth, GPRS bzw. UMTS, UWB und ZigBee.

Auf die Entwicklung eines eigenen Protokolls wurde aus Zeit- und Kostengründen und der Tatsache, dass es bereits etablierte Kommunikationsprotokolle gibt, verzichtet. Eine Analyse der oben genannten Protokolle und die damit verbundene Auswahl des in dieser Arbeit verwendeten Protokolls sind in Kapitel 6.1.2 dargestellt. An dieser Stelle sei auf (Wietfeld, 2008) hingewiesen. Dieser Forschungsbericht gibt einen Überblick über die 2008 verfügbaren drahtlosen Übertragungsformen. Abbildung 3.1, aus (Wietfeld, 2008) entnommen, zeigt auf einen Blick die Einordnung der Übertragungsformen bezüglich ihrer Reichweite und des Datendurchsatzes.



#### Abbildung 3.1: Einordnung drahtloser Übertragungsprotokolle nach Reichweite und Datendurchsatz. (Wietfeld, 2008:3).

#### 3.4.3 Geeignete Schnittstellen zwischen Sensor und drahtloser Übertragung

Bei der Übertragung von Sensordaten, egal ob kabelgebunden oder drahtlos, müssen die Informationen im jeweiligen Übertragungsformat vorliegen. Einfache Sensoren wie Bewegungs- oder Feuermelder haben nur ein binäres, Temperatur- und Luftfeuchtemesser nur ein analoges Ausgangssignal. Diese Signale müssen über eine Schnittstelle für die Übertragung in das entsprechende Format umgewandelt werden. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten, von denen drei nachfolgend kurz beschrieben werden:

• Sensor mit Webserver:

Sensoren mit integriertem Webserver stellen bereits eine Ethernetschnittstelle zur Verfügung. Über diese können sie direkt in ein vorhandenes Netzwerk integriert werden und stellen dort ihre Daten zur Verfügung. Diese Variante kommt ohne zusätzliche externe Hardware oder Integrationsaufwand aus. Kameras und Laserscanner sind Beispiele für Sensoren, die mit Webserver verfügbar sind.

• Seriell/USB-zu-Ethernet-Umsetzer:

Verfügen die Sensoren über eine serielle oder USB-Schnittstelle, lassen sie sich mittels dieser Umsetzer in ein bestehendes Netzwerk integrieren. Der Aufwand besteht lediglich in der Schaltung des Umsetzers zwischen Sensor und Netzwerk. • Mikrocontroller:

Diese Module verfügen über analoge und digitale Eingänge. Bei einigen lassen sich mittels C++ Umrechnungen der Eingangsgrößen in andere Formate oder sogar erste Vorauswertungen durchführen. Sofern eine Ethernetschnittstelle integriert ist, lassen sich die Daten dann in einem Netzwerk verteilen. Der Aufwand besteht in der elektronischen und softwaretechnischen Integration.

Je nach verwendetem Sensor kann jede der vorgestellten Möglichkeiten in Frage kommen. Dabei gilt es abzuwägen, ob beispielsweise der Aufpreis für einen bereits mit Webserver ausgerüsteten Sensor über den Kosten für einen entsprechenden Umsetzer liegt oder nicht. Wenn mehrere Sensor ren verwendet werden, kann der Einsatz eines Mikrocontrollers kostengünstiger sein als individuelle Lösungen pro Sensor.

#### 3.4.4 Energieversorgung von Sensorsonden

Als Energieversorgung für Sensorsonden kommen mehrere Konzepte in Betracht. Die klassische Variante sind die Akkumulatoren. Durch die Verwendung unterschiedlicher Chemikalien und Elemente können heutzutage höhere Energie- und Leistungsdichten erreicht werden als beim Bleiakkumulator. Drei der am weitesten verbreiteten Akkumulatoren sind:

- Nickel-Metallhydrid-Akkumulator: Es handelt sich hierbei um den Nachfolger des Nickel-Cadmium-Akkumulators. Bei gleicher Baugröße wird durch die Verwendung einer Metalllegierung, welche Wasserstoffatome reversibel speichern kann, nicht nur eine fast doppelt so hohe Energiedichte erreicht, sondern es wird auch auf das giftige Schwermetall Cadmium verzichtet. Aufgeladen werden Nickel-Metallhydrid Akkumulatoren durch die Beaufschlagung mit konstantem Strom. Ladeelektroniken überwachen den Spannungsverlauf beim Laden und schalten nach Erreichen des Maximalwertes ab. Durch falsche Handhabung können diese Akkumulatoren überdurchschnittlich schnell altern.
- Lithium-Ionen-Akkumulator: Wie der Name schon sagt, handelt es sich hierbei um einen Akkumulator, der Lithium-Metalloxide zur Energiespeicherung einsetzt. Die Spannung einer Lithium-Zelle liegt mit 3,6 V etwa dreimal höher als bei Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren. Auch die Energiedichte ist höher, jedoch sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren nicht hochstromfähig. Die Aufladung muss immer nach dem zweistufigen IU-Verfahren, das heißt zunächst mit konstantem Strom und anschließend mit konstanter Spannung, erfolgen und macht somit eine aufwändige Ladeelektronik notwendig. Werden Lithium-Ionen-Akkumulatoren über- oder tiefentladen, besteht die Gefahr, dass sich ein Metallbrand entwickelt.
- Lithium-Polymer-Akkumulator: Hierbei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Lithium-Ionen Akkumulators. Das im Namen erwähnte Polymer kommt als Elektrolyt in fester oder gelartiger Form zum Einsatz. Bei diesen Akkumulatoren werden noch höhere Energiedichten und vor allem höhere Leistungsdichten realisiert als bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Bei der Verwendung und Aufladung sind sie jedoch ebenso empfindlich und somit auf meist integrierte Lade- und Überwachungselektroniken angewiesen. Der Einsatz dieser Technologie in der Mobilkommunikation hatte einen rapiden Preisverfall und einen enormen Entwicklungsschub zur Folge.

Für weiterführende Details zu den genannten Energiespeichern sei z.B. auf (Wiesspeiner, 2000) oder (Hannig, 2009) verwiesen. Neben den Energiespeichern sind auch Energiewandler zur Versorgung der Sonden denkbar. Allen voran stehen hier die Solarzellen und die Brennstoffzelle. Ein Vorteil von Solarzellen liegt darin, dass sie eine Sonde eine unbestimmte Zeit mit Energie versorgen können, sofern genügend Lichteinstrahlung gegeben ist, was wiederum ein Nachteil je nach Einsatzfall und -ort sein kann. Da die Lichteinstrahlung auch in kurzen Zeitabschnitten nicht als konstant angesehen werden kann, wird den Solarzellen für einen besseren Vergleich noch ein Kurzzeit-Energiespeicher beigefügt. Ob es sich hierbei um einen Akkumulator oder einen Kondensator handelt, wird zunächst nicht betrachtet.

Bei der Brennstoffzelle handelt es sich um einen Energiewandler, welcher die Reaktionsenergie von Redox-Reaktionen elektrisch nutzbar macht. Neben der Brennstoffzelle werden somit noch das Reduktions- und das Oxidationsmittel benötigt. Wird als Oxidationsmittel der Luftsauerstoff verwendet, muss also nur noch das Reduktionsmittel, auch als Brennstoff bezeichnet, mitgeführt werden. Ein entscheidender Vorteil dieser Technologie besteht im schnellen Aufladen bzw. Nachtanken. Während bei Akkumulatoren ein Ladevorgang mindestens eine Stunde dauert, kann ein Brennstofftank in Minuten oder sogar Sekunden befüllt werden. Der Tank wirkt sich allerdings negativ auf die Energiedichte aus. Die Stückzahlen für kommerzielle Brennstoffzellen sind noch zu niedrig, als dass die Herstellungskosten ähnlich wie bei Lithium-Polymer-Akkumulatoren gesunken wären oder die Technologie einen starken Entwicklungsschub erhalten hätte. Es gibt jedoch erste Versorgungssysteme für mobile Geräte, so dass diese Technologie bei der vorliegenden Konzeption (Kapitel 5) berücksichtigt wird.

## 4 Anforderungsanalyse

Das nachfolgende Kapitel befasst sich vorrangig mit der Anforderungsanalyse für die weitere Konzeption. In Kapitel 4.1 werden zunächst die Anforderungen an Sensorsonden basierend auf den in Kapitel 2.3.3 definierten Einsatzfällen hergeleitet. In Kapitel 4.2 werden analog dazu die Anforderungen an die Ausbringeinheiten und in Kapitel 4.3 die Anforderungen an die Ausbringstrategien abgeleitet.

#### 4.1 Anforderungen an Sensorsonden

Die Forderung nach flexibler Anpassung des Überwachungsbereichs, auf die in Kapitel 1.3 näher eingegangen wurde und die vom Einsatzbereich und den an die Überwachung gestellten Anforderungen abhängt, kann durch den Einsatz von sogenannten Sensorsonden erreicht werden. Nachfolgend werden grundlegende und weiterführende Anforderungen an Sensorsonden hergeleitet.

#### 4.1.1 Grundsätzliche Anforderungen

Aus der Aufstellung exemplarischer Einsatzfälle in Kapitel 2.3.1 und 2.3.2 lassen sich drei grundlegende Forderungen an Sensorsonden ableiten:

A1 Einfache Skalierbarkeit

Aufgrund der unterschiedlichen Größe der Einsatzfälle ist es erforderlich, dass sich der Sondeneinsatz ohne großen Aufwand beliebig skalieren lässt. Der Roboter muss in die Lage versetzt werden, auf eine beliebige Anzahl von Sonden zurückgreifen zu können. Da die Transportkapazität eines mobilen Roboters beschränkt ist, muss die Möglichkeit geschaffen werden, in einer Art Depot weitere Sensorsonden aufzunehmen.

A2 Kreuzweise Verwendung

Ein einzelner Roboter ist ab einer gewissen Größe und Komplexität des zu überwachenden Areals nicht mehr in der Lage, dies allein mit Sonden zu überwachen. Wenn weitere Roboter zum Einsatz kommen, kann die Effektivität der Überwachung dadurch entscheidend verbessert werden, wenn ein Roboter auch fremde Sonden verwenden und wieder aufladen kann. Dies ist jedoch nur durch eine einheitliche, von allen eingesetzten Robotern interpretierbare Markierung der Sonden mit allen relevanten Informationen möglich.

A3 Beliebige Konfigurierbarkeit

Die Vielzahl von zu überwachenden Größen kann nur durch ein breites Spektrum an einsetzbaren Sensoren abgedeckt werden. Die Sonden müssen derart konzipiert werden, dass sie mit einer Vielzahl verschiedener Sensoren bestückt werden können. Allerdings ist ein Kompromiss zwischen der Größe der Sonden und der Anzahl der, in dieser Größe verfügbaren Sensoren zu treffen. Gleiches gilt für die Dimensionierung der Energieversorgung und dem Bedarf des Sensors. Des Weiteren bedeutet die beliebige Konfigurierbarkeit auch, dass jeder Roboter mit beliebigen Sonden ausgerüstet werden kann. Dies ist bereits durch A2 abgedeckt. Die Natur der Einsatzfälle und die Tatsache, dass bereits mobile Roboter zur Überwachung eingesetzt werden, sowie die in Kapitel 1.3 geforderten Kosten werfen vier weitere entscheidende Forderungen auf:

#### A4 Robustheit

Die Risikofaktoren der Einsatzfälle stellen eine Anforderung an die Robustheit der Sonden. Einen Mehrwert stellen die Sensorsonden nur dar, wenn sie in ihrem Einsatz verlässlich operieren. Sie dürfen beispielsweise nicht bei geringen Störeinflüssen um- oder ausfallen.

A5 Outdoortauglichkeit

Wird auch in Kapitel 2.3.3 festgelegt, dass in dieser Arbeit lediglich Einsatzfälle im Innenbereich zur Evaluierung herangezogen werden, so muss an dieser Stelle der Vollständigkeit halber berücksichtigt werden, dass viele Einsatzfälle im Außenbereich liegen. Da jedoch eine Trennung zwischen Innen- und Außeneinsätzen möglich ist, kann diese Forderung abgeschwächt werden. Die Outdoortauglichkeit muss nur für Sonden gegeben sein, die im Außenbereich zum Einsatz kommen. Bei derartigen Einsätzen ist sie jedoch wegen Forderung A4 zwingend notwendig.

A6 Integrierbarkeit

Mobile Roboter werden bereits für Überwachungsaufgaben eingesetzt. Damit Sensorsonden auch für bestehende Sicherheitsroboter einen Mehrwert darstellen, müssen die mechanischen und elektrischen Komponenten, die zur Verwendung von Sonden benötigt werden, derart gewählt werden, dass sie sich möglichst einfach in bestehende Sicherheitsroboter integrieren lassen.

A7 Kostengünstig

Ein wichtiger Mehrwert bei der Verwendung der Sonden ist die kosteneffiziente Erweiterung des Überwachungsbereiches. Bei der Auswahl und Entwicklung von Lösungen sind daher immer die Kosten zu berücksichtigen, um den in Kapitel 1.3 geforderten Gesamtsystemkosten in Höhe von maximal 20% des Roboterpreises gerecht zu werden.

#### 4.1.2 Weiterführende Anforderungen

Alle weiteren Anforderungen an den Aufbau einer Sonde, wie zum Beispiel an die Größe, das Gewicht, die Laufzeit oder den weiteren mechanischen Aufbau, sollten sich nach den Anwendungen richten. Somit wird gewährleistet, dass grundsätzlich jeder beliebige Sensor bzw. jede beliebige Kombination von Sensoren in eine Sensorsonde integriert werden kann. Eine Sonde kann somit den gleichen stationären Überwachungsradius haben wie der dazugehörige Roboter. Es sei jedoch angemerkt, dass Nutzlast und Größe sowie handhabbares Volumen des Roboters als begrenzende Faktoren für diese Anforderungen berücksichtigt werden müssen.

Die Anforderung an die Kommunikationsschnittstelle beschränkt sich neben der Repeaterfunktion darauf, dass sie kompatibel zur Kommunikationsform des Roboters sein muss. Die Repeaterfunktion muss in der Lage sein, die Signale des Roboters und der anderen Sonden weiterzuleiten. Im Verbund ist darauf zu achten, dass dieses Weiterleiten sich der Anzahl der abgesetzten Sonden anpassen kann, um bei geringem Sondeneinsatz den Kommunikationsweg so gering wie möglich halten zu können.

Sämtliche Anforderungen an die Energieversorgung ergeben sich aus der jeweiligen Anwendung. Sowohl die Art der Versorgung (Batterie, Akku, Brennstoffzelle, etc.) als auch die sich ergebende Laufzeit hängen einzig von der angestrebten Anwendung ab. Als limitierender Faktor neben der Größe muss auch die maximale Ladeleistung der Schnittstelle zum Wiederaufladen berücksichtigt werden. Erreicht man bei der Auslegung dieses Limit, sollte man das optimale Verhältnis zwischen vorgehaltener Kapazität der Energieversorgung und benötigter Ladezeit verwenden.

Die Aufladeschnittstelle richtet sich nach dem Konzept der Aufnahme der Sonden durch den Roboter. Hierbei ist die Einheitlichkeit der Schnittstelle bei allen Sonden wichtig, um einen Roboter mit unterschiedlichen Sonden bestücken zu können.

Ebenso wie die Schnittstelle zum Wiederaufladen ist auch die mechanische Schnittstelle abhängig von der Aufnahme durch den Roboter. Auch sie muss einheitlich für alle Arten von Sonden sein.

#### 4.2 Anforderungen an Ausbringeinheiten

Damit ein mobiler Sicherheitsroboter Sensorsonden einsetzen kann, muss er über eine Ausbringeinheit verfügen. In dieser Einheit werden die Sonden transportiert und für den Einsatz bereitgehalten. Des Weiteren muss die Ausbringeinheit die Sonden an ihrem Einsatzort platzieren und sie nach dem Einsatz bzw. nach Ablauf der Betriebsdauer dort wieder aufnehmen können.

#### 4.2.1 Allgemeine Anforderungen

Die Ausbringeinheiten für Sonden sind den gleichen Bedingungen ausgesetzt wie die Sonden selbst. Daher treffen die Anforderungen A4 Robustheit, A5 Outdoortauglichkeit, A6 Integrierbarkeit und A7 Kostengünstig auch auf die Ausbringeinheiten zu. Die Anforderung A6 muss genauer spezifiziert werden:

A6.1 Schnell austauschbar

Die Verbindung zwischen Roboter und Ausbringeinheit muss derart geschaffen sein, dass es mit geringem Aufwand möglich ist, Ausbringeinheiten gegeneinander auszutauschen. Somit wird ein schnelles Umrüsten von einer Sondenkombination zu einer anderen ermöglicht. Diese Anforderung führt direkt zu den beiden folgenden.

A6.2 Definierte Schnittstelle

Um Ausbringeinheiten beliebig austauschen zu können, muss eine definierte Schnittstelle vorliegen. Dies betrifft den mechanischen und elektrischen Anschluss sowie das verwendete Kommunikationsprotokoll.

A6.3 Eigenständige Überwachung des Ausbring- bzw. Wiedereinholvorgangs

Die Ausbringeinheit muss alle Funktionsabläufe eigenständig überwachen können. Somit ist gewährleistet, dass sich der weitere Aufbau der Einheiten, wie zum Beispiel der verwendete Manipulator, voneinander unterscheiden kann, ohne der Forderung A6 entgegenzustehen.

#### 4.2.2 Mechanische Anforderungen

Damit die Ausbringeinheit die Sonden platzieren und wieder aufnehmen kann, muss sie über einen Manipulator verfügen. Der Endeffektor dieses Manipulators muss zur mechanischen Schnittstelle auf Seiten der Sonden passen. Des Weiteren müssen entweder der Endeffektor oder der Manipulator

derart ausgelegt sein, dass eine Ungenauigkeit in der Positionierung des Roboters beim Aufnehmen der Sonden ausgeglichen werden kann. Dieser Ausgleich ist in zwei Aufgaben unterteilt. Zum einen muss eine lösbare Verbindung zwischen Endeffektor und Sonde hergestellt werden. Zum anderen muss ein eventueller Offset zwischen Ausbring- und aktueller Position des Roboters während des Herstellens dieses Formschlusses kompensiert und vor dem Einziehen in das Magazin eliminiert werden. Letzteres ist notwendig, um Kollisionen zwischen Sonde und Magazin beim Einholen zu verhindern.

Eine weitere Anforderung ist der Ausgleich eventueller Verdrehungen der Sonde. Da die Sonden auch mit gerichteten Sensoren, wie zum Beispiel Kameras, ausgerüstet sein können, muss durch die Ausbringeinheit sichergestellt werden, dass die Sonden beim Ausbringen die gewünschte Orientierung haben. Diese muss entweder beim Aufnehmen, während des Transports oder beim Ausbringen überprüft und korrigiert werden.

Im Falle der Versorgung der Sonden über eine Brennstoffzelle oder einen ähnlichen, treibstoffabhängigen Energiewandler ist eine mechanische Schnittstelle vorzusehen, über welche der Sonde der Treibstoff sicher zugeführt werden kann.

#### 4.2.3 Elektrische Anforderungen

Handelt es sich bei der Energieversorgung einer Sensorsonde um einen elektrischen Energiespeicher, so muss dieser nach einem Einsatz wieder aufgeladen werden. Die Ausbringeinheit muss über eine der Ladeschnittstelle der Sonde entsprechende Schnittstelle verfügen. Hierbei ist auf Verpolungs- und Kurzschlussschutz zu achten. Sollte der Energiespeicher eine überwachende und regulierende Ladeelektronik benötigen, so ist abzuwägen, ob diese in der Ausbringeinheit oder direkt in der Sonde unterzubringen ist.

Sollten die Sonden gemäß der Forderung A2 Kreuzweise Verwendung mit einer Identifizierung versehen sein, muss die Ausbringeinheit über eine entsprechende Vorrichtung zum Auslesen dieser Informationen verfügen. Sollten auch variable Informationen gespeichert werden, wie zum Beispiel die Dauer des letzten Einsatzes, die Zahl der gesamten Einsätze oder die Anzahl der Ladezyklen des Energiespeichers, so muss diese Vorrichtung die Informationen auch schreiben bzw. löschen können.

#### 4.3 Ausbringstrategien

#### 4.3.1 Analyse der Hauptszenarien und abgeleitete Anforderungen

Der Mehrwert durch den Einsatz von Sensorsonden definiert sich nicht nur durch den Aufbau der Sonden und der Ausbringeinheit, sondern vor allem durch die Strategien, nach denen die Sonden ausgebracht werden. Diese Strategien geben die Gütekriterien für die Algorithmen vor, welche berechnen, wann und wo eine Sonde abgesetzt wird. Die Algorithmen sind dabei austauschbar, die Strategien hingegen müssen fest definiert werden. Es lassen sich vier Hauptszenarien unterscheiden, deren Wahl hauptsächlich von der Größe des zu überwachenden Bereichs, der Anzahl verfügbarer Sonden und dem gewünschten Überwachungsergebnis abhängt: S1 100% Abdeckung

Der zu überwachende Bereich soll zu 100% durch Sonden abgedeckt werden. Dies setzt eine beliebige Anzahl verfügbarer Sonden voraus. Dieses Szenario stellt einen Spezialfall des folgenden Szenarios dar.

S2 X% Abdeckung

Ein definierter Prozentsatz des Bereiches soll überwacht werden. Auch dieses Szenario setzt eine beliebige Sondenanzahl voraus. Ohne weitere Einschränkungen hängt der konkret überwachte Bereich vom Berechnungsergebnis des verwendeten Algorithmus ab und ist zufällig. Weitere Vorgaben sind somit sinnvoll.

S3 Maximale Abdeckung bei n Sonden

Anders als die Szenarien S1 und S2 setzt dieses Szenario keine unbegrenzte Anzahl von Sonden voraus. Im Gegensatz zu den vorangegangenen Szenarien wird hier eine vorgegebene Anzahl von Sonden zur Abdeckungsmaximierung des zu überwachenden Bereichs eingesetzt. Die Form des abgedeckten Bereiches ist auch bei diesem Szenario beliebig und benötigt für eine genauere Bestimmung weitere Vorgaben.

S4 Bestes Verhältnis von Sonden zu Abdeckung

Es soll die beste Nutzung der Sonden zur Überwachung eines Bereichs ermittelt werden. Anders als bei Szenario S3 kann es hier sinnvoll sein, eine oder mehrere Sonden nicht zur Überwachung einzusetzen und für weitere Aufgaben oder als Ersatz zurückzuhalten, wenn der Verlust an Abdeckung nur wenige Prozent betragen würde. Diesem Szenario kann eine beliebige oder feste Sondenanzahl vorgegeben werden. Auch hier ist der tatsächlich abgedeckte Bereich noch unbekannt.

Anders als bei Szenario S1 besteht für die drei weiteren Szenarien noch Bedarf an weiteren Vorgaben bzw. Einschränkungen. Durch folgende Erweiterungen können diese Szenarien genauer spezifiziert werden:

E1 Priorisierung von Bereichen

Um besonders empfindliche Bereiche, wie zum Beispiel Eingänge oder Flurkreuzungen, besser überwachen zu können, kann diesen eine höhere Überwachungspriorität zugeteilt werden. Somit wird sichergestellt, dass diese Bereiche im überwachten Areal liegen.

E2 Feste Sondenpositionen

Eine Verschärfung der Priorisierung wird durch fest vorgegebene Sondenpositionen erreicht. Somit kann gewährleistet werden, dass die Sonden nicht an erfahrungsgemäß ungünstigen Stellen abgesetzt werden, auch wenn das Überwachungsergebnis an diesen Stellen günstiger wäre.

E3 Sperrbereiche

Im Überwachungsareal müssen auch Sperrbereiche eingetragen werden können. Diese Bereiche sind dann aus der Überwachung ausgenommen. Da es unterschiedliche Gründe für die Ausklammerung eines Bereiches aus der Überwachung geben kann, muss es auch unterschiedliche Sperrbereiche geben. So kann es sinnvoll sein, einen Bereich für Kameraüberwachung zu sperren, ihn aber für die Überwachung durch Bewegungsmelder oder Gasdetektoren zugänglich zu machen. Unabhängig von den beschriebenen Einsatzszenarien und den möglichen Erweiterungen gibt es noch grundlegende Forderungen an die Algorithmen, welche die Sondenausbringung je nach Szenario berechnen:

F1 Flexibilität

Die Algorithmen sollten sich an jede beliebige Umgebung anpassen können. Gerade im Außenbereich sollte das Potenzial bestehen, dass später auch 3D-Informationen der Umgebung mit in die Berechnung einbezogen werden können.

F2 Schnelle Berechnung

Die Ablagepunkte für die Sonden sollten zeitnah berechnet werden können. Längere Wartezeiten stehen im Widerspruch zu einer zuverlässigen Überwachung.

F3 Einfache Skalierbarkeit

Die Algorithmen sollten bis zu einem gewissen Maße für beliebige Größen des zu überwachenden Bereichs sowie einer beliebigen Anzahl von Hindernissen und Sonden anwendbar sein. Darüber hinaus sollte idealerweise jeweils ein linearer Zusammenhang zwischen der Größe des Areals, der Anzahl von Hindernissen und Sonden und dem Aufwand der Berechnung herrschen.

F4 Interoperabilität

Die Algorithmen sollten Schnittstellen zu anderen Robotern vorsehen. Wenn mehr als ein Roboter ein Gelände überwachen soll, ist es notwendig, dass die Algorithmen aller Roboter im Verbund arbeiten, um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen.

#### 4.3.2 Analyse der verschiedenen Ausbringstrategien

In Kapitel 3.3 wurden vier mögliche Methoden zur Bestimmung der optimalen Sondenpositionen vorgestellt. Diese werden im Folgenden auf die Eignung bezüglich der in Kapitel 4.3.1 identifizierten Szenarien und Anforderungen untersucht.

Betrachtet man zunächst die optimale Positionierung einer bestimmten Anzahl von Sonden, also Hauptszenario S3 Maximale Abdeckung bei n Sonden, so muss bei den drei Optimierungsverfahren Gridmap, genetische Algorithmen und Potenzialfelder immer eine Anpassung auf die vorliegende Problemstellung vorgenommen werden. Lediglich die Maximal-Breach-Path-Optimierung mit Voronoi-Diagrammen ist bereits auf die optimale Positionierung einer vorgegebenen Anzahl von Sensoren ausgelegt. Dennoch sind alle vier Möglichkeiten für dieses Szenario gleichermaßen geeignet. Dank der möglichen Anpassung der Fitnessfunktion lassen sich die genetischen Algorithmen auch auf die anderen drei Szenarien anwenden. Gridkarten und Potenzialfelder lassen sich auch auf die Szenarien S1 100% Abdeckung und S2 X% Abdeckung gut anwenden. In letzterem Fall wird lediglich das jeweilige Abbruchkriterium für die Platzierung der Sonden angepasst.

Anders sieht es bei der Maximal-Breach-Path-Optimierung mit Voronoi-Diagrammen aus. Da diese nicht direkt die Abdeckung der Sonden optimiert, sondern vielmehr die Möglichkeiten reduziert und verschlechtert, die Sonden auf dem Weg durch ein Areal zu umgehen, arbeitet diese Methode nicht ausschließlich auf eine 100% Abdeckung hin und kann somit auch nicht für die Erreichung einer X% Abdeckung herangezogen werden.

Bezogen auf Szenario S4 Bestes Verhältnis von Sonden zu Abdeckung muss bei allen Methoden außer den genetischen Algorithmen ein iteratives Vorgehen gewählt werden. Szenario S3 muss mehrfach mit ansteigender Anzahl von Sonden ausgeführt werden. Durch den Vergleich der Ergebnisse lässt sich dann das beste Verhältnis bestimmen. Bei den genetischen Algorithmen können die Individuen mit einer variablen Anzahl von Chromosomen versehen und in die Fitnessfunktion das Verhältnis zwischen Chromosomenanzahl und Abdeckung mit aufgenommen werden.

Die szenarienunabhängige Forderung F1 Flexibilität lässt sich von allen Methoden erfüllen. Die implizierte Anforderung, später auch im Outdoorbereich mit 3D-Informationen der Umgebung zurechtkommen zu können, erfordert jedoch bei allen Methoden entsprechende Anpassungen, was die Flexibilität reduziert. Bei der Maximal-Breach-Path-Optimierung mit Voronoi-Diagrammen ist sogar ein anderer Ansatz notwendig. Zwar lassen sich Voronoi-Diagramme auch für drei Dimensionen berechnen, jedoch müssen Verdeckungen durch Gelände noch in die Betrachtung integriert werden.

Betrachtet man die Forderung A1 Einfache Skalierbarkeit, so muss der Einfluss der Flächenvergrößerung, der Vermehrung der Hindernisse und der Vermehrung der Sonden auf die Berechnungsdauer getrennt betrachtet werden. Der Vergleich ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

	Genetische Algorithmen	Potenzialfelder	Maximal- Breach Path Optimierung mit Voronoi- Diagrammen	Gridkarten
Vergrößerung der Fläche	Linearer	Linearer	Keine	Linearer
	Anstieg	Anstieg	Änderung	Anstieg
Vergrößerung der An-	Linearer	Linearer	unbekannt	Kaum
zahl von Hindernissen	Anstieg	Anstieg		Änderung
Vergrößerung der An-	Linearer	Linearer	Linearer	Linearer
zahl von Sonden	Anstieg	Anstieg	Anstieg	Anstieg

 

 Tabelle 4.1:
 Auswirkung der Vergrößerung der Fläche sowie der Anzahl von Hindernissen und Sonden auf die Berechnungskomplexität der untersuchten Methoden

Bezogen auf die Forderung F4 Interoperabilität lässt sich für alle Methoden festhalten, dass eine generelle Zerlegung der gesamten Karte und damit eine verteilte Berechnung grundsätzlich möglich sind. Da dies jedoch von keiner der Methoden direkt unterstützt wird, werden alle Methoden in diesem Fall neutral bewertet. Die Forderung F2 Schnelle Berechnung kann erst bewertet werden, wenn die Methoden auf das in dieser Arbeit beschriebene Problem angepasst wurden und wird daher an dieser Stelle nicht zur Bewertung herangezogen.

Die in Kapitel 4.3.1 in Zusammenhang mit den Szenarien S2, S3 und S4 genannten Erweiterungen E1 Priorisierung von Bereichen, E2 Feste Sondenpositionen und E3 Sperrbereiche können grundsätzlich von allen in Kapitel 3.3 beschriebenen Ausbringstrategien wie folgt erfüllt werden.

- Genetische Algorithmen

  - Feste Sondenpositionen werden als nicht mutierbare oder per Vererbung veränderbare Chromosomen mitgeführt. Somit werden sie zwar bei der Berechnung der Fitness der Individuen verwendet, jedoch nicht optimiert.
  - Analog zur Priorisierung wird die Abdeckung von Sperrbereichen in Karten mit einer Reduktion der Fitness bestraft. Die Höhe kann einheitlich gewählt werden oder ebenfalls mit einer Priorität versehen werden.
- Potenzialfelder
  - Durch eine Anpassung der Potenzialfeldfunktion höher priorisierter Bereiche kann dieser Forderung Rechnung getragen werden.
  - Fest vorgegebene Sondenpositionen werden von den Einflüssen der resultierenden Kräfte ausgenommen. Das eigene Potential wirkt jedoch auf die anderen Sonden.
  - Durch ein entsprechendes Potential, ähnlich wie dem von Hindernissen, können Sonden von Sperrbereichen ferngehalten werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass nicht nur die Position, sondern auch der Erfassungsbereich durch dieses Potential von den Sperrbereichen abgelenkt wird.
- Maximal-Breach-Path-Optimierung mit Voronoi-Diagrammen
  - In Bereichen höherer Priorisierung kann der für die Optimierung der Sondenpositionen geforderte Maximal-Breach-Path in Relation zur Priorisierung gesenkt werden. Es werden in höher priorisierten Bereichen also geringere Maximalabstände zu den Sensoren erlaubt.
  - Die festen Sondenpositionen werden in die Berechnung des Voronoi-Diagramms und der damit verbundenen Ermittlung des Maximal-Breach Paths mit eingebunden, ihre Position jedoch bei der anschließenden Optimierung nicht verändert.
  - Eine Sperrung von Bereichen ist mit dieser Methode nur möglich, wenn um diese eine Zone mit einer Ausdehnung entsprechend des geforderten maximalen Breach Paths gezogen wird. Hierdurch wird zwar sichergestellt, dass kein Sensor näher als diese Distanz an den Bereich herankommt, jedoch ist nicht gewährleistet, dass der Bereich nicht doch mit dem Randbereich eines Sensors erfasst wird. Darüber hinaus leidet die Überwachung des normal zu überwachenden Bereiches, der unter der ausgedehnten Zone um den Sperrbereich liegt.
- Gridkarten
  - Für Bereiche höherer Priorisierung kann ein separater Layer in die Gridkarte eingefügt werden. Es gilt zunächst, die Layer mit höchster Priorität zu behandeln. Die dadurch ermittelten Sensorpositionen sind in den niedrigeren Layern zu übernehmen, hier aber nicht zu verändern (siehe nächster Punkt).

- Die von feststehenden Sonden abgedeckten Bereiche sind ähnlich wie Hindernisse in der Gridkarte zu behandeln. Somit werden keine weiteren Sensoren in diesen Bereichen platziert und auch deren Erfassungsbereich wird mit dem der festen Sensoren kaum überlappen.
- Im Falle von Sperrbereichen sind diese wie Hindernisse in die Gridkarte einzutragen (siehe oben). Es ist jedoch Sorge zu tragen, dass die Optimierungsalgorithmen die Erfassungsbereiche nur an die Hindernisse angrenzen lassen und nicht mit diesen überlappen.

Da diese Forderungen generell von allen Methoden erfüllt werden können, werden diese nicht zur Bewertung herangezogen.

Es lässt sich festhalten, dass genetische Algorithmen und Gridkarten für die vorliegende Problemstellung geringfügig besser geeignet scheinen als Potenzialfelder und werden daher im Folgenden auf die Problemstellung angepasst. Das Ergebnis dieser Analyse ist übersichtlich in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

## Tabelle 4.2: Analyse der Eignung von Methoden zur Bestimmung optimaler Sondenpositionen hinsichtlich identifizierter Szenarien und Anforderungen

	Genetische Algorithmen Potenzialfelder Potenzialfelder Diagram		Maximal- Breach-Path- Optimierung mit Voronoi- Diagrammen	Gridkarten
S1 100% Abdeckung	++	++	-	++
S2 X% Abdeckung	++	++	-	++
S3 Maximale Abdeckung bei n Sonden	++	++	++	++
S4 Bestes Verhältnis von So nden zu Abdeckung	++	0	0	++
F1 Flexibilität	+	+	0	+
F2 Schnelle Berechnung	Erst nach Experimenten bewertbar.			
F3 Einfache Skalierbarkeit	+	+	+	+
F4 Interoperabilität	0	0	0	0

(--: sehr schlecht, -: schlecht, 0: mittel, +: gut, ++: sehr gut)

### 5 Konzeption

#### 5.1 Konzeption der Sensorsonden

Die Definition von Sensorsonden in Kapitel 2.1 nennt fünf Teilkomponenten:

- Sensor
- Kommunikationsschnittstelle mit Verstärkerfunktion
- Energieversorgung
- Schnittstelle zum Aufladen der Energieversorgung
- Mechanische Schnittstelle für die Aufnahme und den Transport durch Roboter

In Tabelle 5.1 sind die einzelnen Teilkomponenten mit den jeweils untersuchten Lösungskonzepten in einem Morphologischen Kasten zusammengefasst.

Sensorsonde							
Sensoren	bildge- bend	akustisch	bewe- gungsmel- dend	Erschütte- rung			
Drahtlose Übertragungsform	WLAN	Bluetooth	GPRS/ UMTS	UWB	ZigBee		
Funkprotokoll	AODV	DSR	OLSR	GPSR	TORA	B.A.T. M.A.N.	
Energieversorgung	Ni-Mh	Li-Ion	Li-Po	Solarzelle mit Speicher	Brenn- stoffzelle		
Schnittstelle		bes	stehend aus 4	Komponente	n:		
→ Lösbarer Kraftschluss	Flexible	er Greifer Konische Gegenstücke		legenstücke	Drehbares Trapezrohr		
$\rightarrow$ Offsetausgleich	Gleitlager	mit Federn	Gleitlager mit Federn auf Endanschlag		Gleitlager mit Schwerkraftrückstel- lung		
→ Verdrehungs- ausgleich	Sensor u	Sensor und Aktor		Sensorloser Verdrehungsausgleich			
→ Energietech. Schnittstelle	Stee	Stecker		Schleifkontakt		tion	

#### Kapitel 5 Konzeption

In Kapitel 3.4 wurde der Stand der Technik für die ersten vier Teilkomponenten (Sensoren, drahtlose Übertragungsform, Funkprotokoll, Energieversorgung) dargelegt. Der Abgleich mit den in Kapitel 4.1 gestellten Anforderungen an Sensorsonden wird in Kapitel 6.1 bei der Realisierung der Sensorsonden vorgenommen. Im Folgenden werden die Analyse und Konzeption der fünften Teilkomponente, nämlich der mechanischen und energietechnischen Schnittstelle, behandelt.

#### 5.1.1 Konzeption der Schnittstelle von Sensorsonden

Mechanische und energietechnische Schnittstellen lassen sich zwar getrennt voneinander untersuchen und konzipieren, jedoch besteht eine gewisse Abhängigkeit durch den Umstand, dass für eine Energieübertragung immer räumliche Voraussetzungen geschaffen werden müssen (z.B. Induktionsplatten in Position bringen), häufig sogar mechanischer Kontakt (z.B. Ladestecker, Schleifkontakte, etc.). Da die elektrischen Anforderungen in Kapitel 4.2.3 die energietechnische Schnittstelle kaum beeinflussen, die mechanischen Anforderungen in Kapitel 4.2.2 jedoch Auswirkungen auf die Auslegung der mechanischen Schnittstelle haben, wird diese zuerst betrachtet. Die energietechnische Schnittstelle wird dann der gewählten Lösung entsprechend konzipiert.

In Kapitel 4.2.2 wird ein Ausgleich der Positionierungenauigkeit des mobilen Roboters vor der Wiederaufnahme einer Sonde gefordert. Des Weiteren wird diese Anforderung in zwei Unteraufgaben gegliedert:

- Herstellung eines lösbaren Kraftschlusses trotz Positionierungenauigkeit
- Ausgleich des Offsets zwischen Ausbring- und aktueller Position während der Herstellung des Kraftschlusses und Rückstellung des Offsets vor dem Einholen der Sonde in das Magazin

Im Folgenden werden diese beiden Aufgaben getrennt voneinander betrachtet, obwohl zur Erfüllung der Anforderung beide Punkte realisiert werden müssen.

#### 5.1.2 Lösbarer Kraftschluss

Zur Herstellung des lösbaren Kraftschlusses trotz Positionierungenauigkeit werden unterschiedliche Ansätze diskutiert:

• Passiver, flexibler Greifer

Bei dieser Idee handelt es sich um einen mechanischen Greifer mit vier rechtwinklig zueinander angeordneten Greifarmen. Während des Schließvorgangs des Greifers (Abbildung 5.1, oben, 1.) sollte, ähnlich wie bei einem Differential, die Kraft vorrangig auf die Greifarme gelenkt werden, die den geringsten Widerstand haben. Sobald ein Greifarm Kontakt zum Objekt hat (Abbildung 5.1, oben, 2.), wird dieser gestoppt. Der Greifvorgang ist abgeschlossen, wenn alle Greifarme auf Widerstand gestoßen sind (Abbildung 5.1, oben, 3.). Der Kraftschluss wäre hergestellt.

• Magnet mit konischen Gegenstücken

Zur Herstellung eines Kraftschlusses kann eine Kombination aus Magnet und ferromagnetischem Gegenstück genutzt werden. Um diesen Kraftschluss lösbar zu gestalten, können Elektromagnete oder auch Haltemagnete eingesetzt werden. Damit die trotz Positionierungenauigkeit funktionieren, können einzelne oder zwei zueinander komplementäre Konen zum Einsatz kommen. In beiden Fällen sorgt die konische Form dafür, die Mittelachsen der Gegenstücke auf eine Achse zu bringen. Siehe auch Abbildung 5.1, unten links.

- Drehbares Rohr mit trapezförmigem Ausschnitt
  - Dieser Ansatz geht von einem Rohr aus, in dessen Mantelfläche ein trapezförmiger Ausschnitt derart eingebracht wird, dass die parallelen Seiten des Trapezes parallel zur Mittelachse des Rohres liegen. Betrachtet man eine im Raum feste, zur Rundung des Rohres tangential verlaufende Ebene, so ergibt der Ausschnitt eine Unterbrechung in der Berührungsstrecke zwischen Rohr und Betrachtungsebene. Wird nun das Rohr gedreht, so wird diese Unterbrechung je nach Drehrichtung länger oder kürzer. Wird als Gegenstück eine Kugel an einem Stab verwendet, deren Durchmesser geringfügig größer ist als die kleinste Unterbrechung im Rohr, so kann diese Kugel vom Rohr formschlüssig gehalten werden. Zur Aufnahme wird das Rohr mit der breitesten Unterbrechung nach unten auf die Kugel abgesenkt. Sobald die Kugel innerhalb des Rohres ist, wird das Rohr gedreht bis die kleinste Unterbrechung nach unten zeigt. Bei dieser Drehung wird der Stab, an dem die Kugel befestigt ist, an eine der Rohrausschnittskanten stoßen. Ist die Aufhängung des Rohres in horizontaler Richtung beweglich gelagert, bewegt sich das Rohr bei weiterer Drehung radial zum Stab. Siehe auch Abbildung 5.1, unten rechts.



# Abbildung 5.1: Prinzipskizzen zum lösbaren Kraftschluss trotz Positionierungenauigkeit – Oben: Flexibler Greifer, unten links: Konischer Ausgleich, unten rechts: Drehbares Rohr mit trapezförmigem Ausschnitt

Die diskutierten Ideen werden hinsichtlich der folgenden Punkte gegeneinander abgewägt:

- Realisierungsaufwand
- Verhältnis zwischen Größe und kompensierbarer Positionierungenauigkeit
- Komplexität des Vorgangs zur Herstellung und zum Lösen eines Kraftschlusses
- Flächigkeit des Kraftschlusses
- Robustheit

Der flexible Greifer hat das beste Verhältnis zwischen der eigenen Größe und der kompensierbaren Positionierungenauigkeit, da er die Greifarme über die eigene Grundfläche hinaus öffnen kann. Auch die Fläche zwischen Greifer und Sonde bei Kraftschluss ist ausreichend groß, so dass sich die Sonde auch bei Vibrationen nicht im Greifer bewegen kann. Der hohe Realisierungsaufwand fällt dagegen negativ ins Gewicht. Auch der komplexe Vorgang des Greifens und Loslassens ist ein Nachteil dieser Lösung.

Durch den zusätzlich benötigten Antrieb hat auch das drehbare Trapezrohr in dieser Kategorie keinen Vorteil. Auch beim Realisierungsaufwand und der Flächigkeit des Kraftschlusses hat das Trapezrohr keine Vorteile gegenüber den beiden anderen Lösungsideen. Einzig hinsichtlich Robustheit kann diese Idee mit den konischen Gegenstücken mithalten.

Die konischen Gegenstücke haben konstruktionsbedingt ein Verhältnis zwischen der eigenen Ausdehnung und der kompensierbaren Positionierungenauigkeit von maximal 1 zu 1. Allerdings werden der geringe Aufwand zur Realisierung und die Einfachheit der Herstellung und Lösung des Kraftschlusses von den anderen Lösungen nicht erreicht. Nur bei der Flächigkeit und der Robustheit kann jeweils eine der anderen Lösungen gleichziehen.

Das Ergebnis der Untersuchung ist in Tabelle 5.2 noch einmal kompakt dargestellt.

#### Tabelle 5.2: Gegenüberstellung verschiedener Varianten des lösbaren Kraftschlusses

	Flexibler Greifer	Magnet mit konischen Gegenstücken	Drehbares Trapezrohr
Aufwand		+	0
Größenverhältnis	++	0	-
Komplexität	0	++	0
Flächigkeit	+	+	-
Robustheit	0	+	+

(--: sehr schlecht, -: schlecht, 0: mittel, +: gut, ++: sehr gut)

Die Idee des flexiblen Greifers kommt aufgrund des hohen Realisierungsaufwandes nicht in die nähere Auswahl. Beim Vergleich zwischen dem Magnet mit konischen Gegenstücken und dem drehbaren Trapezrohr wird die erstere Idee aufgrund der Einfachheit, des geringen Realisierungsaufwandes und nicht zuletzt wegen der Flächigkeit des Kraftschlusses vorgezogen.

Für den optimalen Einsatz dieser Idee wird im Folgenden die beste Paarung konischer Gegenstücke untersucht. Als Gegenstücke kommen ein Konus, ein Zylinder, eine konische Bohrung und eine zylindrische Bohrung in Frage. Es ergeben sich drei mögliche Paarungen der Gegenstücke, sechs, wenn man die Positionen der Gegenstücke vertauscht. Diese sechs Paarungen, in Tabelle 5.3 dargestellt, werden genauer untersucht, um die optimale Paarung zu ermitteln.

	Sondenschnittstelle	Endeffektor		
Paarung 1	Konus	Konische Bohrung		
Paarung 2	Konische Bohrung	Konus		
Paarung 3	Zylinder	Konische Bohrung		
Paarung 4	Konische Bohrung	Zylinder		
Paarung 5	Konus	Gerade Bohrung		
Paarung 6	Gerade Bohrung	Konus		

 Tabelle 5.3:
 Untersuchte Paarungen konischer Gegenstücke

Für die einzelnen Paarungen sind noch konstruktive Einschränkungen zu beachten, um die Flächigkeit des Kraftschlusses zu gewährleisten. Für die Paarungen 1 und 2 gilt zu beachten, dass der Konus und die konische Bohrung die gleiche Steigung und den gleichen Durchmesser an der Deckelfläche aufweisen müssen. Ähnliches gilt bei den Paarungen 3 und 4. Hier muss der Zylinder den gleichen Durchmesser haben wie die Deckelfläche der konischen Bohrung. Wird diese Einschränkung nicht beachtet, so können die Gegenstücke auf dieser Fläche gegeneinander verschoben werden. Dann kann nicht gewährleistet werden, dass der Versatz vor dem Einholen der Sonde in das Magazin eliminiert werden kann. Nur bei eindeutig bekannter Position der Sonde relativ zum Endeffektor kann diese Vorgabe erreicht werden. Eine entsprechende Einschränkung existiert auch bei den Paarungen 5 und 6. Hier ist darauf zu achten, dass der Durchmesser der zylindrischen Bohrung dem Durchmesser der Basisfläche des Konus entspricht. Darüber hinaus sollte der Konus an der Basisfläche in einen kurzen Zylinder übergehen, da sonst die Gefahr der Verkantung besteht.

Die Untersuchungen mit allen sechs Paarungen haben ergeben, dass Paarungen mit einem konischen Teil ebenso gut funktionieren wie die Paarungen mit zwei konischen Teilen, wenn eine Verkippung der Teile senkrecht zur Bewegungsrichtung verhindert wird. Des Weiteren hängt die maximal kompensierbare Positionierungenauigkeit  $\Delta R$  von der Differenz der beiden Radien des äußeren und inneren Konus ab.

$$\Delta R = R_1 - R_2$$
 5-1

An dieser Stelle handelt es sich nur um einen Radius. Um die maximale, in x- und y-Richtung unabhängige Kompensation zu erhalten, muss der Wert noch durch  $\sqrt{2}$  geteilt werden. Daraus ergeben sich die maximalen Abweichungen in x- und y-Richtung, die von den konischen Gegenstücken kompensiert werden können zu:

$$\Delta x, \Delta y = \frac{\Delta R}{\sqrt{2}}$$
 5-2

Die untersuchte Paarung 4 führt zu dem Ansatz, den Zylinder am Endeffektor direkt als Magnet auszuführen. Diese Lösung wird in dieser Arbeit aufgrund ihrer mechanischen Einfachheit bevorzugt, was auch ein Kriterium für die Wahl der konischen Gegenstücke ist.

#### 5.1.3 Offsetausgleich

Schon während der Herstellung des lösbaren Kraftschlusses muss der Offset zwischen der Position der Roboters beim Absetzen und der beim Aufnehmen ausgeglichen werden. Nach dem Aufnehmen der Sonde vom Boden muss dieser Versatz dann eliminiert werden. Dies ist notwendig, um die Sonde exakt im Magazin zu positionieren. Bei der Realisierung dieser Funktionalität sind zwei Anforderungen zu berücksichtigen:

• Geringe Baugröße

Die Breite und Tiefe des Offsetausgleichs werden im Wesentlichen durch die Öffnung im Magazin, durch welche die Sonde ausgebracht und aufgenommen wird, beschränkt. Der Offsetausgleich muss diese Öffnung ebenfalls passieren können. In der Höhe sind weniger klare Beschränkungen gegeben. Es ist jedoch zu beachten, dass die Höhe des Offsetausgleichs zu der Strecke beiträgt, die der Manipulator zurücklegen muss, um eine Sonde abzusetzen oder aufzunehmen.

• Schwerpunktsunabhängige Funktion

Aufgrund der unterschiedlichen Bestückung der Sonden kann nicht sichergestellt werden, dass sich der Schwerpunkt einer Sonde mittig unter dem Angriffspunkt des Endeffektors befindet. Somit besteht die Möglichkeit, dass das Gewicht der Sonde ein Moment im Endeffektor induziert. Der Offsetausgleich darf in seiner Funktion nicht durch dieses Moment beeinträchtigt werden. Die Sonde muss trotzdem mittig und ohne Verkippung aus der Vertikalen in das Magazin eingeholt werden können.

Zur Erfüllung beider Anforderungen wurden drei Varianten betrachtet. Bei der ersten Variante werden zwei senkrecht zueinander angeordnete Gleitlagern verwendet, die durch Federn in einem mittigen Ruhezustand gehalten werden. Hierbei beträgt die horizontale Ausdehnung mindestens die auszugleichenden Abweichungen in x- und y-Richtung, jeweils zuzüglich der Länge des Gleitschlittens und einem eventuellen Zuschlag durch die Federn. Diese Lösung ist allerdings von einem optimal eingestellten Ruhezustand abhängig, was nicht ohne Zusatzaufwand über die gesamte Nutzungszeit der Federn gewährleistet werden kann.

Die zweite Variante nutzt einen mechanischen Anschlag, um einen Ruhezustand fest einzustellen. Solange die entsprechende Feder in der Lage ist, den Gleitschlitten bis zum Endanschlag zu drücken, kann diese Ruheposition als gesichert angesehen werden. Allerdings ermöglicht dieses Vorgehen nur eine einseitige Auslenkung aus dem Ruhezustand und nicht, wie im vorliegenden Fall notwendig, eine beidseitige. Abhilfe schafft hier die Verwendung von je einem Gleitlager für jede Richtung, also insgesamt vier. Diese identisch aufgebauten Gleitlager werden, jeweils rechtwinklig zueinander, übereinander angeordnet. Somit ist der mittige Ruhezustand gewährleistet. Das Prinzip der Anordnung ist in Abbildung 5.2 dargestellt.



# Abbildung 5.2: Prinzipskizze des Offsetausgleichs mit Gleitlagern und Rückstellfedern auf Endanschlag. Zentrierende Verbindungselemente (hier transparent dargestellt) sorgen für eine kompakte Bauform.

Die Verwendung von je zwei Gleitlagern für jede Richtung hat einen weiteren Vorteil. Die horizontale Baugröße kann reduziert werden. Das Gleitlager muss nur noch mindestens halb so lang sein, wie die auszugleichende Abweichung zuzüglich der Länge des Gleitschlittens, da ein Gleitlager nur noch in einer Richtung ausgleichen muss. Allerdings geht diese Baugrößenreduktion in der Horizontalen auf Kosten der Bauhöhe. Durch die Verwendung der doppelten Anzahl von Lagern verdoppelt sich auch die Bauhöhe. Um zu bestimmen, wann sich dennoch das Bauvolumen bei der Verwendung von vier Lagern verringert, müssen die Formeln für die Bauvolumina für zwei Lager  $V_2$  und vier Lager  $V_4$  in Abhängigkeit von der Höhe der Lager  $h_{GL}$ , der Länge der Lagerschlitten  $l_{GLS}$  und der auszugleichenden Abweichung  $\Delta x$  und  $\Delta y$  aufgestellt und gleichgesetzt werden.

$$V_2 = 2 * h_{GL} * (l_{GLS} + \Delta x) * (l_{GLS} + \Delta y)$$
 5-3

$$V_4 = 4 * h_{GL} * \left( l_{GLS} + \frac{\Delta x}{2} \right) * \left( l_{GLS} + \frac{\Delta y}{2} \right)$$
 5-4

Wird von einem quadratischen Ausgleich, d.h.  $\Delta x = \Delta y$  ausgegangen, wird eine Baugrößenreduktion erreicht, wenn folgender Zusammenhang gilt:

$$\Delta x \ge \sqrt{2} * l_{GLS}$$
 5-5

Die Länge des einzusetzenden Gleitlagers ist entsprechend zu wählen.

Die dritte Variante nutzt alternativ zur Rückstellung durch Federkraft der Variante 2 die Rückstellung durch Gravitation. Da diese nur in vertikaler Richtung wirkt, jedoch eine Kraft in horizontaler Richtung benötigt wird, ist der Einsatz von schiefen Ebenen erforderlich. Die in Abbildung 5.2 parallel angeordneten Gleitlager müssen mit einem Winkel  $\alpha_{GL}$  derart aus der Horizontalen gekippt werden, dass die Gravitation die Lager in ihre Ruheposition zieht. Dies ist für eine Richtung als Schnitt in Abbildung 5.3 dargestellt. Der minimale Verkippungswinkel  $\alpha_{GL,min}$  hängt vom Haftkoeffizient  $\mu_H$  der Lager ab.

$$\alpha_{GL,min} = \tan^{-1} \mu_H$$
 5-6



Abbildung 5.3: Offsetausgleich in eine Richtung mit Schwerkraftrückstellung (Schnittdarstellung). Links: Komponenten und Ruheposition, Mitte Links und Mitte Rechts: Bewegung bei unterschiedlichen Horizontalkräften, Rechts: Rückstellung beim Anheben.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Bauhöhe dieses Offsetausgleichs sich von  $4 * h_{GL}$ auf

$$4 * \left( h_{GL} * \cos \alpha_{GL,min} + \left( l_{GLS} + \frac{\Delta x}{2} \right) * \sin \alpha_{GL,min} \right)$$
 5-7

vergrößert.

Der Vorteil der Rückstellung mittels Federn liegt in der geringeren Bauhöhe, wohingegen die Rückstellung mittels Schwerkraft unabhängig von nachlassenden Federkräften ist. Ausschlaggebend für die dritte Variante ist, dass die benötigte Kraft zum Auslenken des Ausgleichselements anders als bei den Federvarianten unabhängig von der Rückstellkraft ist. Die zum Auslenken benötigte Kraft hängt vom Gewicht der Verbindungselemente ab und ist somit durch Materialwahl und Form beeinflussbar. Die Rückstellkraft wird zusätzlich durch das Gewicht der Sonde bestimmt und liegt somit immer über der Auslenkkraft. Es wird somit möglich, eine niedrige Auslenkkraft einzustellen, was die Gefahr des Umkippens der Sonde beim Ausgleichvorgang reduziert, ohne Gefahr zu laufen, dass die Kraft für die Rückstellung nicht mehr ausreicht, die Sonde in die Mittelposition zu bringen. Somit wird in dieser Arbeit die dritte Variante verwendet.

#### 5.1.4 Verdrehungsausgleich

Eine weitere Aufgabe für die Schnittstelle zwischen Sonde und Ausbringeinheit ist der Ausgleich von Verdrehungen. Die Mehrzahl von Sensoren, die für den Einsatz auf Sensorsonden in Frage kommen, hat einen Erfassungsbereich der kleiner als 360° ist. Aus diesem Grund wird in Kapitel 4.2.2 gefordert, dass die Sensorsonden spätestens vor dem Ausbringen ausgerichtet werden müssen. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Sonde in exakt derselben Ausrichtung aufgenommen werden kann, wie sie ausgesetzt wurde. Die Ausbringeinheit muss also in der Lage sein, die aktuelle Verdrehung zu korrigieren und die Sonde in die Vorzugsrichtung zu drehen.

Zur Realisierung dieser Aufgabe werden zwei Komponenten benötigt: Ein Vorrichtung, welche die gewünschte Position der Sonde erkennt und eine Vorrichtung, welche die Sonde bis in diese Position dreht. Eine einfache Vorrichtung zum Erkennen der gewünschten Position ist die Kombination einer Gabellichtschranke an der Ausbringeinheit und einer am mechanischen Interface der Sonde angebrachten Kerbe. Gabellichtschranke und Kerbe müssen derart zueinander angeordnet sein, dass die gewünschte Position genau dann erreicht ist, wenn der Lichtstrahl durch die Kerbe fällt. Ein einfacher Schrittmotor kann die Sonde dann nach dem Kraftschluss mit dem Endeffektor solange drehen, bis die Lichtschranke die Kerbe erkannt hat.

Um der Forderung A7 Kostengünstig gerecht zu werden, wurde in dieser Arbeit eine weitere Möglichkeit entwickelt, die sogar ganz ohne elektrischen Sensor und der damit verbundenen signaltechnischen Auswertung auskommt. Das Konzept ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Mechanisches Interface Sonde



Abbildung 5.4: Prinzipskizze eines sensorlosen Verdrehungsausgleichs

Bei diesem Konzept wird die gewünschte Vorzugsrichtung mechanisch gekennzeichnet. Ein Teil des Interfaces der Sonde wird als Zylinder ausgeführt. An einer Stelle wird der Zylinder um ein Kreissegment reduziert, so dass eine gerade Fläche entsteht. Der Drehantrieb wird mit einer zylindrischen Rolle verbunden. Diese wird zum Drehen der Sonde an den zylindrischen Teil des Interfaces gedrückt. Durch die Haftung zwischen der Rolle und dem Interface wird die Sonde durch den Drehantrieb so lange mitgedreht, bis die Abfräsung den weiteren Kontakt zwischen den beiden Teilen unterbindet. Das Interface muss derart angebracht werden, dass der Sensor der Sonde an diesem Punkt in die gewünschte Richtung zeigt.

Für den korrekten Betrieb eines Verdrehungsausgleichs nach dem vorgestellten Konzept müssen einige Voraussetzungen beachtet werden. Zunächst einmal gilt es, die Materialien der Rolle und des Interfaces derart zu wählen, dass ein möglichst hoher Haftkoeffizient erreicht wird. Sobald die Haftung in Gleitreibung übergeht, ist die Funktion nicht mehr gewährleistet. Des Weiteren muss der Drehantrieb auch im ungünstigsten Fall die Orientierung der Sonde wieder herstellen können. Da kein Sensor eingesetzt wird, um die korrekte Orientierung anzuzeigen, kann der Drehantrieb nicht bei tatsächlichem Erreichen dieser Orientierung abgeschaltet werden. Vielmehr muss der Drehantrieb mindestens

$$U = \frac{d_{Itf}}{d_R}$$
 5-8

Umdrehungen absolvieren, mit  $d_{Itf}$  als Durchmesser des Zylinders am Interface und  $d_R$  als Durchmesser der Rolle. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Sonde vor dem Abschalten des Drehantriebes korrekt ausgerichtet wurde.

Ein weiterer bei diesem Lösungsansatz zu beachtender Punkt ist der Öffnungswinkel  $\alpha_{KS}$  des abgefrästen Kreissegments. Dieser hängt folgendermaßen vom Radius des Zylinders am Interface  $r_{Itf}$ und der gewünschten Höhe des Kreissegmentes  $h_{KS}$  ab:

$$\alpha_{KS} = 2 * \cos^{-1} \left( 1 - \frac{h_{KS}}{r_{ltf}} \right)$$
 5-9

Durch das geforderte Anpressen der Rolle an das Interface, durch die Forderung, dass kein Kontakt bei der Abfräsung bestehen darf, sowie durch fertigungstechnische Toleranzen, kann  $h_{KS}$  nicht beliebig klein gewählt werden. Nimmt man einen Wert von  $h_{KS} = 1 mm$  bei einem Radius von  $r_{Itf} = 50 mm$ , ergibt sich bereits ein Öffnungswinkel  $\alpha_{KS}$  von knapp 23°. Im ungünstigsten Fall bedeutet dies, dass über den kompletten Öffnungswinkel  $\alpha_{KS}$  kein Kontakt zwischen dem Interface und der Rolle besteht. Somit wird die Sonde ohne weitere Vorkehrungen nur auf  $\pm \frac{\alpha_{KS}}{2}$  genau ausgerichtet.

Eine mögliche Vorkehrung, dennoch eine exakte Ausrichtung der Sonde zu erreichen, ist in Abbildung 5.5 dargestellt.



Abbildung 5.5: Erweiterter Verdrehungsausgleich (obere Hälfte) zur exakten Ausrichtung der Sonde. Untere Hälfte vgl. Abbildung 5.4.

Am zylindrischen Teil des mechanischen Interfaces der Sonde wird eine zweite Ebene eingerichtet. In dieser Ebene wird ebenfalls ein Kreissegment entnommen, allerdings gegenüber der Ausfräsung in der ersten Ebene. Gegenüber der Rolle des Drehantriebes wird ein federbelasteter Rahmen an das Interface der Sonde gedrückt. Sobald die Kante der Abtragung zum Berührungspunkt zwischen Rahmen und Interface wird, wirkt die Kraft  $F_R$ , mit der der Rahmen auf das Interface drückt, nicht mehr in Richtung des Mittelpunktes des Zylinders. Es entsteht vielmehr ein Abstand l zwischen der Wirkungslinie der Kraft und dem Mittelpunkt, was in einem Drehmoment  $M_R = F_R * l$  resultiert. Es ist darauf zu achten, dass dieses Moment und somit der Abstand l an dem Punkt, an dem keine Haftung zwischen der Rolle des Drehantriebes und dem Interface mehr besteht, bereits größer ist, als alle am Drehprozess beteiligten Haftungs- bzw. Gleitreibungskräfte. Dies kann dadurch erreicht werden, dass die Höhe des abgefrästen Kreissegmentes in der zweiten Ebene entsprechend größer ist, als die in der ersten Ebene. Da nicht alle Reibungskräfte exakt bestimmt werden können, muss dieser Wert empirisch ermittelt werden.

Im Vergleich zur erstgenannten Variante kommt der entwickelte passive Verdrehungsausgleich ohne Gabellichtschranke und Auswerteeinheit aus, was eine Kostenersparnis darstellt. Die Anpassungen am mechanischen Interface und am Magazin sind vom Aufwand und den Fertigungskosten her vergleichbar mit der Befestigung einer Lichtschranke und der passenden Kerbe. Aufgrund des Kostenvorteils wird im Weiteren der passive Verdrehungsausgleich verwendet.

#### 5.1.5 Elektrische Schnittstelle

Für die elektrische Schnittstelle kommen grundsätzlich folgende drei Möglichkeiten in Frage:

- Steckverbindung
- Schleifkontakt
- Induktion

Von den Kriterien aus Kapitel 4.1 ergeben A1, A2 und A3 gleiche Wertungen und werden somit nicht herangezogen. Bei Forderung A6 wird die Komplexität der Integration berücksichtigt. Hier ist es unumgänglich, die Integration auch auf Seiten der Ausbringeinheit zu betrachten. Das Ergebnis des Vergleichs ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

# Tabelle 5.4:Analyse von elektrischen Schnittstellen bezogen auf die Anforderungen an Sen-<br/>sorsonden

Elektrische Schnittstelle	Robustheit	Outdoor- tauglichkeit	Integrier- barkeit	Kostengünstig
Steckverbindung	+	+	0	++
Schleifkontakt	+	0	++	++
Induktion	++	++	0	

(--: sehr schlecht, -: schlecht, 0: mittel, +: gut, ++: sehr gut)

Da Forderung A5 nicht entscheidungsrelevant ist, überwiegen bei der Induktion die hohen Kosten und der Aufwand für die Integration. Bei den Steckverbindern wäre bei der Integration auf Seiten der Ausbringeinheit eine separate Kinematik zum Herstellen und Lösen der Verbindung notwendig. Um diesen Aufwand zu vermeiden, wurde die Lösung mit den Schleifkontakten gewählt.

#### 5.1.6 Bereitzustellende Informationen

Um die Forderung A2 Kreuzweise Verwendung erfüllen zu können, müssen die Sonden Informationen zur Verwendung bereitstellen. In diesen Informationen müssen mindestens enthalten sein:

- Art des Sensors mögliche Arten gemäß Kapitel 3.4.1
- Reichweite kann keine feste Reichweite angegeben werden, wie z.B. bei Kameras, wird eine Entfernung angegeben, bis zu der die Informationen für die gewählte Anwendung ausreichend sind. Ein Beispiel: Eine Kamera hat für die Anwendsung Gesichtserkennung eine geringere Reichweite als für Bewegungsdetektion.
- Blickwinkel blickwinkelunabhängige Sensoren werden mit 360° angegeben, sonst der reale Blickwinkel in horizontaler und vertikaler Richtung.
- Kapazität der Energieversorgung bei allen Formen der Energieversorgung ist hier die elektrische Kapazität in Amperestunden (Ah) anzugeben.
- Verbrauchswerte der Sonde gesamter Bedarf an elektrischer Energie inkl. möglicher Wandlungsverluste.
- Kommunikationsadresse eineindeutige Adresse zum Erreichen der jeweiligen Sonde.

Für den sofortigen Einsatz einer Sonde ist bei Vorhandensein auch die Restkapazität der Energieversorgung mit zu übertragen. Damit wird die Einsatzplanung vereinfacht. Bei der Realisierung der Bereitstellung dieser Informationen ist ebenfalls darauf zu achten, dass Forderung A1 Einfache Skalierbarkeit berücksichtigt wird.

Der bei digitaler Kodierung für diese Informationen erforderliche Speicherplatz hängt von der gewünschten Genauigkeit ab. Ein Beispiel hierfür ist in Tabelle 5.5 gegeben.

Tabelle 5.5: Beispiel zur erzielten Genauigkeit für Informationen der Sensorsonden inAbhängigkeit des verwendeten Speichers.

Information	Verwendeter Speicher	Erzielte Genauigkeit			
Art des Sensors	1 Byte	256 verschiedene Sensortypen			
Reichweite	1 Byte	0,1 m bis 25,5 m mit 0,1 m Auflösung			
Blickwinkel	2 Byte	$0^{\circ}$ bis 360° mit ~1,5° Auflösung, jeweils horizontal und vertikal			
Kapazität der Energieversorgung	1 Byte	100 mAh bis 25,6 Ah mit 100 mAh Auflösung			
Verbrauchswerte der Sonde	2 Byte	0,1 mA/h bis 6,5536 A/h mit 0,1 mA/h Auflösung			
Kommunikations- adresse	4 Byte	Voller Umfang der IPv4 Adressen			
Restkapazität der Energieversorgung	2 Byte	0 mA/h bis ~26,2 A/h mit 0,4 mA/h Auflösung			

Aus dem Beispiel in Tabelle 5.5 geht hervor, dass 13 Byte Speicher ausreichen, um die benötigten Sensorinformationen in der angegebenen Genauigkeit abzulegen.

## 5.1.7 Zusammenfassung der Konzeption der Sensorsonde

Für die mechanische Schnittstelle der Sensorsonden zur Ausbringeinheit werden konische Gegenstücke verwendet. Diese sorgen auch für die nötige Kraft beim Offsetausgleich durch die Gleitlagerlösung. Mittels der umlaufenden Nut, den gegenüberliegenden Abfräsungen und dem Federrahmen wird mit der Schnittstelle zusätzlich der Verdrehungsausgleich ermöglicht. Die energietechnische Schnittstelle wird über Schleifkontakte realisiert. Tabelle 5.6 zeigt in übersichtlicher Form die einzelnen Konzepte den jeweiligen Aufgaben der Schnittstelle zugeordnet.

Schnittstelle	Konzept
Lösbarer Kraftschluss	Konische Gegenstücke
Offsetausgleich	Gleitlager mit Schwerkraftrückstellung
Verdrehungsausgleich	Sensorloser Verdrehungsausgleich über Nut, gegenüberliegenden Abfräsungen und Federrahmen
Energietechnische Schnittstelle	Schleifkontakte

Tabelle 5.6: Konzepte für die Aufgaben der Schnittstelle der Sensorsonden.

# 5.2 Konzeption einer Ausbringeinheit

Ausbringeinheiten für Sensorsonden machen deren Gebrauch durch Überwachungsroboter überhaupt erst möglich. Dabei müssen die Ausbringeinheiten folgende Aufgaben übernehmen:

- Aufbewahren der Sonden
- Handhabung der Sonden zum Ausbringen und Einholen
- Identifikation der Sonden
- Kommunikation mit dem Überwachungsroboter

Kapitel 4.2 beschreibt die Anforderungen an die Ausbringeinheit. Forderung A6 wird genauer spezifiziert, da ein schneller Austausch möglich sein, eine definierte Schnittstelle vorliegen und eine Steuerung für interne Abläufe vorhanden sein muss. Letztendlich liegt immer eine Abhängigkeit zwischen Sonden- und Ausbringeinheitskonzept vor. Da die Sonden bereits in Kapitel 5.1 konzipiert wurden, stellt die Anpassung einer Ausbringeinheit an jenes Konzept eine Hauptforderung dar.

Tabelle 5.7 stellt die Ansätze für die Teilkomponenten einer Ausbringeinheit in einem Morphologischen Kasten dar. Im Folgenden werden diese Ansätze untersucht und eine den genannten Forderungen entsprechende Lösung konzipiert.

Ausbringeinheit				
Aufbewahrung	Sortierung	Chaotisch	Magazin	
	Anordnung horizontal	linear	rund	
	Anordnung vertikal	stehend	hängend	durchgängig
Handhabung		1DoF	2DoF	>2DoF
Identifikation		Barcode	RFID	Magnetstreifen
Steuerung		PC (separat)	μController	
Schnittstelle	Energie	Stecker	Schleifkontakt	Induktion
	Daten	WLAN	Ethernet	
	mechanisch	Schrauben	Dorn & Bolzen	

# 5.2.1 Aufbewahrung der Sonden

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten unterscheiden, die geordnete und die chaotische Aufbewahrung. Einen wichtigen Einfluss auf diese Wahl hat die Art des Handlings der Sonden. Wird z.B. eine Ausbringung gewählt, die mittels Vereinzelung und Dosierung ähnlich der Güterförderung funktioniert und ein Einbringen mittels Aufwälzen (Prinzip siehe Abbildung 5.6), kann eine chaotische Aufbewahrung eingesetzt werden.



Abbildung 5.6: Prinzip einer chaotischen Aufbewahrung mit Einholen per Aufwälzen und Ausbringung per Vereinzelung. Links: Draufsicht, Rechts: Seitenansicht

Allerdings erhöht sich bei der chaotischen Aufbewahrung der Aufwand für die Lokalisierung und das Greifen individueller Sonden für den Ausbringvorgang bzw. die Identifikation freier Stellen im Magazin für die Einlagerung eingeholter Sonden. Das in Abbildung 5.6 gezeigte Prinzip hat zudem den Nachteil, dass die Ausbringeinheit parallel zur Fahrtrichtung des Überwachungsroboters montiert werden muss, da die meisten Systeme über Differentialantrieb verfügen und daher die Ausbringeinheit nicht seitwärts verfahren können. Auch muss der Durchgang zum Heck des Roboters gewährleistet sein. Eine Integration in einen bestehenden Überwachungsroboter wäre daher mit erheblichem Aufwand verbunden und widerspricht somit der Forderung A6. Ein weiterer Nachteil bei der chaotischen Aufbewahrung liegt darin, dass die Sonden nicht unterschiedlich bestückt sein können, da ein gezieltes Ausbringen einer speziellen Sonde nicht möglich ist. Dies widerspricht der Forderung A3 an die Sonden.

Im Gegensatz zur chaotischen Aufbewahrung können bei einer geordneten Aufbewahrung einfache Magazine verwendet werden. Eine Handhabungseinheit kann die Sonden an definierten Positionen greifen und entsprechend auch wieder absetzen. Es können unterschiedliche Sonden verwendet werden und die Orientierung der Sonde ist bei der Entnahme aus dem Magazin die gleiche, wie nach dem Einsetzen. Es ist jedoch eine Kinematik vonnöten, welche die Sonden greifen und entlang einer Trajektorie zum Absetzpunkt befördern kann. Gleiches gilt in umgekehrter Reihenfolge für das Einholen.

Die Komplexität der Kinematik wird maßgeblich von der zu verfahrenden Trajektorie bestimmt. Sollen beliebige Punkte mit beliebiger Orientierung im dreidimensionalen Raum angefahren werden, benötigt man sechs Freiheitsgrade. Bei einer Nutzlast von ca. 1 kg bewegt man sich bei marktgängigen Lösungen über 20 000 €. Da dies der Forderung A7 Kostengünstig widerspricht, muss die Anzahl der Freiheitsgrade reduziert werden. Da bereits die Notwendigkeit einer Kinematik erläutert wurde, liegt die Mindestanzahl der Freiheitsgrade bei eins, was einer Bewegung auf einer Geraden, einem Kreis oder einer definierten Kulisse per Zwangsführung entspricht. Hierbei wird eine mögliche Bewegung des die Ausbringeinheit transportierenden Roboters nicht mitberücksichtigt. Eine Darstellung der Auswirkungen der Anzahl der Freiheitsgrade der Kinematik auf die Aufbewahrung der Sonden ist in Tabelle 5.8 gegeben. Der Vollständigkeit halber ist die chaotische Aufbewahrung mit aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die Einschränkung "Greifen benötigt Sensorik" nicht nur für sechs, sondern alle möglichen Freiheitsgrade gilt.

Freiheitsgrade	Chaotische Aufbewahrung	Magazine
6	Greifen benötigt Sensorik	Ohne Einschränkungen möglich
5	Ausbringeinheit darf nur in einer Richtung aus der Ausbringebene gekippt sein.	Ausbringeinheit darf nur in einer Richtung aus der Ausbringebene gekippt sein.
4	Ausbringeinheit muss parallel zur Ausbringebene sein.	Ausbringeinheit muss parallel zur Ausbringebene sein.
3	Verdrehung der Sonden kann nicht kompensiert werden.	-Verdrehung der Sonden kann nicht kompensiert werden. –oder– -Magazinpositionen können nur in einer Richtung angeordnet werden.
2	Nicht möglich	<ul> <li>-Verdrehung der Sonden kann nicht kompensiert werden.</li> <li>-und-</li> <li>- Magazinpositionen können nur in einer Richtung angeordnet werden.</li> </ul>
1	Nicht möglich	-jede Magazinposition benötigt eigene Kinematik -oder- -Magazinpositionen bewegen sich relativ zur Kinematik

 Tabelle 5.8:
 Auswirkung der kinematischen Freiheitsgrade auf die Sondenaufbewahrung.

Aus Kostengründen wird die Lösung mit einem Freiheitsgrad weiter verwendet. Wird für diesen Freiheitsgrad als Trajektorie eine Gerade gewählt, kommt zu den in Tabelle 5.8 aufgeführten Anforderungen noch eine weitere Einschränkung hinzu. Da die Sonden auf dem Boden abgesetzt werden sollen, können sie nicht wie sonst üblich von oben in das Magazin eingebracht werden. Die einfachste Alternative ist in diesem Fall, das Magazin von unten zu bestücken. Tabelle 5.8 zeigt, dass gewisse Zwangsbedingungen zwischen der Kinematik für das Handling und der Aufbewahrung bestehen, sobald die Komplexität der Kinematik reduziert wird. Eine direkte Trennung der Aufbewahrung und des Handlings ist somit nicht möglich, weshalb in Kapitel 5.2.1 und 5.2.2 unter anderem übergreifende Themen behandelt werden.

Auch wenn aus räumlichen Gründen die Anzahl von Sonden in einer Ausbringeinheit begrenzt ist, kommt eine eigene Kinematik je Magazinposition nicht in Frage. Eine Relativbewegung der Magazinpositionen kann in der Ebene mit zwei Antriebseinheiten realisiert werden, wohingegen ein Freiheitsgrad der Kinematik eine Antriebseinheit benötigt. Bei mehr als drei Sonden ist also die Relativbewegung mit einem geringeren Aufwand an Antriebseinheiten realisierbar. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es durchaus Möglichkeiten gibt, pro Magazinposition eine Kinematik zu verwenden, diese aber alle durch nur eine Antriebseinheit zu bewegen. Durch geschicktes Ein- und Auskoppeln der Antriebsbewegung können die Kinematiken der Magazinpositionen nacheinander oder sogar gezielt bewegt werden. Der mechanische Aufwand für eine derartige Lösung steht jedoch in keinem Verhältnis zur Einsparung von zwei Antriebseinheiten, vom erhöhten Verschleiß und Wartungsaufwand ganz zu schweigen. Wegen der Forderung A4 Robustheit wird daher auf die Weiterverfolgung einer derartigen Lösung verzichtet.

Bei der Relativbewegung der Magazinpositionen gibt es die Möglichkeit, sich in zwei oder nur in eine Richtung zu bewegen. Bei einer Richtung gelten die gleichen Möglichkeiten wie für die Trajektorie der Kinematik: Gerade, Kreis oder zwangsgeführte Kulisse. Dies reicht aus, um jede beliebige Magazinposition relativ zur Kinematik zu positionieren, wie für eine Gerade in Abbildung 5.7 und einen Kreis in Abbildung 5.8 exemplarisch dargestellt. Die Lösung mittels einer Zwangsführung über eine Kulisse wurde wegen des erhöhten mechanischen Aufwands nicht weiter untersucht.



Abbildung 5.7: Anordnung von Kinematik und Magazinpositionen bei geradliniger Anordnung.



Abbildung 5.8: Anordnung von Kinematik und Magazinpositionen bei kreisförmiger Anordnung.

Die Wahl, welche der Anordnungen favorisiert werden soll, hängt von der Anzahl der Sonden ab, die jeweils untergebracht werden können. Für die gradlinige Anordnung gilt für die maximale Anzahl von Sonden  $a_L$  bei der Länge der Anordnung L und der Breite einer Sonde b:

$$a_L \le \frac{L}{b}$$
 5-10

Für die Berechnung wird *b* herangezogen, unter der Annahme, dass  $b \le l$ , wobei *l* die Länge einer Sonde darstellt und  $l \le L$  gilt.

Für die Kreisanordnung gilt für die maximale Anzahl von Sonden  $a_K$  bei einem Innenradius der Anordnung  $r_i$  und der Breite einer Sonde b:

$$a_K \le \frac{2\pi r_i}{b}$$
 5-11

Weiter gilt:

$$r_i \le r_a - l \tag{5-12}$$

mit dem Außenradius der Anordnung  $r_a$ . Werden gleiche Größen der Anordnungen angenommen, gilt:

$$r_a = \frac{L}{2}$$
 5-13

Wird nun 5-13 in 5-12 und das Ergebnis in 5-11 eingesetzt, ergibt sich:

$$a_K \le \frac{2\pi \left(\frac{L}{2} - l\right)}{b}$$
 5-14

Zur Ermittlung, welche der Anordnungen am besten geeignet ist, wird 5-10 mit 5-14 gleichgesetzt.

$$\frac{L}{b} = \frac{2\pi \left(\frac{L}{2} - l\right)}{b}$$
 5-15

Formel 5-15 zeigt, dass die Breite der Sonden keinen Einfluss auf die Wahl hat. Wird die Gleichung nach *l* aufgelöst, ergibt sich:

$$l = \frac{\pi - 1}{2\pi} L$$
 5-16

Der *L* vorgelagerte Term ergibt gerundet 0,34. Es lässt sich also festhalten, dass die kreisförmige Anordnung mehr Sonden bevorraten kann als die gradlinige, wenn die Länge der Sonden 33% und weniger der Länge der Anordnung entspricht oder anders ausgedrückt, wenn mehr als zwei Sonden untergebracht werden müssen. Da die Forderung A1 Einfache Skalierbarkeit mit nur zwei Sonden in der Ausbringeinheit nicht realistisch umgesetzt werden kann, wird für den Demonstrator die kreisförmige Anordnung der Magazinpositionen gewählt. Die Relativbewegung zur Kinematik wird mittels eines Rotationsantriebs erzeugt.

Wie bereits oben festgelegt, werden die Sonden von unten in das Magazin eingebracht. An dieser Stelle stellt sich die Frage nach der Fixierung der Sonden gegen Herausfallen. Da dies von der verwendeten Kinematik abhängt, wird diese Frage im Folgenden mit behandelt.

## 5.2.2 Handhabung der Sonden

In Kapitel 5.2.1 wurde die Kinematik für die Handhabung der Sonden auf einen Freiheitsgrad mit linearer Bewegung festgelegt. Es liegt nahe, dass die Bewegung vertikal zur Fahrebene des Überwachungsroboters erfolgt, da schwerkraftbedingte Momente somit vermieden werden können. In Kapitel 5.1.2 wurde die Verwendung eines Zylinders und einer konischen Bohrung zum Ausgleich von Ungenauigkeiten in der Positionierung bei der Wiederaufnahme festgelegt. Dies impliziert eine vertikale Verbindung zwischen der Kinematik und der Sonde, was mit der gewählten Bewegungsrichtung der Kinematik übereinstimmt. Lediglich die vorab beschriebene Einbringung der Sonden in das Magazin von unten lässt sich nicht ohne Weiteres mit dieser Anordnung vereinbaren, da die Verbindung zwischen der Kinematik und der Sonde nach dem Einbringen wieder gelöst werden muss. Als Ansatz wird ein durchgängig offenes Magazin gewählt, wobei die einzelnen Magazinpositionen von der Kinematik durchdrungen werden können, wie in Abbildung 5.9 dargestellt.



# Abbildung 5.9: Prinzipskizze der Handhabung von Sensorsonden mit vertikaler Linearachse und kreisförmig angeordneten, durchgängig offenen Magazinpositionen.

Diese Anordnung bedingt, dass die Sonden in den durchgängig offenen Magazinpositionen gehalten werden, sobald die Verbindung mit der Kinematik gelöst wird. In Kapitel 5.1.4 bedient sich der erweiterte Verdrehungsausgleich eines federbelasteten Rahmens, welcher an die mechanische Schnittstelle der Sonde gedrückt wird. An der mechanischen Schnittstelle wird eine umlaufende Nut vorgesehen, in die sich der Rahmen als Gegenstück drücken kann. Auf der dem Rahmen gegenüberliegenden Seite wird für eine ebenfalls in die Nut passende Leiste gesorgt. Somit kann die Sonde durch Rahmen und Leiste in ihrer Magazinposition gehalten werden. Das in Kapitel 5.1.4 geforderte, ausgefräste Kreissegment muss zum Erhalt der Funktion des Verdrehungsausgleichs in diesem Fall innerhalb der Nut ausgefräst werden.

Soll die Sonde nun mittels der Kinematik ausgebracht werden, muss diese zunächst vom Rahmen freigegeben werden. Durch eine Linearbewegung entgegen der Federkraft kann der Rahmen vom mechanischen Interface der Sonde gelöst werden. An dieser Stelle ist allerdings darauf zu achten, dass die Sonde nicht auf der Leiste liegen bleibt, da das entstehende Kippmoment sonst die Sonde in der Magazinposition verkanten oder sie von der Kinematik abscheren könnte. Dies wird umgangen, indem Rahmen, Leiste und Nut als dreieckiges oder halbrundes Profil ausgeführt werden. Das Prinzip der gesamten Anordnung der Haltung der einzelnen Magazinpositionen ist in Abbildung 5.10 dargestellt.



## Abbildung 5.10: Prinzipskizze der Haltung der Sonden in den Magazinpositionen mittels Federrahmen und umlaufender Nut, sowie Öffnung per Linearantrieb.

Zur Einsparung von Antrieben werden noch zwei konstruktive Anpassungen vorgenommen. Zum einen wird zur Öffnung des Federrahmens insgesamt nur ein Antrieb eingesetzt. Da der Federrahmen lediglich in der Position unter der Handlingskinematik geöffnet werden muss, wird vorgesehen, dass in dieser Position ein einzelner Linearantrieb positioniert wird. Dieser ist vom Magazin entkoppelt und macht die Drehbewegung folglich nicht mit. Über eine eigene federbasierte Rückstellung wird die Achse dieses Antriebs beim Schließen des Federrahmens immer so weit zurückgezogen, dass der Federrahmen der aktuell unter der Handlingskinematik befindlichen Magazinposition problemlos weggedreht und der der nächsten Magazinposition in Position gedreht werden kann.

Zum anderen ist in Kapitel 5.1.4 ein Drehantrieb zum Drehen der Sonde bis zum Einrasten des Federrahmens in das ausgefräste Kreissegment in der Nut vorgesehen. Auf diesen Drehantrieb kann mit einer einfachen Anpassung vollständig verzichtet werden. Hierzu wird auf den Aufbau des kreisförmig angeordneten Magazins ein Teilkreis befestigt, der sich nicht mit dem Magazin drehen kann. Der Radius des Teilkreises wird derart bemessen, dass die mechanische Schnittstelle der Sonden den Teilkreis berührt, wenn das Magazin die Sonde daran vorbeidreht. Die in Kapitel 5.1.4 geforderte Reibung wird durch ein Ineinandergreifen von zwei Zahnriemen ersetzt, wobei der eine in eine zusätzliche Nut oberhalb der ersten Nut im mechanischen Interface der Sonde eingesetzt und der andere auf dem Teilkreis angebracht wird. Die Funktion des in Kapitel 5.1.4 beschriebenen entfernten Kreissegments wird durch eine Unterbrechung des Zahnriemens der Sonde an gleicher Stelle erreicht.

Dreht sich nun das Magazin, um eine weitere Sonde abzusetzen, wird eine gerade aufgenommene Sonde, deren Orientierung höchst wahrscheinlich nicht mit der Wunschorientierung beim nächsten Absetzen übereinstimmt, in Richtung des Teilkreises bewegt. Ab einem bestimmten Punkt greifen nun der Zahnriemen des Teilkreises und der Sonde ineinander und verursachen bei weiterer Drehung des Magazins eine Drehung der Sonde um ihre Achse. Diese Drehung führt sich so lange fort, bis die Unterbrechung im Zahnriemen der Sonde erreicht wird und somit kein Formschluss zwischen Sonde und Teilkreis mehr vorliegt. Wird die Unterbrechung genau in Blickrichtung der Sonde gewählt, zeigt die Sonde nach diesem Prozess in die Mitte des Magazins. Dank des Federrahmens und der oben beschriebenen Ausfräsung in der unteren Nut, bleibt die Sonde in dieser Orientierung, bis sie wieder unter der Ausbringeinheit positioniert wird. Das Prinzip dieser Anordnung und des Ablaufs ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

Das beschriebene Verfahren funktioniert nur, wenn das Magazin ausschließlich in eine Richtung gedreht wird. Auch muss eine Sonde, bevor sie erneut ausgebracht werden kann, mindestens eine Drehung im Magazin mitgemacht haben, damit die Orientierung vor dem Ausbringen sichergestellt ist. Trotz dieser Randbedingungen ist die Funktionsweise der Ausbringeinheit nicht eingeschränkt.



Abbildung 5.11: Prinzipskizze des automatischen Verdrehungsausgleichs ohne zusätzlichen Antrieb. Links: Draufsicht und schrittweiser Ablauf; Rechts: Anordnung der zusätzlichen Nut mit Zahnriemen.

# 5.2.3 Identifikation der Sensorsonden

In Kapitel 4.2.3 wird gefordert, dass die Ausbringeinheit die von den Sensorsonden bereitzustellenden Informationen (Kapitel 5.1.6) auszulesen vermag. Da es sich um relativ wenig Informationen handelt, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, diese Daten zu speichern: Zentral und dezentral. Bei der zentralen Speicherung werden die Informationen über die Sonden in einer Datenbank abgelegt. Über eine eindeutige Identifikation (ID) der jeweiligen Sonde kann die Ausbringeinheit und somit auch der Überwachungsroboter die Informationen aus der Datenbank abrufen. Bei der dezentralen Speicherung liegen die Informationen direkt auf der Sonde vor. Die Ausbringeinheit kann diese dann direkt von der Sonde abrufen und an den Roboter weitergeben. Wird im zentralen Fall eine weitere Sonde hinzugefügt, muss deren ID mit allen relevanten Informationen der Datenbank hinzugefügt werden. Im dezentralen Fall wird nur der Speicher der Sonde mit deren Daten versehen. Eine Änderung an sonstiger Peripherie ist nicht erforderlich. Dies vereinfacht die Erfüllung von Forderung A1 Einfache Skalierbarkeit. Da darüber hinaus die zentrale Datenbank wegfällt, wird die dezentrale Speicherung für den Demonstrator gewählt.

Hierfür werden vier Varianten betrachtet:

- Barcode
- RFID, aktiv und passiv
- Magnetstreifen
- Netzwerk

Sollte die Sensorsonde mit einer programmierbaren Schnittstelle wie einem Mikrocontroller aus Kapitel 3.4.3 ausgestattet sein, wäre es möglich, dass diese Schnittstelle die Informationen über das Netzwerk an die Ausbringeinheit sendet. Damit dies nur auf Anfrage geschieht, muss dieser Vorgang von der Ausbringeinheit initiiert werden können. Um gleichzeitig die Positionsbestimmung innerhalb des Magazins zu ermöglichen, muss dies durch einen externen Schalter geschehen. Diese Variante verursacht zwar einen höheren Integrationsaufwand, jedoch wird keine weitere Hardware benötigt und somit Kosten gespart. Ein Nachteil dieser Variante ist, dass die Sonde zum Senden der Informationen Energie benötigt. Anders als die zuvor genannten Varianten kann eine Sonde ohne Strom somit nicht mehr identifiziert werden.

Die in Kapitel 5.1.6 identifizierten 13 Byte für die benötigte Speicherkapazität können von allen Varianten zur Verfügung gestellt werden. Aus den Forderungen A4 Robustheit und A5 Outdoortauglich kann abgeleitet werden, dass die gewählte Variante Verschmutzung oder geringen Informationsverlust toleriert. Eine berührungslose Variante wäre somit von Vorteil, was den Magnetstreifen ausschließt. Wird die in Kapitel 5.1.6 gewünschte Information des aktuellen Ladezustandes hinzugenommen, müssen die Informationen nicht nur gelesen, sondern auch geschrieben werden. Damit fällt die Variante mit Barcode weg. Da die Sonden auch identifiziert werden müssen, wenn die Energieversorgung nicht mehr gewährleistet ist, wird die Variante der Informationsübertragung per Netzwerk ebenfalls nicht für den Demonstrator verwendet. Bei der verbleibenden Variante RFID verursachen aktive Transponder Mehrkosten, bringen in der vorliegenden Arbeit aber keinen Mehrnutzen. Aus diesen Gründen wird die Lösung mit passiven RFID Transpondern für den Aufbau des Demonstrators gewählt.

# 5.2.4 Steuerung der Ausbringeinheit

Um die vorab beschriebenen Funktionen nutzen zu können, wird für die Ausbringeinheit eine Steuerung benötigt. Diese muss sowohl den Ablauf des Ausbringens und Einholens koordinieren, als auch mit dem Überwachungsroboter kommunizieren. Abbildung 5.12 zeigt das Ablaufdiagramm für einen Ausbring-, Abbildung 5.13 für einen Einholvorgang. Anhand dieser Ablaufdiagramme lassen sich benötigte Eingangsgrößen und somit fehlende Sensoren ableiten.



Abbildung 5.12: Ablaufdiagramm des Ausbringvorgangs einer Sonde.



## Abbildung 5.13: Ablaufdiagramm des Einholvorgangs einer Sonde.

Anhand der bedingten Verzweigungen in den Ablaufdiagrammen wird ersichtlich, dass folgende Sensoren erforderlich sind:

- Positionssensor für Magazin
- Kontaktsensor zwischen Kinematik und Hindernis (Boden)
- Kontaktsensor zwischen Kinematik und Sonde

- Endlagesensor für Kinematik
- Lagesensor für Sonde in Magazinposition

Alle Sensoren lassen sich als binäre Sensoren auslegen, womit die Steuerung über mindestens 5 digitale Eingänge verfügen muss. Ebenfalls aus den Ablaufdiagrammen gehen die benötigten Aktoren und damit die Ausgänge der Steuerung hervor:

- Ansteuerung der Kinematik
- Richtungswahl der Kinematik
- Ansteuerung des Drehantriebs im Magazin
- Ansteuerung der Linearbewegung des Federrahmens
- Aktivierung der Magnetabschaltung

Auch diese fünf Ausgänge können binär ausgeführt werden, womit die Steuerung über mindestens 5 digitale Ausgänge verfügen muss. Da die zu koordinierenden Abläufe nicht rechenintensiv sind, wird ein Mikrocontroller als Steuerung verwendet.

## 5.2.5 Schnittstelle zum Überwachungsroboter

Da die Ausbringeinheit selbst nicht fortbewegungsfähig ist, wird sie immer in Kombination mit einem Überwachungsroboter eingesetzt werden. Hierzu muss eine Schnittstelle vorgesehen werden, die zum einen die mechanische Verbindung zwischen Ausbringeinheit und Roboter herstellt, zum anderen die benötigte Energie und Daten überträgt. Bei der Auslegung der Schnittstelle ist Forderung A6 zu berücksichtigen. Zum einen dürfen keine großen Änderungen am Überwachungsroboter notwendig werden, zum anderen muss die Ausbringeinheit leicht montierbar und wieder lösbar sein.

Bei der Untersuchung möglicher Varianten sei auf Kapitel 5.1.5 verwiesen, in dem die Energieübertragung für die Sensorsonden konzipiert wird. Bei der Energieübertragung werden Schleifkontakte gewählt, da das automatische Herstellen von Steckverbindungen einen höheren Integrationsaufwand bedeuten würde. Da die Steckverbindung im Falle der Montage der Ausbringeinheit auf einem Überwachungsroboter manuell hergestellt werden kann, wird diese Variante aufgrund der geringeren Anfälligkeit gegen Verschmutzung den Schleifkontakten vorgezogen.

Bei der Übertragung von Daten wäre es möglich, genau wie bei den Sonden WLAN einzusetzen (siehe Kapitel 6.1.2), da dies bereits auf dem Roboter vorhanden ist. Da jedoch kein dringender Bedarf an kabelloser Kommunikation besteht und für die Ausbringeinheit bisher kein WLAN vorgesehen war, wird auch hier die Steckverbindung für den Demonstrator gewählt. Als physikalische Schnittstelle wird Ethernet, als Protokoll TCP/IP verwendet, da dieses sowohl auf dem Roboter als auch in der Steuerung der Ausbringeinheit bereits vorhanden ist.

Die zwischen Ausbringeinheit und Überwachungsroboter zu übertragenden Daten hängen von der in Kapitel 5.2.4 konzipierten Steuerung der Ausbringeinheit ab. Aus den Ablaufdiagrammen in Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 ist ersichtlich, dass der Roboter lediglich das Kommando zum Ausbringen oder zum Einholen einer Sonde gibt. Die Ausbringeinheit auf der anderen Seite vermeldet die erfolgreiche Ausführung bzw. das Scheitern an den Roboter zurück. Da nicht auszuschließen ist, dass der geforderte Vorgang unvorhergesehen unterbrochen wird oder in einen unbekannten Fehlerzustand gerät, wird von der Ausbringeinheit auch noch der Status über den aktuellen Zustand an den Überwachungsroboter übertragen. Mittels definierbarer Time-Outs kann dessen Steuerung dann eine unvorhergesehene Unterbrechung identifizieren und eine entsprechende Fehlermeldung protokollieren und ggf. an einen Bediener weiterleiten.

Für die mechanische Schnittstelle wird eine Kombination aus einem Dorn mit eingefräster Nut und abgeschrägten, federbelasteten Verriegelungsbolzen gewählt. Diese mechanische Schnittstelle ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Die beschriebene Kombination bringt mehrere Vorteile. Zum einen fungiert der Dorn gleichzeitig als Zentrierung für die Ausbringeinheit. Somit ist der korrekte Sitz relativ zum Überwachungsroboter gewährleistet und schnell hergestellt. Des Weiteren ist die Anordnung selbstverriegelnd. Wird die Ausbringeinheit auf dem Roboter platziert, rasten die Verriegelungsbolzen dank der Schwerkraft selbsttätig ein. Zu guter Letzt beschränkt sich der Anpassungsaufwand am Überwachungsroboter auf die Anbringung des Zentrier- und Haltedorns. Alle beweglichen Teile sind in die Ausbringeinheit integriert.



Abbildung 5.14: Mechanische Schnittstelle zwischen Ausbringeinheit und Roboter. Links: Verriegelter Zustand, Rechts: Abhebevorgang.

## 5.2.6 Zusammenfassung der Konzeption einer Ausbringeinheit

Bezugnehmend auf die in Kapitel 5.2 genannten Aufgaben von Ausbringeinheiten lässt sich deren Konzeption für die vorliegende Arbeit wie folgt zusammenfassen: Die Sonden werden in einem Magazin aufbewahrt. Die einzelnen Magazinpositionen werden kreisförmig angeordnet und von unten beladen. Sie können auf einer Kreisbahn relativ zur Kinematik für die Handhabung positioniert werden und sind von der Kinematik durchdringbar. Als Handhabungskinematik wird eine Linearachse verwendet, welche die Sonden von oben greifen und nach unten durch das Magazin absetzen kann. Gehalten werden die Sonden mittels in die einzelnen Magazinpositionen eingebauten Federrahmen, die sich in eine Nut in der mechanischen Schnittstelle der Sonden drücken und somit einen Formschluss herstellen. Der Verdrehungsausgleich der Sonden innerhalb des Magazins erfolgt über einen mit Zahnriemen bestückten Teilkreis, an denen sich die Sonden abrollen, bis sie in die Mitte des Magazins ausgerichtet sind. Bei der Drehung des Magazins werden diese an einem RFID-Lesegerät vorbeigeführt. Dadurch werden die Sonden identifiziert. Die Aufgabe "Kommunikation" wurde durch Steuerung und Schnittstelle zum Überwachungsroboter nochmals unterteilt. Die Steuerung der Ausbringeinheit wird von einem Mikrocontroller übernommen. Die entsprechenden Ablaufprogramme für Ausbringen und Einholen werden in C++ realisiert. Über eine Ethernetschnittstelle kann die Steuerung des Überwachungsroboters diese Funktionen aktivieren. Als mechanische Schnittstelle zum Roboter wird die Kombination aus Zentrier- und Haltedorn und Bohrung mit Haltebolzen verwendet. Tabelle 6.6 zeigt in übersichtlicher Form die einzelnen Konzepte zu den jeweiligen Aufgaben.

Aufgabe	Konzept		
Aufbewahren der Sonden	Magazin: Kreisförmig angeordnet, von unten be- laden, relativ zur Kinematik bewegbar und von der Kinematik durchdringbar.		
Handling der Sonden zum Ausbringen und	Linearachse zum Bewegen, Federrahmen in den Magazinpositionen zum Halten.		
Einholen	Verdrehungsausgleich mit Teilkreis zum Abrollen und Zahnriemen mit Aussparung.		
Identifikation der Sonden	RFID-Lesegerät und passive, beschreibbare Tags.		
Steuerung	Mikrocontroller mit C++ Ablaufprogramm, Be- fehle von Überwachungsroboter abrufbar.		
	Ethernet zur Datenübertragung.		
Schnittstelle zum Überwachungsroboter	Stecker für Energieversorgung.		
	Zentrier- und Haltedorn mit Verriegelungsbolzen.		

 Tabelle 5.9:
 Konzepte f
 ür die Teilkomponenten der Ausbringeinheit.

Nachfolgend ist in Tabelle 5.10 noch einmal der Morphologische Kasten zur Konzeption der Ausbringeinheit gezeigt, wobei die letztlich verwendeten Lösungsansätze der einzelnen Teilkomponenten zur Realisierung der Ausbringeinheit hervorgehoben sind.

Tabelle 5.10: Auswertung Morphologischer	Kasten	für die	e Konzeption	der	Ausbringeinheit
(gewählte Varianten grau hinterlegt).					

Ausbringeinheit			
Aufbewahrung			
Sortierung	Chaotisch	Magazin	
Anordnung horizontal linear		rund	
Anordnung vertikal	stehend	hängend	durchgängig
Handhabung	1 DoF	2 DoF	>2 DoF
Identifikation	Barcode	RFID	Magnetstreifen
Steuerung	PC (separat)	μController	
Schnittstelle			
Energie	Stecker	Schleifkontakt	Induktion
Daten	WLAN	Ethernet	
mechanisch	Schrauben	Dorn & Bolzen	

# 5.3 Konzeption der Ausbringstrategien

Wie in Kapitel 4.3.2 dargestellt, eignen sich sowohl genetische Algorithmen als auch der Gridkartenansatz sehr gut für die in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Szenarien und Forderungen. Daher werden diese Methoden in dieser Arbeit einer weiteren Untersuchung unterzogen, um ihre Leistungsfähigkeit im gegebenen Zusammenhang zu bestimmen. Nachfolgend wird zuerst die Anpassung genetischer Algorithmen an den vorliegenden Anwendungsfall beschrieben, anschließend die des Gridkartenansatzes.

# 5.3.1 Genetische Algorithmen

Der typische Ablauf der in Kapitel 3.3.1 beschriebenen genetischen Algorithmen gestaltet sich wie folgt:

- (1) Initialisierung: Eine erste Generation von Lösungsindividuen wird zufällig erzeugt.
- (2) Fitnessbestimmung: Die Lösungserfüllung wird für jedes Individuum bestimmt.
- (3) Selektion: Die besten Individuen einer Generation werden für die weiteren Schritte ausgewählt, die anderen verworfen.
- (4) Vermehrung: Mittels Austausch genetischer Informationen zwischen einzelnen selektierten Individuen wird eine neue Generation erzeugt.
- (5) Mutation: Der genetische Code einzelner Individuen wird per Zufall verändert.
- (6) Abbruch: Bei Erreichen eines Abbruchkriteriums, z.B. Unterschreiten eines Delta bei der Verbesserung von Generation zu Generation, wird der Vorgang gestoppt.

Die Schritte 2 bis 5 werden bis zur Erfüllung des Abbruchkriteriums oder für eine definierte Anzahl wiederholt. Grundlage für die weitere Konzeption ist zum einen die Gestaltung der Individuen, zum anderen eine optimierte Initialisierung. Beide Schritte werden nachfolgend näher erläutert. Anschließend werden die für die verbleibenden fünf Schritte notwendigen Konzeptionen und Anpassungen beschrieben.

# 5.3.1.1 Gestaltung der Individuen

Ziel von genetischen Algorithmen ist es, ein Individuum zu finden, das eine Fitnessfunktion bestmöglich erfüllt. Im vorliegenden Fall wird die optimale Kombination von Positionen für n Sensorsonden in einer zu überwachenden Umgebung gesucht. Wie in Kapitel 6.3.4 näher beschrieben wird, werden die Sensorsonden mit Hilfe der Werte  $\alpha$ , r und *ID* repräsentiert und mit x, y und  $\omega$  positioniert. Obwohl bei festen Sondenparametern nur die drei Werte zur Positionierung optimiert werden müssen, werden zur Ermittlung der Fitness einer Sondenposition auch die repräsentierenden Werte benötigt. Als Nebeneffekt wird es somit möglich, bei Bedarf auch diese zu optimieren.

Ein möglicher Ansatz zur Gestaltung der Individuen könnten somit die sechs Parameter einer Sonde sein. Werden zur Bestimmung der besten Positionen nun die n besten Individuen ausgewählt, besteht jedoch die Gefahr, dass sich einige oder gar alle im gleichen Bereich befinden und sich die Erfassungsbereiche teilweise überlagern. Die Vermeidung derartiger Überlagerungen gehört ebenfalls zum Optimierungsprozess. Aus diesem Grund werden die Individuen aus einer Anzahl von n Sensorsonden zusammengesetzt, wie in Abbildung 5.15 schematisch dargestellt. Die einzelnen Sensorsonden eines Individuums werden als Chromosomen bezeichnet.



Abbildung 5.15: Schematische Darstellung eines Individuums bestehend aus n Chromosomen.

# 5.3.1.2 Initialisierung

Die Wahl der initialen Generation von Individuen hat Einfluss auf die Laufzeit von genetischen Algorithmen bis zur Erreichung eines Abbruchkriteriums. Umfassen die ersten Individuen bereits mehrere Lösungen, die nahe am Optimum liegen, sind im Vergleich zu einer zufälligen Verteilung weniger Generationen zur Bestimmung des Optimums nötig. Gleichzeitig ist eine geringere Streuung der Ergebnisse zu erwarten. Um diese Vorteile quantifizieren zu können, wird in dieser Arbeit sowohl die zufällige als auch eine optimierte Bestimmung der initialen Generation betrachtet.

Bei beiden Varianten der Bestimmung der ersten Generation von Individuen wird zunächst von bekannten Sonden ausgegangen, d.h. eine Anzahl von n Sonden mit festen Werten für  $\alpha$ , r und ID. Bei der Zufallsvariante wird für die Position und Orientierung dieser Sonden nun per Zufallsprinzip eine Menge von n \* m Paarungen erzeugt, wobei m die Anzahl von Individuen in einer Generation darstellt. Bei dieser Erzeugung von Paarungen aus Positionen und Orientierungen werden nur Positionen verwendet, die sich innerhalb des zu überwachenden Areals und außerhalb von Hindernissen befinden. Dies führt dazu, dass die erste Generation grundsätzlich plausible Individuen enthält. Aus den Paarungen und den feststehenden Sondenparametern werden nun ebenfalls per Zufall besagte m Individuen der ersten Generation gebildet.

Bei der optimierten Variante werden zunächst Flächen identifiziert, die zu Teilen des Perimeters eine direkte Sichtverbindung aufweisen, sowie gleichsam wie in der zufälligen Variante innerhalb des zu überwachenden Areals und außerhalb der Hindernisse liegen. Diese Flächen werden im Folgenden Sichtbarkeitsflächen genannt. Dank der direkten Sichtverbindung haben Paarungen von Position und Orientierung eine größere Wahrscheinlichkeit, Perimeter abzudecken. Zur Bestimmung dieser Flächen werden zunächst die Eckpunkte der einzelnen Perimeter identifiziert. Von jedem dieser Eckpunkte wird anschließend eine Sichtbarkeitsberechnung mit einer fiktiven Sensorsonde mit unbegrenzter Reichweite und 360°-Öffnungswinkel durchgeführt. Von jedem Punkt innerhalb der daraus resultierenden Fläche besteht eine direkte Sichtverbindung zum jeweiligen Eckpunkt des Perimeters. Anschließend werden die Flächen der zu einem Perimeter gehörenden Eckpunkte mittels logischem UND verknüpft. Das Ergebnis sind Flächen, innerhalb derer jeder Punkt zum größten Teil – in Fällen ohne im Raum stehende Hindernisse zur Gesamtheit – des jeweiligen Perimeters eine direkte Sichtverbindung aufweist.

Als weiterer Schritt zur Optimierung wird nun geprüft, ob Überlappungen der einzelnen Sichtbarkeitsflächen vorliegen. Innerhalb derartiger Überlappungsflächen steigt sowohl die Wahrscheinlichkeit, dass der Perimeter abgedeckt wird, als auch die potentielle Menge abgedeckten Perimeters. Ein Beispiel für Sichtbarkeits- und Überlappungsflächen ist in Abbildung 5.16 dargestellt.



Abbildung 5.16: Darstellung von Sichtbarkeits- und Überlappungsflächen.

Für die Sonden der initialen Generation werden auch in der optimierten Initialisierung n \* m Paarungen aus Position und Orientierung benötigt. Die Positionen werden zu gleichen Anteilen aus den Überlappungsflächen, den Sichtbarkeitsflächen und den verbleibenden Flächen bestimmt. Dieses Vorgehen soll die Wahrscheinlichkeit verringern, dass der Algorithmus in ein lokales Optimum läuft und das globale Optimum nicht gefunden wird. Die Verteilung der Positionen auf die Flächentypen hängt von der maximalen Anzahl überlappender Flächen  $n_{\ddot{u},max}$  ab. Die Überlappungsflächen werden nach der Anzahl überlappender Flächen  $n_{\ddot{u}}$  gruppiert, wobei  $n_{\ddot{u}} = 1$  für nicht überlappende Sichtbarkeitsflächen und  $n_{\ddot{u}} = 0$  für verbleibende Flächen steht. Innerhalb dieser Gruppen werden nun jeweils  $f(n_{\ddot{u}})$  Positionen per Zufall bestimmt, wobei gilt:

$$f(n_{ij}) = \begin{cases} (n*m)/(n_{ij,max} + 1) + 1, & n_{ij} > n_{ij,max} - M \\ (n*m)/(n_{ij,max} + 1), & n_{ij} \le n_{ij,max} - M \end{cases}; f \in \mathbb{N},$$
 5-17

mit

$$M = (n * m) \mod (n_{u,max} + 1); M \in \mathbb{N}.$$
 5-18

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass diese Verteilung aufgrund der Tatsache, dass die Flächen mit wachsendem  $n_{\ddot{u}}$  in der Regel kleiner werden, keine Gleichverteilung auf die gesamte Fläche darstellt. Ein Beispiel für eine optimierte Verteilung der initialen Positionen ist in Abbildung 5.17 dargestellt.



Abbildung 5.17: Beispiel für die optimierte Verteilung der initialen Positionen (Sterne).

## 5.3.1.3 Fitnessbestimmung

Durch die Bestimmung der Fitness, also der Erfüllung der gewünschten Anforderung wird ein Vergleich aller Individuen der aktuellen Generation möglich. Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, liegt die vorrangige Aufgabe eines Überwachungsroboters in der Absicherung des Perimeters eines zu überwachenden Areals. Die Fitnessfunktion muss also zunächst den Grad dieser Absicherung bestimmen. Generell kann die erreichte Abdeckung des Perimeters  $P(I_m)$  als Fitnessfunktion verwendet werden. Die Berechnung dieses Wertes ist in Kapitel 6.3.6 näher beschrieben, die Funktion wird innerhalb des Simulators zur Verfügung gestellt. Um bei späteren Vergleichen der Ergebnisse auf unterschiedlichen Szenarien eine gemeinsame Basis zu haben, wird dieser Wert jedoch noch mit der gesamten Perimeterlänge normiert, womit sich folgende Formel ergibt:

$$F_P(I_m) = \frac{P(I_m)}{P_{ges}}; \{P(I_m) \in R | 0 \le P(I_m) \le P_{ges}\}$$
5-19

wobei  $F_P$  die Fitness bezüglich der Perimeterabdeckung,  $P(I_m)$  die von Individuum m erreichte Perimeterabdeckung und  $P_{qes}$  die gesamte Perimeterlänge darstellt.

Wird nun die Erweiterung E1 Priorisierung von Bereichen inkludiert, indem wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben ein Gewicht eingeführt wird, mit dem einzelne Bereiche unterschiedlich gewertet werden können, ergibt sich die folgende Berechnung der Fitness:

$$F_P(I_m) = \frac{\sum_{i=1}^{S} P_i(I_m) * g_{P,i}}{\sum_{i=1}^{S} P_{i,ges} * g_{P,i}}; \{g_{P,i} \in R^+\}$$
5-20

wobei s die Anzahl zu unterscheidender Bereiche des Perimeters darstellt und

$$\sum_{i=1}^{S} P_{i,ges} = P_{ges}$$
 5-21

sowie

$$\sum_{i=1}^{S} P_i(I_m) = P(I_m)$$
 5-22

Als weiteres Kriterium kann die erreichte Blanket Coverage verwendet werden. Auch deren Berechnung wird in Kapitel 6.3.5 näher beschrieben. Wird auch hier die Überwachung sensibler Bereiche gefordert, erhält man analog zu 5-20 folgende Berechnung:

$$F_B(I_m) = \frac{\sum_{i=1}^u A_i(I_m) * g_{A,i}}{\sum_{i=1}^u A_{i,ges} * g_{A,i}}; \{g_{A,i} \in R^+\}$$
5-23

Wobei  $F_B$  die Fitness bezüglich der Blanket Coverage,  $A_i(I_m)$  die erreichte Flächenabdeckung des Individuums *m* bezogen auf den Teilbereich *i*,  $g_{A,i}$  das Gewicht für das Teilareal *i* und *u* die Anzahl unterschiedlich zu gewichtender Flächenstücke darstellt. Auch hier gilt analog zu 5-21 und 5-22:

$$\sum_{i=1}^{u} A_{i,ges} = A_{ges}$$
 5-24

und

$$\sum_{i=1}^{u} A_i(I_m) = A(I_m)$$
 5-25

mit der gesamten Fläche des Überwachungsbereichs  $A_{ges}$  und der gesamt abgedeckten Fläche des Individuums  $m A(I_m)$ .

Die gesamte Fitness eines Individuums m errechnet sich dann aus Anteilen der Fitness für Perimeter und Blanket Coverage zu:

$$F(I_m) = a * F_P(I_m) + b * F_B(I_m)$$
 5-26

wobei *a* den Anteil der Perimeter und *b* den der Blanket Coverage Fitness ausmacht. Damit die Fitness auch in diesem Fall immer zwischen 0 und 1 liegt, gilt noch sicherzustellen, dass a + b = 1. Dies wird für das Abbruchkriterium relevant.

#### 5.3.1.4 Selektion und Vermehrung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Vorgehensweise, wobei nahezu alle Variationen oder Sonderfälle der  $(\mu + \lambda)$ - und der  $(\mu, \lambda)$ - Strategie sind. Bei beiden beschreibt  $\mu$  die Anzahl der Individuen der jeweils aktuellen Generation und somit bei der Vermehrung die Eltern und  $\lambda$  die Anzahl der erzeugten Kinder. Der Unterschied beider Strategien liegt in der Menge, die zur Ermittlung der nächsten Generation mittels Selektion herangezogen wird. Im ersten Fall werden die  $\mu$  Individuen der nächsten Generation aus der vereinigten Menge der Eltern und Kinder selektiert, im zweiten Fall nur aus der Menge der Kinder. In diesem Fall ist dafür zu sorgen, dass  $\lambda > \mu$  gilt. Die nächste Generation wird in beiden Fällen aus den  $\mu$  fittesten Individuen gebildet. In der ersten Variante werden Elternindividuen erhalten, sollten sie zu diesen Individuen gehören. Man spricht daher auch von präservativen genetischen Algorithmen. In der zweiten Variante sterben die Eltern immer aus, weswegen man auch von extinktiven genetischen Algorithmen spricht. Da im ersten Fall gewährleistet ist, dass immer eine monoton wachsende Verbesserung der Fitness vorliegt, wird in der vorliegenden Arbeit die ( $\mu + \lambda$ )- Strategie gewählt.

Die Bildung der Elternpaare für die Erzeugung der Kinder erfolgt zufällig. Die Vermischung der genetischen Informationen der Eltern wird Cross-Over genannt. Der Name leitet sich davon ab, dass zunächst Kopien beider Elternteile angelegt und dann Teile dieser Kopien über Kreuz ausgetauscht werden. Auch hier gibt es mehrere Möglichkeiten. Gewählt wurde eine Variante des Uniform Cross-Over, da hierbei eine größere Vermischung der genetischen Informationen vorliegt, als bei One-Point oder Two-Point Cross-Over. Mit der Wahrscheinlichkeit  $p_c$  wird bei der gewählten Variante ein Wert zwischen den Kopien ausgetauscht.

In der Literatur beziehen sich die Cross-Over Methoden, so auch das Uniform Cross-Over, meist auf die Repräsentation der Individuen mittels einer Bit-Folge, weshalb die Informationen beim Cross-Over auf Bit-Ebene ausgetauscht werden. Im vorliegenden Fall soll dies jedoch teilweise angepasst werden. Individuen werden aus Chromosomen, diese wiederum aus Parametern gebildet, wie in Abbildung 5.15 dargestellt. Somit liegt es nahe, dass über die Ebene der Bit-Folgen hinaus Parameter und Chromosomen für das Cross-Over verwendet werden können. Im Folgenden werden diese Möglichkeiten als Chromosom Cross-Over, Parameter Cross-Over und Bit Cross-Over bezeichnet. Die vorgestellten Begriffe bezeichnen dabei jeweils die Bausteine, die ausgetauscht werden. Die drei Varianten, jeweils angepasst auf das vorliegende Problem, sind schematisch in Abbildung 5.18 dargestellt.



Abbildung 5.18: Schematische Darstellung von Chromosom, Parameter und Bit Cross-Over (Oben/Mitte/Unten) als Methoden zur Generierung der Kinder aus den Informationen der Eltern, jeweils auf das vorliegende Problem angepasst.

Sowohl beim Bit Cross-Over als auch beim Parameter Cross-Over werden die Position und ggf. die Orientierung einzelner Sensoren verändert. Dies führt dazu, dass für diese Sensoren die für die Fitnessbestimmung benötigte Berechnung der Perimeter- bzw. Blanket-Abdeckung erneut durchgeführt werden muss. Beim Chromosom Cross-Over werden nicht die einzelnen Sensoren, sondern lediglich deren Zusammenstellung zu einem Individuum verändert. Hierbei kann auf eine erneute Fitnesssbestimmung verzichtet und somit Rechenzeit eingespart werden. Bei einer neuen Zusammenstellung von Sensoren zu einem Individuum sind somit lediglich die überlappenden Bereiche der Sensoren zu bestimmen, damit diese nicht mehrfach in die Fitness eingehen. Als Nachteil des Chromosom Cross-Overs steht die geringere Vielfalt in den erzeugten Nachkommen. Einzig durch die nachfolgend beschriebene Mutation werden neue Positionen und Orientierungen für Sensoren erzeugt. Aufgrund der Forderung F2 Schnelle Berechnung wird in der weiteren Betrachtung nur das Chromosom Cross-Over verwendet. Beim Bit Cross-Over und beim Parameter Cross-Over sei darauf verwiesen, dass der Überwachungsroboter und somit auch der in dieser Arbeit verwendete Demonstrator auf einen festen Bestand an Sensorsonden zurückgreifen kann. Diese Sonden werden zumindest für die Dauer eines Einsatzes fix konfiguriert sein. Daher ist es für den späteren Einsatz nicht sinnvoll, dass die repräsentierenden Parameter  $\alpha$ , r und *ID* durch den genetischen Algorithmus optimiert werden. Da es jedoch zur Ermittlung der optimalen Sondenausstattung für eine bestimmte Aufgabe später von Nutzen sein könnte, wird die Möglichkeit vorgesehen, dass  $\alpha$  und r in die Optimierung einbezogen werden können. Dies ist in Abbildung 5.18 durch die gestrichelten Linien gekennzeichnet. Die *ID* wird in keinem Fall dem Cross-Over unterzogen.

#### 5.3.1.5 Mutation

Bei der Mutation werden einzelne Werte von Individuen zufällig verändert. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies geschieht, wird mit  $p_M$  angegeben. Von den in der Literatur beschriebenen Methoden der Mutation wurde für diese Arbeit die Non-Uniform Mutation ausgewählt. Bei dieser nimmt die Wahrscheinlichkeit  $p_M$  mit ansteigender Generationenzahl ab. Dies birgt den Vorteil, dass spätere Generationen stabil gegen das Optimum konvergieren, wohingegen man in früheren Generationen einen sehr offenen Suchraum durch stärkere Mutation hat. Ein Nachteil der Non-Uniform Mutation ist, dass sie nur auf reale Zahlen angewendet werden kann. Da im vorliegenden Fall die Möglichkeit besteht, auf Bit-Ebene oder auf der Parameterebene zu mutieren, stellt dies kein Problem dar.

Für die Abnahme der Mutationswahrscheinlichkeit wird ein linearer Zusammenhang gewählt. Mit der anfänglichen Wahrscheinlichkeit  $p_{M,0}$ , der aktuellen Generationenzahl x und der maximalen Anzahl von Generationen  $x_{max}$  erhält man somit:

$$p_M = p_{M,0} - \frac{G}{G_{max}} * p_{M,0}$$
 5-27

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass der Mutation jeweils nur die Parameter unterzogen werden, die auch dem Cross-Over unterliegen.

#### 5.3.1.6 Abbruch

Die Schritte Selektion, Vermehrung und Mutation werden bis zum Eintreten eines Abbruchkriteriums zyklisch wiederholt. Es werden folgende drei Abbruchkriterien definiert:

$$F_{\max}(G) = \max\left(F(I_{m,G})\right) = 1$$
5-28

Sobald ein Individuum in Generation x die Fitness 1 erreicht, bedeutet das, die gewünschte Abdeckung von Perimeter oder Fläche ist sichergestellt.

$$F_{\max}(G) - F_{\max}(G-1) \le \varepsilon$$
 5-29

Die Verbesserung der Fitness von einer auf die nächste Generation befindet sich unter einem definierten Schwellwert.

$$G = G_{max} 5-30$$

Die maximale Anzahl an Generationen wurde erreicht.

Zum Abbruch des Zyklus genügt die Erfüllung eines dieser drei Kriterien.

# 5.3.2 Gridkartenansatz

Die grundlegende Funktion von Gridkarten sowie Beispiele für deren Anwendung im Zusammenhang mit Sensorsonden sind in Kapitel 3.3.4 beschrieben. Grundsätzlich gilt, dass bei Optimierungsproblemen Gridkarten lediglich eine vereinfachte Sichtweise ermöglichen. Optimierungsverfahren müssen auch weiterhin angewendet werden. Bei der Bestimmung der optimalen Positionen für Sensorsonden bietet die Verwendung von Gridkarten die Möglichkeit, die für jede Position auf der Karte erreichbare Sensorabdeckung zu bestimmen und somit einen vollständigen Lösungsraum aufzuspannen. Mit Verfahren, wie dem Greedy-Algorithmus, ist es dann möglich, innerhalb der Diskretisierungsgrenzen die optimale Verteilung mehrerer Sensorsonden deterministisch zu bestimmen. Der Vorteil hiervon im Vergleich zu Verfahren wie genetischen Algorithmen ist die Tatsache, dass ein Berechnungsschritt bei gleichen Parametern immer das gleiche Ergebnis liefert. Eine Varianz in den Ergebnissen muss also nicht berücksichtigt werden. Der Nachteil liegt in der aufwendigen Berechnung des vollständigen Lösungsraumes.

Der verwendete Ansatz besteht aus mehreren Stufen:

- 1. Diskretisierung der Problemstellung
- 2. Bestimmung der Abdeckung aller Positionen und Sensororientierung mit Bestimmung der Menge an Flächen- und Perimeterelementen
- 3. Identifikation des besten Ergebnisses
- 4. Eliminierung der Flächen- und Perimeterelemente des besten Ergebnisses aus den bestehenden Ergebnissen

Die Stufen 3 und 4 entsprechen dem Greedy-Algorithmus und werden so oft wiederholt, bis entweder die maximal zur Verfügung stehende Anzahl von Sensorsonden erreicht ist oder die Menge an noch nicht abgedeckten Flächen- bzw. Perimeterelementen leer ist. Die vier Schritte werden im Folgenden näher erläutert.

# 5.3.2.1 Diskretisierung

Der Gridkartenansatz geht von einer Diskretisierung der zu betrachtenden Umgebung aus. In vorliegendem Fall gilt dies gleich für mehrere Elemente, die nachfolgend beschrieben werden:

Sensorsondenpositionen: Für die Ermittlung der optimalen Position einer Sensorsonde wird das zu überwachende Areal A<sub>ges</sub> in gleich große quadratische Bereiche unterteilt. Hierbei sind nur die Bereiche des Areals betroffen, in denen Sensorsonden platziert werden können. Die Kantenlänge der Quadrate wird mit dem Parameter Δd beschrieben. Als Positionen für die Sonden dienen die Eckpunkte der Quadrate (x<sub>i</sub>|y<sub>j</sub>). Sei SP die Menge der Eckpunkte, dann gilt:

$$SP = \{ (x_i | y_j) | i, j \in N, (x_i | y_j) \in A_{ges} \}$$
 5-31

mit

$$|x_i - x_{i-1}| = |y_j - y_{j-1}| = \Delta d$$
 5-32

Ein Beispiel für die Diskretisierung der Sondenpositionen ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

- Sondenorientierung: Ist eine Sonde mit einem Sensor ausgerüstet, der über ein eingeschränktes Sichtfeld verfügt, also nicht volle 360° abdeckt, so ist bei der Bestimmung der optimalen Position der Sonde auch die Orientierung zu optimieren. Da es sich hierbei auch um ein kontinuierliches Problem handelt, wird im Zuge des Gridkartenansatzes auch die Sondenausrichtung diskretisiert. Die Schrittweite beim Drehen der Ausrichtung wird durch den Parameter Δω beschrieben.
- Überwachungsareal: Grundsätzlich handelt es sich hierbei um die gleiche Diskretisierung wie bei den Sensorsondenpositionen (siehe auch Abbildung 5.19). Somit beschreibt der Parameter  $\Delta d$  auch die Granularität des Überwachungsareals. Sei  $\Delta A_i$  das Gridkartenelement *i*, dann gilt:

$$A_{ges} = \sum_{i} \Delta A_i$$
 5-33

mit

$$\Delta A_i = \Delta d^2$$
 5-34

Für die Bestimmung der Abdeckung einer einzelnen Sonde ist die Diskretisierung des Überwachungsareals nicht notwendig. Dies geschieht weiterhin mit einer geometrischen Berechnung wie in Kapitel 6.3 beschrieben. Für die Ermittlung der optimalen Kombination aus Sensorsondenpositionen bei der Verwendung mehrerer Sonden ist diese Diskretisierung jedoch zur Reduzierung von Überlappungen mehrerer Sensoren hilfreich.

 Perimeter: Für die Diskretisierung des Perimeters gilt analog zum Überwachungsareal, dass die Berechnung des abgedeckten Perimeters geometrisch erfolgt, zur Vermeidung von Überlappungen der Perimeter jedoch in einzelne Sektoren unterteilt wird. Die Länge dieser Sektoren wird mit dem Parameter Δ*l* beschrieben. Sei Δ*P<sub>i</sub>* das Perimeterelement *i* so gilt analog zu 5-33:

$$P_{ges} = \sum_{i} \Delta P_i$$
 5-35

mit

$$\overline{\Delta P_i} = \Delta l \qquad 5-36$$

Ein Beispiel für die Diskretisierung des Perimeters ist in Abbildung 5.20 dargestellt.



Abbildung 5.19: Diskretisierung des Überwachungsareals und der Sondenpositionen (Punkte).



Abbildung 5.20: Diskretisierung des Perimeters.

# 5.3.2.2 Abdeckungsbestimmung

Wie in 5.3.2.1 bereits angedeutet, wird die Abdeckung für jede diskretisierte Sondenposition mittels der in Kapitel 6.3 beschriebenen geometrischen Berechnung bestimmt und die jeweils erreichte Perimeter- und Blanket-Abdeckung entsprechend Kapitel 5.3.2.1 diskretisiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Orientierung der Sonden mit  $\Delta \omega$  diskretisiert wird, muss die Berechnung pro

Gridpunkt  $\frac{360^{\circ}}{\Delta\omega}$ -mal durchgeführt werden. Bei  $n_{\ddot{0}W}$  Sensorsonden mit verschiedenen Öffnungswinkeln erhöht sich die Berechnungsanzahl pro Gridpunkt auf  $\frac{360^{\circ}}{\Delta\omega} * n_{\ddot{0}W}$ . Zur Einhaltung der Forderung F2 Schnelle Berechnung werden die Sichtkegel der Sensorsonden in einzelne Segmente mit dem Öffnungswinkel  $\Delta\omega$  zerlegt. Dadurch reduziert sich die Berechnungsanzahl wieder auf  $\frac{360^{\circ}}{\Delta\omega}$ und es ist möglich, aus den einzelnen Segmenten beliebige Sichtkegel mit Öffnungswinkel n\* $\Delta\omega$  zu erzeugen.

Der vollständige Lösungsraum wird somit aus den diskreten Perimeter- und Blanket-Abdeckungen der  $\frac{360^{\circ}}{\Lambda_{CV}}$  Segmente für jede mögliche Sensorsondenposition zusammengestellt.

## 5.3.2.3 Identifikation des besten Ergebnisses und Lösungsraumanpassung

Je nach festgelegter primärer Zielgröße wird der Lösungsraum nach der den Öffnungswinkel der verwendeten Sensorsonden nachbildenden Kombination zusammenhängender Segmente durchsucht, welche die größte Blanket- oder Perimeterabdeckung aufweisen. Das Ergebnis stellt die Position und Ausrichtung für die erste Sensorsonde dar. Im nächsten Schritt werden die von dieser Sonde abgedeckte Fläche und der abgedeckte Perimeter vom verbleibenden Lösungsraum extrahiert.

Die zwei hier beschriebenen Schritte werden bis zur Erreichung eines Abbruchkriteriums wiederholt. Im vorliegenden Fall ist dieses Kriterium die maximale Anzahl von Sensorsonden.

# 6 Realisierung

## 6.1 Realisierung der Sensorsonden

## 6.1.1 Verwendete Sensoren

Kapitel 3.4.1 unterscheidet fünf Gruppen von Sensoren für den Einsatz auf Überwachungsrobotern:

- Bildgebende Sensoren
- Akustische Sensoren
- Bewegungsmeldende Sensoren
- Beschleunigungssensoren
- Klimasensoren

Die Klimasensoren werden in der vorliegenden Arbeit nicht zur Betrachtung herangezogen, weil der Fokus der Arbeit auf der Überwachung im sicherheitstechnischen Sinn liegt. Da sich die Forderungen A2 Kreuzweise Verwendung und A3 Beliebige Konfigurierbarkeit nicht auf die Sensoren auswirken, wurden diese Kriterien bei der Auswahl der Sensoren ebenfalls nicht berücksichtigt. Forderung A1 Einfache Skalierbarkeit wird hier im Sinne der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Anforderung an die Größe der Sonden ausgelegt. Das Ergebnis ist in Tabelle 6.1 dargestellt. Die Forderung A5 Outdoortauglichkeit ist nach der Definition potentieller Einsatzszenarien in Kapitel 2.3.3 für die vorliegende Arbeit zwar nicht zwingend erforderlich, wird aber in der Betrachtung mitgeführt. Einen Einfluss auf das Fazit hat das Ergebnis dieser Teilbetrachtung allerdings nicht (daher in Tabelle 6.1 grau hinterlegt), kann jedoch für weiterführende Arbeiten verwendet werden.

Man kann erkennen, dass Farbkameras und akustische Sensoren am besten auf die an Sensorsonden gestellten Anforderungen passen. Dies schließt die anderen Sensoren nicht pauschal für die Nutzung auf Sensorsonden aus. Lediglich deren Verwendung im Demonstrator für die vorliegende Arbeit wird nicht in Betracht gezogen.

Bei der Farbkamera handelt es sich um den Sensor aus der Ergebnisliste, der die höchsten Ansprüche an die drahtlose Datenübertragung stellt. Darüber hinaus ist die Farbkamera in der Standardausführung ein Sensor mit eingeschränktem Sichtfeld und Ergebnisse bei der Platzierung der Sensoren lassen sich direkt visuell beurteilen, ohne mit Hilfe von Personen das Eindringen in den Bereich simulieren zu müssen. Aus diesen Gründen werden für den Demonstrator der vorliegenden Arbeit Farbkameras als Sensoren verwendet.

## Tabelle 6.1: Analyse von Sensorarten bezogen auf die Anforderungen an Sensorsonden

(--: sehr schlecht, -: schlecht, 0: mittel, +: gut, ++: sehr gut)

Sensor	Einfache Ska- lierbarkeit	lierbarkeit Robustheit Outdoor- tauglichkeit		Integrierbarkeit	Kostengünstig
Bildgebend					
Farbkamera	++	++	+	++	++
Wärmebildkamera	0	0	+	++	
Millimeterwellenkamera		++	++		
Akustische Sensoren	++	++	+	++	++
Bewegungsmeldende Sensoren					
Passiv Infrarot Melder	++	++	++	0	++
Radarsensoren	0	++	++	+	0
Ultraschallsensoren	+	++	+	+	++
Laserscanner	+	0	0	++	0
Beschleunigungssensoren	++	++	++	+	++

# 6.1.2 Verwendete drahtlose Übertragungsform

In Kapitel 3.4.2 wurden sechs drahtlose Übertragungsformen dargestellt. Zur Festlegung des geeigneten Protokolls wurden diese zunächst auf die folgenden Punkte hin untersucht:

- Kosten für die Anschaffung und den fortdauernden Betrieb
- Aufwand für Anpassung der Hardwareschnittstellen
- Datendurchsatz
- Verfügbarkeit
- Reichweite
- Repeaterfunktionalität: Es ist zu untersuchen, ob für diese grundlegende Funktion einer Sensorsonde weitere Hardware benötigt wird oder dafür weitere Kosten anfallen.

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Tabelle 6.2 dargestellt. Zur Verfügbarkeit sei angemerkt, dass alle Übertragungsprotokolle bis auf GPRS und UMTS auf eine bereitzustellende Infrastruktur angewiesen sind. Somit kann die Verfügbarkeit beeinflusst werden. Dagegen ist bei GPRS und UMTS das zur Verfügung stehende Netz nicht flächendeckend ausgebaut und die Verfügbarkeit in Gebäuden häufig eingeschränkt. Repeaterfunktionalität ist aktuell für fast alle der genannten Übertragungsprotokolle verfügbar, jedoch lediglich in WLAN bereits integriert erhältlich.

	WLAN	Bluetooth	GPRS/ UMTS	UWB	ZigBee
Kosten (€) für:					
$\rightarrow$ Anschaffung	10 - 30 Karte ab 15 Router	5 - 20	30 - 90	k.A.	10 - 100
→ Betrieb	-	-	15 - 40/Monat ggf. Kosten pro MB	-	-
Anpassung	++	++	+	0	0
Datendurchsatz (Mbit/s)	802.11g 5 - 25 802.11n 5 - 120	0,7 EDR 2,2	GPRS ~0.1 bis zu 7,2	bis > 1000	0,25
Verfügbarkeit	++	+	0	+	+
Reichweite	Indoor max. 50m Outdoor max. 300m	bis max. 100m	unbegrenzt (setzt Verfüg- barkeit von Funkzellen voraus)	bis > 100 m	Bis 800 m
Repeaterfunktion	✓	×	(√)	(✔)	(🗸)

 Tabelle 6.2:
 Analyse von Übertragungsprotokollen

Ultra Wide Band ist ein Standard, der aktuell unter anderem zu Wireless USB weiterentwickelt wird. Es geht hier vor allem um eine Nahbereichskommunikation mit hohem Datendurchsatz. Es sei vermerkt, dass die in Tabelle 6.2 angeführten Werte für Reichweite und Datendurchsatz nicht gleichzeitig erreicht werden können. Den höchsten Durchsatz erreicht man bis 4 m, mit zunehmender Entfernung nimmt dieser entsprechend ab.

Des Weiteren müssen die in Kapitel 4 aufgestellten Forderungen an Sensorsonden berücksichtigt werden. Die Forderung A3 wirkt sich auf die drahtlose Kommunikation derart aus, dass Sensoren mit unterschiedlicher Bandbreitenanforderung eingesetzt werden können. Aus diesem Grund spiegelt die Bandbreite der jeweiligen Übertragungsform die Erfüllung dieser Forderung wider. Die Forderung A5, obwohl nicht entscheidungsrelevant, wird im Zusammenhang mit drahtlosen Übertragungsformen mit der erreichbaren Reichweite verglichen. Forderung A6 drückt letztlich den Aufwand bei der Integration in bestehende Überwachungsroboter aus. Bereits im Roboter verwendete Übertragungsformen erreichen hier einen guten Wert. Das Ergebnis ist in Tabelle 6.3 dargestellt. Für die gegebenen Anforderungen geht WLAN als bevorzugte drahtlose Übertragungsform hervor. Vor allem der Umstand, dass Überwachungsroboter fast ausnahmslos über WLAN verfügen, und die große Bandbreite geben den Ausschlag. Als weiteres Positivmerkmal sei hier noch die mögliche integrierte Repeaterfunktion angeführt.

# Tabelle 6.3: Analyse drahtloser Übertragungsformen bezogen auf die Anforderungen an Sensorsonden

Drahtlose Übertragungsform	A1 Einfache Ska- lierbarkeit	A2 Kreuzweise Ve rwendung	A3 Beliebige Konf igurierbarkeit	A4 Robustheit	A5 Outdoor- tauglichkeit	A6 Integrierbarkeit	A7 Kostengünstig
WLAN (IEEE 802.11a/b/g/n)	++	++	++	++	+	++	+
Bluetooth	0	0	0	0	0	+	+
GPRS	+	++	-	+	++	0	0
UMTS	+	++	+	+	++	0	0
UWB	0	0	0	+	+	-	+
ZigBee	0	0	0	+	0	-	+

(--: sehr schlecht, -: schlecht, 0: mittel, +: gut, ++: sehr gut)

# 6.1.3 Funkprotokolle

In Kapitel 3.2 werden die sechs am häufigsten für Ad-hoc Netzwerke verwendeten Protokolle beschrieben. Um ein geeignetes Protokoll für den vorliegenden Fall zu identifizieren, wurden sie nach den ebenfalls in Kapitel 3.2 beschriebenen Kriterien bewertet:

- Delay
- Packet Delivery Ratio (PDR)
- Re-Routing Zeit
- Routing Overhead

Da die Daten aus den Ergebnissen mehrerer Publikationen zusammengetragen wurden (siehe Kapitel 2.3) ist nur eine qualitative Bewertung möglich. Diese ist in Tabelle 6.4 dargestellt.

Die Protokolle GPSR und TORA wurden in den jeweiligen Publikationen nur auf die in Tabelle 6.4 eingetragenen Kriterien untersucht. Bei B.A.T.M.A.N. kann keine Aussage getroffen werden, da mit diesem Routingprotokoll das in der Publikation beschriebene Szenario nicht erfolgreich durchgeführt werden konnte und somit keine Vergleichsdaten geliefert wurden.

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass die der Bewertung zugrundeliegenden Arbeiten ihre Daten mit einer unterschiedlichen Anzahl von Nodes sowie einer unterschiedlichen Dynamik der Nodes erhoben haben. So wurde GPSR nur mit 100 Nodes bei fliegenden Nodes (hohe Dynamik) getestet. AODV und OLSR wurden hingegen in allen zugrundeliegenden Publikationen als Vergleich herangezogen, d.h. zwischen 5 und 100 Nodes und sowohl mit quasistatischen Netzwerken als auch hochdynamischen getestet. Dies lässt auf eine gewisse Flexibilität bei der Verwendung dieser beiden Protokolle schließen. Da OLSR ein geringeres Delay als AODV vorweist, geht es als bevorzugtes Protokoll aus dem Vergleich hervor.

# 

(--: sehr schlecht, -: schlecht, 0: mittel, +: gut, ++: sehr gut, ?: nicht bekannt)

Funkprotokoll	Delay	PDR	Re-Routing Zeit	Overhead
AODV	0	0	0	0
DSR	-	+	+	+
OLSR	+	0	0	0
GPSR	+	+	?	?
TORA	-	?	?	+
B.A.T.M.A.N.	?	?	?	?

# 6.1.4 Verwendete Energieversorgung

Kapitel 3.4.4 führt fünf verschiedene mögliche Energieversorgungen für Sensorsonden auf. Auch auf diese werden die Kriterien aus Kapitel 4.1 angewendet. Ähnlich wie bei den beiden vorangegangenen Komponenten können auch hier nicht alle Kriterien verwendet werden bzw. führen zu den gleichen Ergebnissen. Durch die Zellenbauweise von Akkumulatoren und die Modulbauweise von Solarzellen ist Forderung A1 Einfache Skalierbarkeit direkt erfüllt. Selbst bei Brennstoffzellen gibt es Ausführungen in unterschiedlichen Leistungsklassen bzw. kann man Module kombinieren. Die Forderungen A3 Beliebige Konfigurierbarkeit und A6 Integrierbarkeit werden ebenfalls von allen Energiespeichern gleichermaßen erfüllt. Bei Forderung A2 Kreuzweise Verwendung muss unterschieden werden, was mit dieser Forderung in diesem Fall gemeint ist. Geht es darum, beliebige Sensorsonden mit der gleichen Energieversorgung zwischen Überwachungsrobotern zu tauschen, erfüllen alle vorgestellten Möglichkeiten die Forderung gleichermaßen. Geht es jedoch um die Möglichkeit, zwischen Sensorsonden mit unterschiedlichen Energieversorgungen zu wechseln, ergeben sich Unterschiede in der Form der Nachladung und somit in der Komplexität der Ausbringeinheit. Daher wird im vorliegenden Fall diese Interpretation gewählt. Forderung A5 Outdoortauglichkeit wird derart ausgelegt, dass der Einsatz sowohl im Innen- als auch im Außenbereich möglich sein muss. Tabelle 6.5 fasst das Ergebnis der Analyse zusammen.

Aufgrund der großen Stückzahlen sind die Akkumulatoren den anderen Energieversorgungen gegenüber kostenmäßig im Vorteil. Da in dieser Arbeit weder Baugröße noch Gewicht in die Betrachtung mit einfließen, können Lithium-Ionen- und Lithium-Polymer-Akkumulatoren ihre Stärken nicht ausspielen. Somit wird für den Aufbau des Demonstrators eine Energieversorgung über Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren gewählt.

Tabelle 6.5:	Analyse von	Energiespeichern	bezogen auf o	die Anforderungen a	an Sensorsonden
--------------	-------------	------------------	---------------	---------------------	-----------------

Energieversorgung	A1 Einfache Ska- lierbarkeit	A2 Kreuzweise Ve rwendung	A3 Beliebige Konf igurierbarkeit	A4 Robustheit	A5 Outdoor- tauglichkeit	A6 Integrierbarkeit	A7 Kostengünstig
Nickel-Metallhydrid	++	++	++	++	++	++	++
Lithium-Ionen	++	++	++	+	++	++	0
Lithium-Polymer	++	++	++	++	++	++	0
Solarzellen mit Speicher	++	++	++	+	++	++	-
Brennstoffzelle	++		++	++	++	++	-

(--: sehr schlecht, -: schlecht, 0: mittel, +: gut, ++: sehr gut)

## 6.1.5 Zusammenfassung der Realisierung von Sensorsonden

Bezugnehmend auf die in Kapitel 2.1 genannten Teilkomponenten von Sensorsonden wurden diese in der vorliegenden Arbeit wie folgt realisiert: Die Sensorsonden für den Demonstrator sind mit einer Netzwerkkamera als Sensor ausgestattet. Dies umgeht das Problem, die Kameradaten in ein netzwerkfähiges Format übertragen zu müssen, da diese Art von Kameras bereits über einen Webserver verfügen. Über diesen stehen die Bilddaten überall im angeschlossenen Netzwerk zur Verfügung. Für die drahtlose Kommunikation wurde ein WLAN-Accesspoint ausgewählt, bei dem die Möglichkeit besteht, die Firmware auszutauschen. Mit Hilfe von dd-wrt, einer open-source Linux Distribution für WLAN-Accesspoints (NewMedia-NET, 2005) wird das in Kapitel 6.1.3 favorisierte Routingprotokoll OLSR auf die Accesspoints integriert. Die in Kapitel 6.1.4 als Energieversorgung festgelegten Ni-Mh-Akkumulatoren sind aufgrund des Spannungsverlaufs während ihrer Entladung mit einem nachgeschalteten Spannungsstabilisator versehen. Dieser ist notwendig, da weder die Kamera noch der Accesspoint über einen entsprechenden Weitbereichsspannungseingang verfügen. Tabelle 6.6 zeigt in übersichtlicher Form die ausgewählten Komponenten.

Tabelle 6.6:	Auswahl von	Teilkomponenten	der	Sensorsonden.
--------------	-------------	-----------------	-----	---------------

Teilkomponente	Konzept
Sensor	Farbkamera
Kommunikationsschnittstelle mit Verstärkerfunktion	WLAN
	OLSR
Energieversorgung	Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren

Beim mechanischen Aufbau wurde darauf geachtet, eine möglichst kleine Grundfläche zu verwenden. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass eine möglichst große Anzahl von Sonden in der zur Verfügung stehenden Ladefläche des Überwachungsroboters untergebracht werden sollen. Um dennoch einen guten Stand zu gewährleisten, wurden die Akkumulatoren als schwerste Komponenten in die Basis der Sonde integriert. Auf dieser Basis ist eine Befestigungsplatte aus Aluminium angebracht, an der die Farbkamera, der Accesspoint und auch die mechanische Schnittstelle befestigt sind. Die ein Kapitel 5.1.1 entwickelte Schnittstelle besteht aus einem Kunststoffzylinder mit einer konischen Bohrung, auf deren Boden eine ferromagnetische Armatur befestigt ist. Diese wird bei einem Ausbring- oder Einholvorgang von einem Magneten gehalten. Der Kunststoffzylinder verfügt darüber hinaus über zwei Abfräsungen. Die untere dient der Haltung durch den Federrahmen der Ausbringeinheit und ist rund ausgeführt. In die zweite wird ein Zahnriemen eingeklebt, der die Sonde bei Drehung des Magazins an dem dort befestigten Zahnriemen abrollt und somit in die korrekte Orientierung bringt.

Nachfolgend ist in Tabelle 6.7 noch einmal der Morphologische Kasten aus Kapitel 5 zur Konzeption der Sensorsonden gezeigt, wobei die letztlich verwendeten Lösungsansätze der einzelnen Teilkomponenten zur Realisierung der Sensorsonden hervorgehoben sind.

Tabelle 6.7:	Auswertung	Morphologischer	Kasten	zur	Konzeption	der	Sensorsonden	(ge-
wählte Varia	nten grau hin	terlegt).						

Sensorsonde							
Sensoren	bildge- bend	akus- tisch	bewe- gungs- meldend	Erschüt- terung			
Drahtlose Übertragungsform	WLAN	Blue- tooth	GPRS/ UMTS	UWB	ZigBee		
Funkprotokoll	AODV	DSR	OLSR	GPSR	TORA	B.A.T. M.A.N.	
Energieversorgung	Ni-Mh	Li-Ion	Li-Po	Solar- zelle mit Speicher	Brenn- stoffzel- le		
Schnittstelle							
Lösbarer Kraftschluss	Flexibler Greifer		Konisch stü	Konische Gegen- stücke		Drehbares Tra- pezrohr	
Offsetausgleich	Gleitlager mit Fe- dern		Gleitlage dern auf sch	Gleitlager mit Fe- dern auf Endan- schlag		Gleitlager mit Schwerkraftrück- stellung	
Verdrehungs- ausgleich	Sensor und Aktor		Sensorlo drehungs	Sensorloser Ver- drehungsausgleich			
Energietech. Schnittstelle	Stecker		Schleifkontakt		Induktion		



Der komplette Aufbau einer Sonde ist als CAD Zeichnung und als realer Aufbau in Abbildung 6.1 gezeigt.

Abbildung 6.1: CAD-Zeichnung des Aufbaus einer Sensorsonde mit Kamera, WLAN Modul, Energieversorgung und mechanischem Interface (Links), Fertiger Aufbau einer Sensorsonde (Rechts).

# 6.2 Realisierung einer Ausbringeinheit

Kernstück der Ausbringeinheit ist das kreisförmige Magazin, in dem die Sensorsonden aufbewahrt werden. Der Demonstrator ist für sechs Sonden ausgelegt. Jede Halteposition für eine Sonde verfügt über eine federbelastete Arretierung, wie in Abbildung 6.2 dargestellt. Anders als in Kapitel 5.2.2 erläutert, handelt es sich hier um einen umlaufenden Rahmen, der die Sonde gegen das feste Rundprofil drückt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass der Antrieb zum Öffnen der Arretierung aus Platzgründen nahe der Achse des Magazins befestigt ist, wie Abbildung 6.3 zeigt.



Abbildung 6.2: Halteposition für Sonden mit federbelasteter Arretierung im Magazin der Ausbringeinheit von unten.
Das Magazin ist mittels eines Radial- und eines Axiallagers an einer zentralen Achse drehbar gelagert und wird von einem Schrittmotor über einen Zahnriemen angetrieben. Die zentrale Achse stellt den Befestigungspunkt für den Schrittmotor, den Antrieb zum Öffnen der Arretierungen und der Zentrierplatte dar. Diese ist direkt oberhalb des Magazins befestigt und hat auf der Außenkante den Zahnriemen befestigt, an dem sich die Sonde in die korrekte Ausrichtung abrollt.



Abbildung 6.3: Magazin mit Sonde in Halteposition und Hubmagnet mit Umlenkung zum Öffnen der Arretierungen.

Die mechanische Befestigung der Ausbringeinheit an den Überwachungsroboter ist mittels der in Kapitel 5.2.5 beschriebenen Kombination aus Zentrierdorn und Haltebolzen realisiert. Die Halterung auf Seiten der Ausbringeinheit wurde um eine zentrale Feder derart ergänzt, dass sich die Ausbringeinheit beim Betätigen der Lösegriffe leicht anhebt und somit die Demontage erleichtert wird. Der gesamte Aufbau des Magazins ist als Schnitt in Abbildung 6.4 dargestellt



Abbildung 6.4: Schnitt durch das Magazin mit zentraler Achse, mechanischer Schnittstelle zum Überwachungsroboter und drei Sensorsonden.

Als Linearantrieb wurde eine motorisierte Radioteleskopantenne verwendet. Die Flexibilität der Antenne sorgt für einen natürlichen Offset-Ausgleich mit beschränkter, im getesteten Fall jedoch ausreichender Rückstellkraft, sodass die Sonden zentral in die Aussparungen im Magazin gehoben werden.

Die Verbindung zu den Sonden wird mittels eines Konus hergestellt. In dessen Mitte ist ein Haltemagnet eingelassen, der durch Anlegen einer elektrischen Spannung kurzzeitig seine Anziehungskraft verliert. Im Gegensatz zu einem reinen Elektromagneten wird hierdurch Energie gespart, da diese nur für den Lösevorgang benötigt wird. Es ist somit auch sichergestellt, dass bei einem eventuellen Stromabfall eine Sonde nicht unbeabsichtigt fallengelassen wird. Des Weiteren ist in den Konus ein Taster eingebaut, welcher beim Eintauchen in die konische Bohrung schließt und somit den Kontakt mit der Sonde detektiert. Ein weiterer Taster ist in den Übergang zwischen der Antenne und dem Konus verbaut. Dieser schließt, sobald der Konus auf etwas gedrückt wird. Aus der Kombination dieser beiden Taster lässt sich rückschließen, ob der Konus in der vorgesehenen Bohrung der Sonde steckt oder auf ein Hindernis oder den Boden gestoßen ist. Auch der Bodenkontakt einer Sonde beim Absetzen wird hierüber erkannt. Der Linearantrieb mitsamt Konus und der darunter befindlichen mechanischen Schnittstelle einer Sensorsonde sind in Abbildung 6.5 dargestellt.



Abbildung 6.5: Linearantrieb mit angeschlossenem Konus, montiert an der Ausbringeinheit. (Abbildung gedreht)

Wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben, wird die Steuerung der Ausbringeinheit mit einem 16-Bit Mikrocontroller realisiert. Auf elektronischer Seite wurden die digitalen Ein- und Ausgänge mittels Optokopplern geschützt. Für die Ansteuerung des Linearantriebs, des Schrittmotors und des Antriebs zur Öffnung der Federrahmen wurden drei Leistungsteile integriert. Die Aktoren und Sensoren sind über Sub-D Stecker mit der Steuerung verbunden. Eine Reihe von 10 LEDs informiert über den aktuellen Zustand der Ein- und Ausgänge sowie des Netzwerk Traffics mit dem Überwachungsroboter. Dieser ist über die Ethernetschnittstelle mit der Steuerung verbunden. Der Aufbau der Steuerung ist in Abbildung 6.6 dargestellt.



Abbildung 6.6: Steuerung der Ausbringeinheit mit geöffnetem Gehäuse und Komponentenbenennung

Auf Seiten der Software sind die in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Abläufe für das Ausbringen und Einholen von Sensorsonden in C++ umgesetzt und als Funktionen auf dem Mikrocontroller bereitgestellt worden. Des Weiteren wurden eine Initialisierungsroutine und ein Hauptprogramm integriert. Die Initialisierung sorgt für eine korrekte Positionierung aller Aktoren nach einem etwaigen Stromausfall. So wird zunächst geprüft, ob eine Sonde am Konus hängt. Sollte dies der Fall sein, wird diese Sonde gemäß dem Einholvorgang in das Magazin verbracht. Befindet sich keine Sonde am Konus, wird der Linearantrieb auf die oberste Position gefahren. Anschließend vollführt das Magazin eine volle Drehung, um die besetzten und freien Plätze zu identifizieren. Dabei wird auch die korrekte Positionierung der einzelnen Plätze des Magazins unter dem Linearantrieb referenziert.

Das Hauptprogramm ist zum einen für den Aufruf der Initialisierungsroutine beim Start verantwortlich. Darüber hinaus läuft hierüber auch die Kommunikation mit dem Überwachungsroboter. Dieser bekommt die Information über freie Magazinplätze und bevorratete Sensorsonden übermittelt und fordert bei Bedarf das Absetzen oder Einholen einer Sensorsonde an. In diesem Fall startet das Hauptprogamm die entsprechende Funktion und liefert den jeweiligen Vorgangsstatus an den Überwachungsroboter zurück.

Der gesamte Aufbau der Ausbringeinheit montiert auf dem Überwachungsroboter Secur-O-bot mit bevorrateten Sensorsonden ist in Abbildung 6.7 gezeigt.



Abbildung 6.7: Demonstrator der Ausbringeinheit mit Sensorsonden im Magazin ohne Hülle (Links), Ausbringeinheit mit Hülle bei einem Absetzvorgang jeweils montiert auf dem Überwachungsroboter Secur-O-bot (Rechts).

#### 6.3 Aufbau der Simulationsumgebung

Die in Kapitel 5.3 ausgewählten Ausbringstrategien sind zwar für den vorliegenden Anwendungsfall angepasst, jedoch noch nicht optimiert worden. Für die Optimierung ist es erforderlich, dass die Ergebnisse der jeweiligen Parameterkombinationen miteinander verglichen werden können, also quantifizierbar sind. Die das Ergebnis bestimmenden Messgrößen werden in Kapitel 7.1.4 vorgestellt. Die exakte Ermittlung ist bei realen Experimenten jedoch für jede dieser Größen nur mit erheblichen Aufwand möglich. Da bei der Optimierung eine Vielzahl von Parameterkonfigurationen und Vorgehensweisen gegeneinander verglichen werden müssen, ist auch eine Vielzahl von Experimenten nötig. Um den Aufwand und die Dauer für die Experimente zu reduzieren, wurde eine Simulationsumgebung geschaffen. Dies ermöglicht auch eine exaktere Bestimmung der Ergebnisse beim Vergleich der beiden Ausbringstrategien gegeneinander. Für die Umsetzung der Simulationsumgebung wird Matlab verwendet, da auch die Ausbringstrategien in Matlab entwickelt wurden. Somit ist eine einfache Anbindung gewährleistet. Die Entwicklung dieser Simulationsumgebung ist nachfolgend beschrieben.

## 6.3.1 Anforderungen

Es werden folgende Anforderungen an die Simulationsumgebung gestellt:

- Darstellen von beliebigen Objekten durch Polygone
  - Bei der Umgebungsdarstellung ist die Nachbildung von sicht- und ggf. funkbehindernden Objekten wie Wänden, Türen und Hindernissen wichtig.
- Simulation von Sensoren
  - Unterschiedliche Sensoren müssen von ihrer Charakteristik her vereinfacht nachgebildet werden können. Die Positionierung dieser idealisierten Sensoren muss in der oben erwähnten Umgebungsdarstellung möglich sein.
- Berechnung der abgedeckten Fläche
  - Die Fläche, die von den eingebrachten Sensoren abgedeckt wird, muss von der Simulationsumgebung berechnet werden können. Eine Unterscheidung nach Fläche eines einzelnen Sensors und resultierender Gesamtfläche von allen Sensoren soll für mögliche Optimierungsverfahren ebenfalls realisierbar sein.
- Berechnung des abgedeckten Perimeters
  - Neben der Fläche ist der von den Sensoren überstrichene Perimeter von der Simulation zu bestimmen. Diese Anforderung bedingt gleichzeitig, dass die Simulation eine Unterscheidung zwischen Perimeter und Objekten bzw. Hindernissen ermöglicht. Auch beim Perimeter ist eine Betrachtung pro Sensor und eine Gesamtbetrachtung vorzusehen.
- Priorisierung von Flächen und Perimetern
  - Es soll möglich sein, unterschiedliche, von Polygonen begrenzte Flächen mit verschiedenen Prioritäten zu versehen. Gleiches soll für die Perimeter möglich sein.

#### 6.3.2 Vereinfachungen

Für die vorliegende Arbeit werden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Beschränkung auf 2D
  - Da in dieser Arbeit nur zweidimensionale Ausbringstrategien betrachtet werden, muss auch die Simulationsumgebung lediglich zweidimensional ausgeführt werden. Geländeneigungen werden ebenso wie Treppen nicht berücksichtigt.
- Vereinfachte Sensordarstellung
  - Da die betrachteten Ausbringstrategien auf sichtfeldbasierte Sensoren ausgelegt sind, wird ein vereinfachtes Sensormodell angenommen. Ein Sensor wird durch seine

Reichweite und seinen Öffnungswinkel charakterisiert. Da die betrachteten Ausbringstrategien keine Abschwächung am Rand des Sensorbereiches berücksichtigen, wird eine scharfe Begrenzung des Sensorbereiches gewählt. Es ergibt sich somit eine Kreisausschnittdarstellung der Sensoren.

## 6.3.3 Darstellung der Umgebung

Wie in Kapitel 5.3.1 gefordert, wird die Umgebung mittels Polygonen abgebildet. Um die spätere Berechnung der abgedeckten Grenzlinie zu erleichtern, wird zwischen zwei Polygonarten unterschieden:

• Begrenzungspolygone

Zu Begrenzungspolygonen werden Begrenzungen wie Außenwände und Zäune, aber auch innen liegende Zugangspunkte wie Aufzugstüren, Treppenauf- und -abgänge und Zugangsschächte gezählt.

• Hindernispolygone

Zu Hindernispolygonen zählen alle restlichen, die Umgebung charakterisierenden Objekthüllkurven. Eine Unterscheidung zwischen inneren Wänden und Hindernissen ist nicht erforderlich.

Die Polygone werden als separate Listen in Matlab abgelegt. Von den jeweiligen Eckpunkten der Polygone werden die x und y Koordinaten gespeichert. Zur einfacheren Unterscheidung von zusammengehörigen Polygonen und einer somit möglichen Priorisierung von Bereichen wird jedes Polygon als separate Liste gespeichert.

Die vektorielle Darstellung und die entsprechende Umgebung sind in Abbildung 6.8 exemplarisch dargestellt.

# 6.3.4 Darstellung der Sensoren

Ausgehend von der getroffenen Vereinfachung der Sensordarstellung werden Sensoren durch zwei Werte charakterisiert:

- α: Öffnungswinkel des Sensors
- r: Reichweite des Sensors

Für die Positionierung werden noch die Koordinaten der Sensorposition sowie der Winkel der Hauptachse des Sensors in Relation zum Umgebungskoordinatensystem benötigt:

- x: x-Koordinate
- y: y-Koordinate
- ω: Winkel der Sensorhauptachse

Für eine Unterscheidung verschiedener Sensortypen wird eine Identifikationsnummer vorgesehen:

• ID: Typ des Sensors

Die vektorielle Darstellung der Sensoren und die dazugehörige Visualisierung sind in Abbildung 6.9 dargestellt.



Abbildung 6.8: Vektorielle Darstellung einer Umgebung (links) und eines Hindernisses (Mitte) sowie die resultierende grafische Visualisierung (rechts).

# 6.3.5 Berechnung der abgedeckten Fläche

Zunächst wird für jeden Sensor die abgedeckte Fläche berechnet. Da zwischen Sensor und zu detektierendem Objekt eine Sichtverbindung bestehen muss, müssen Okklusionen durch Hindernisse und bauliche Strukturen ermittelt werden. Zunächst wurde als mögliches Verfahren Raytracing (Glassner, 1989) getestet. Hierbei wird der Sichtkegel der Sensoren in einen Fächer von einzelnen Strahlen umgewandelt. Als nächstes werden Schnittpunkte zwischen diesen Strahlen und den Hindernissen und der Umrandung bestimmt. Der jeweils am nächsten am Sensormittelpunkt auf einem Strahl liegende Schnittpunkt markiert einen neuen Punkt des resultierenden Sensorpolygons.

Durch die Verwendung von einzelnen Strahlen ist das Ergebnis der Berechnung mit einem Diskretisierungsfehler behaftet, wobei der Fehler mit zunehmendem Abstand vom Sensor größer wird. Da die Komplexität der Berechnung O(n) beträgt, ist eine Verringerung des Fehlers linear mit der Berechnungsdauer verknüpft.

Um den Forderungen F2 Schnelle Berechnung und F3 Einfache Skalierbarkeit gerecht zu werden, wurde ein geometrisches Verfahren entwickelt. Dieses Verfahren bietet gleichzeitig eine genauere Berechnung, da keine Diskretisierung vorgenommen wird. Das Verfahren basiert auf der Subtraktion von Flächen. Hierfür wurde das Modul "Polygon\_Clipper" von Sebastian Hölz (Hölz, 2006)



eingebunden. Es berechnet für zwei Polygone unter anderem die Differenzfläche. Ein Beispiel ist in Abbildung 6.10 gegeben.

Abbildung 6.9: Vektorielle Darstellung der Sensoren und der Positionierung (Oben), korrespondierende Visualisierung (Unten).



Abbildung 6.10: Flächendifferenz (schraffiert) zwischen Kreis und Rechteck mit Polygon\_Clipper

Zur Nutzung der Flächendifferenz für die Ermittlung des Sichtbarkeitsbereichs der Sensoren müssen zunächst die Abschattungsbereiche der Hindernisse ermittelt werden, da diese bei einer reinen Differenzbildung zwischen Sensorerfassungsbereich und Hindernis nicht berücksichtigt werden. Der Kegel der Abschattung geht immer von den für den Sensor äußersten Punkten des Hindernisses aus. Mit dem Mittelpunkt des Sensors  $M = (x_0, y_0)$  und dem Hindernispolygon  $H = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \end{pmatrix}$  ergibt sich  $w = (\delta_1 \dots \delta_n)$  mit  $\delta_i = \tan^{-1} \frac{H(2,i)-y_0}{H(1,i)-x_0}$ . Mit  $\delta_k = min(w)$  und  $\delta_l = max(w)$  ergeben sich diese äußersten Punkte zu H(k) und H(l). Verlängert man die Strecken

 $\overline{MH(k)}$  und  $\overline{MH(l)}$  um die Sensorreichweite r, so erhält man die Punkte  $\dot{h}_k$  und  $\dot{h}_l$ . Das Hindernispolygon mit Abschattungsbereich lautet dann  $\dot{H} = (\dot{h}_k \quad H(k) \quad \dots \quad H(l) \quad \dot{h}_l)^T$ . Ein grafisches Beispiel ist in Abbildung 6.11 gegeben.



Abbildung 6.11: Abschattungspolygon H' (dunkelgrau) zu Hindernispolygon H (weiß) und Sensorposition M (rot: resultierender Erfassungsbereich).

Sind die Abschattungspolygone aller n Hindernisse bekannt, ergibt sich der durch die Hindernisse resultierende Erfassungsbereich des Sensors  $\hat{S}$  aus dem ursprünglichen Sensorpolygon S wie folgt:

 $\hat{S} = S \setminus \bigcup_{i=1}^{n} \hat{H}_i$  6-1

Abschließend ist das Begrenzungspolygon B zu berücksichtigen. Da sich die Sensoren innerhalb dieses Polygons befinden, reicht die Bildung der Schnittmenge zur Bestimmung des Erfassungsbereichs E.

$$E = \bigcap \hat{S}, B$$
 6-2

Das Resultat der Berechnung ist in Abbildung 6.12 für einen 360°-Sensor und eine Reihe von Hindernissen beispielhaft dargestellt.



# Abbildung 6.12: Resultierende Erfassungsfläche (hellgrau) eines 360°-Sensors (Kreuz) in einer Büroumgebung (dunkelgrau: Innenwände und Hindernisse, gestrichelte Linien: Perimeter)

Das entwickelte Verfahren hat den Vorteil, dass die Abschattungspolygone der einzelnen Hindernisse unabhängig voneinander berechnet werden können, was eine Parallelisierung der Berechnung und somit eine Beschleunigung ermöglicht.

Ausschlaggebend für das Gesamtergebnis ist jedoch die resultierende Fläche aller Sensoren. Hierbei gilt es auszuschließen, dass mehrfach abgedeckte Flächen, mehrfach gewertet werden. Bei der Umsetzung dieser Aufgabe wurde das Modul "Polygons\_Intersection" von Guillaume Jacquenot (Jacquenot, 2008) verwendet, welches sich überlappende Polygone in Überlappungs- und Nichtüberlappungsbereiche aufteilt und für die einzelnen Bereiche die Fläche berechnet. Die Summe aller Teilflächen liefert dann das Gesamtergebnis.

# 6.3.6 Berechnung der abgedeckten Grenzlinie

Für die Berechnung der abgedeckten Grenzlinie wird zunächst ein Zwischenschritt in der Berechnung der Erfassungsbereiche E eingeführt. Nach der Berechnung des durch Hindernisse resultierenden Erfassungsbereiches  $\hat{S}$  wird dieser zunächst mit dem Begrenzungspolygon geschnitten. Mittels dieser Schnittpunkte lassen sich die Bereiche des Begrenzungspolygons ermitteln, die vom Sensor abgedeckt werden. Diese Abdeckungspolygone werden je Sensor gespeichert. Für die Berechnung der gesamt abgedeckten Grenzlinie werden alle Abdeckungspolygone vereinigt und die Länge des resultierenden Polygons errechnet.

# 6.3.7 Ergebnis

Der fertige Simulator ist in der Lage, für eine beliebige Umgebung, bestehend aus einem Begrenzungspolygon und Hindernispolygonen, eine beliebige Anzahl von platzierten Sensoren zu visualisieren und sowohl die gesamte, von den Sensoren abgedeckte Fläche als auch die gesamte, abgedeckte Grenzlinienlänge zu bestimmen. Als Beispiel werden die folgenden vier Sensoren

x	У	ω	r	α	ID
0	-5	90°	12	180°	1
6	0	180°	7	90°	2
-6	0	0°	4	90°	3
0	5	-45°	8	45°	4

in einer Büroumgebung platziert. Die Visualisierung und die resultierenden Werte sind in Abbildung 6.13 dargestellt.



Abbildung 6.13: Visualisierung und resultierende Werte einer Simulation mit 4 Sensoren in einer Büroumgebung.

## 6.4 Demonstrator Überwachungsroboter

Der für die praktischen Versuche verwendete Überwachungsroboter ist der in Kapitel 2.2.3 beschriebene und in Abbildung 6.7 dargestellte Secur-O-bot. Dieser mobile Roboter verfügt über einen eigenen Rechner, der den Roboter gemäß vorgegebener Karten und Überwachungsprogramme steuert. Dies ermöglicht die autonome Funktionalität des Roboters. Der Bediener kann die Kontrolle des Roboters jederzeit mit einem Bedienrechner über das Netzwerk übernehmen. Ein Benutzerinterface ermöglicht das Einlernen von Umgebungskarten, die Vorgabe von Routen und Wegpunkten sowie Sensortasks wie die Aufnahme von Bildern oder Videosequenzen. Ablaufskripte können ebenfalls programmiert werden, z.B. dass die Wahl der nächsten Route von einem Sensorinput abhängig gemacht wird oder dass unter bestimmten Bedingungen Sensorsonden wieder eingeholt werden. Eine Darstellung der Benutzerschnittstelle ist in Abbildung 6.14 zu sehen.

Für die Experimente wurde die Ausbringeinheit auf der Ladefläche von Secur-O-bot befestigt. Mittels eines Plug-Ins in die Benutzerschnittstelle kann der Bediener Positionen für das Absetzen von Sensorsonden definieren. Über dasselbe Plug-In werden auch die Positionen von den Ausbringstrategien an den Roboter übermittelt.



Abbildung 6.14: Benutzerschnittstelle des Überwachungsroboters Secur-O-bot. Großes Fenster links: Navigationskarte mit aktueller Position, Laserscan und geplantem Pfad - Fenster rechts: Aktuelles Kamerabild.

# 7 Optimierung und Bewertung der Ausbringstrategien

Im Nachfolgenden werden die in Kapitel 5.3 konzipierten Ausbringstrategien optimiert und miteinander verglichen. Die Einsatzfälle für den realen Test werden als erstes beschrieben. Um einen Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den realen Testläufen vornehmen zu können, werden diese Einsatzfälle auch in der Simulation nachgebildet. Als nächster Schritt werden die Messgrößen für den Vergleich der Ausbringstrategien definiert, sowie der Parameterraum für die Simulation. Die Ergebnisse der Simulation werden im Anschluss vorgestellt und diskutiert. Als letzter Schritt werden die Ergebnisse der realen Tests vorgestellt und der Vergleich mit den Ergebnissen aus der Simulation vorgenommen.

# 7.1 Beschreibung der Einsatzfälle

Für die Tests in Simulation und in realer Umgebung werden drei Anwendungsszenarien verwendet. Grundlage bilden die in Kapitel 2.3 identifizierten Einsatzfälle Fertigungshalle (Einsatzfall 1), Bürogebäude (Einsatzfall 2) und Lagerhalle (Einsatzfall 3). Bei allen Anwendungsszenarien wird ausschließlich der Innenbereich betrachtet, wie bereits in Kapitel 2.3.3 festgehalten wurde.

# 7.1.1 Fertigungshalle mit Foyer

Der erste Fall umfasst eine Versuchshalle mit Fertigungsmaschinen. Angegliedert an diese Halle gibt es einen Flur, der zu einem Eingangsbereich führt. In den Eingangsbereich münden ein offener Treppenauf- und -abgang sowie zwei Fahrstuhltüren. Zwischen der Halle und dem Eingangsbereich befinden sich Zwischentüren, welche für die Versuche permanent geöffnet werden. Zum resultierenden Bereich führen drei externe Zugänge: Der Haupteingang zum Foyer, ein Nebeneingang zu einem Verbindungsflur und ein Zugangstor zur Halle. Interne Zugänge bilden der Treppenauf- und -abgang, der Fahrstuhl im Foyer, zwei Zugangstüren im Foyer, eine Zugangstür zur Halle sowie ein Lastenaufzug in die Halle. Bilder der Umgebung sind in Abbildung 7.1 zu sehen, die entsprechende Umgebung im Simulator in Abbildung 7.2.



Abbildung 7.1: Links: Ansicht der Fertigungshalle, Rechts: angegliedertes Foyer.



Abbildung 7.2: Darstellung der Fertigungshalle und des Foyers in der Simulationsumgebung. Alle Eingangstüren sowie Fenster gehören zum externen Perimeter. Zugänge von anderen Etagen gehören zum internen Perimeter.

Analog zum ersten Fall werden alle internen wie externen Zugänge zum primären Perimeter zusammengefasst. Auch die Fenster werden dem primären Perimeter zugeordnet. Ein sekundärer Perimeter ist nicht vorgesehen. Die Aufgabe besteht wie im ersten Fall vorrangig in der Perimetersicherung.

# 7.1.2 Bürogebäude

Im zweiten Fall wird eine typische Büroetage als Einsatzfall gewählt. Es gibt mehrere Büroräume, vier sternförmig angeordnete Flure, Toiletten, Technikräume, eine Küche, einen Kopierraum und einen Raum für die IT-Infrastruktur. Im Zentrum befindet sich der selbe Treppenauf- und -abgang wie im ersten Fall. Gleiches gilt für die Aufzugstüren. Die Büroetage ist nicht ebenerdig gelegen und verfügt somit zusätzlich über eine außenliegende Feuertreppe, die über eine Tür zugänglich ist. Ein Bild der Büroetage ist in Abbildung 7.3 zu sehen, in Abbildung 7.4 ist die entsprechende Umgebung in der Simulation dargestellt. Da die genannten Zusatzräume bis auf den Serverraum für eine Überwachung unerheblich sind, werden sie nicht aktiv in selbige eingebunden und sind daher in Abbildung 7.4 nicht als zugängliche Räume eingetragen.

#### Kapitel 7 Optimierung und Bewertung der Ausbringstrategien

Der Einsatzfall beinhaltet vorrangig die Perimetersicherung sowie die Sicherung des Serverraumes. Als sogenannter primärer Perimeter werden zunächst alle externen Zugangsmöglichkeiten wie Fenster oder die Tür zur Feuertreppe und alle internen wie Treppenauf- und -abgang und Aufzugtüren definiert. Zur Sicherung des Serverraums wird dessen Zugangstür eine höhere Priorität zugewiesen. Werden die möglichen Konfigurationen der Umgebung betrachtet, unterscheiden diese sich vor allem darin, dass Bürotüren entweder geöffnet oder geschlossen sind. Ist eine Bürotür geschlossen, so kann der dahinter liegende Perimeter nicht mehr erfasst werden und der Raum fällt aus dem für den Überwachungsroboter zugänglichen Bereich heraus. In diesem Fall wird die Bürotür als Teil des Perimeters des restlichen Areals gewertet. Um nicht für jede mögliche Permutation von geschlossenen und geöffneten Bürotüren eine neue Bewertung der Situation vornehmen zu müssen, werden alle Bürotüren in den sogenannten sekundären Perimeter aufgenommen. Dieser bekommt ein geringeres Gewicht als der primäre. Dies bedeutet, dass eine Sensorsonde immer noch vorrangig den primären Perimeter absichern soll, es aber auch sinnvoll ist, wenn eine Sonde so viel wie möglich vom sekundären Perimeter in Reichweite behält.



Abbildung 7.3: Bild der für die Tests verwendeten Büroetage. Blick auf die internen Perimeter Aufzug und Treppenauf- und -abgang.



Abbildung 7.4: Abstrahierte Büroetage in Simulationsumgebung.

# 7.1.3 Lagerhalle

Im dritten Fall handelt es sich um eine große Halle, in der Exponate gelagert werden. Die ebenerdige Halle verfügt über ein Tor für Anlieferungen, zwei externe Zugänge und keine Fenster in den Wänden. Es gibt einen internen Zugang von einer angrenzenden Halle sowie einen Fahrstuhlzugang. Sämtliche Zugänge werden als primärer Perimeter definiert. Als sekundärer Perimeter werden die internen Zugänge zu Laboren definiert. Bilder der Umgebung sind in Abbildung 7.5 zu sehen, die entsprechende Darstellung im Simulator in Abbildung 7.6. Primäre Aufgabe ist wieder die Sicherung des Perimeters.



Abbildung 7.5: Ansichten der Lagerhalle für Exponate.



Abbildung 7.6: Darstellung der Lagerhalle in der Simulationsumgebung. Die markierten Stellen bezeichnen die Blickpunkte für die Ansichten in Abbildung 7.5.

# 7.1.4 Definition eines Benchmarks

Für den späteren Vergleich der Ausbringstrategien muss zunächst ein Benchmark definiert werden, der eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet. Als erste Messgröße dient die Erfüllung der vorgegebenen Zielgröße. Da es wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben vier Hauptszenarien für den Einsatz von Sensorsonden gibt, unterscheidet sich je nach Szenario auch die Zielgröße wie in Tabelle 7.1 beschrieben.

In allen Fällen kann es sich bei der in der Zielgröße beschriebenen Abdeckung sowohl um die Perimeter- als auch um die Blanket-Coverage handeln. Die jeweils andere Abdeckung kann bei den Hauptszenarien S2, S3 und S4 als weiterer Indikator für den Vergleich der Ausbringstrategien herangezogen werden. Zur besseren Unterscheidung werden sie als primäre und sekundäre Zielgröße bezeichnet. Bei Hauptszenario S1 hingegen gibt es nur eine Zielgröße.

Szenario	Zielgröße
S1 100% AbdeckungS2 X% Abdeckung	In beiden Fällen ist eine möglichst niedrige Anzahl von Sensorsonden zur Erreichung der jeweiligen Abdeckung das Ziel. Die Messgröße ist in beiden Fällen die Zahl der verwendeten Sensorsonden.
S3 Maximale Abdeckung bei n Sonden	Im dritten Hauptszenario geht es um den möglichst ef- fektiven Einsatz einer begrenzten Anzahl von Sensor- sonden. Damit die Messgröße von der jeweiligen Ein- satzumgebung unabhängig bleibt, wird das Verhältnis zwischen erreichter Abdeckung und der Gesamtmenge verwendet.
S4 Bestes Verhältnis von Sonden zu A bdeckung	Im vierten Hauptszenario soll der größte Nutzen mit geringstem Einsatz ermittelt werden. Als unabhängige Messgröße wird das beim dritten Szenario beschriebene Verhältnis durch die Anzahl der eingesetzten Sonden dividiert.

Tabelle 7.1: Beschreibung der Zielgrößen der vier Hauptszenarien und die jeweilige Messgröße für den Benchmark.

In allen Fällen kann es sich bei der in der Zielgröße beschriebenen Abdeckung sowohl um die Perimeter- als auch um die Blanket-Coverage handeln. Die jeweils andere Abdeckung kann bei den Hauptszenarien S2, S3 und S4 als weiterer Indikator für den Vergleich der Ausbringstrategien herangezogen werden. Zur besseren Unterscheidung werden sie als primäre und sekundäre Zielgröße bezeichnet. Bei Hauptszenario S1 hingegen gibt es nur eine Zielgröße.

In Kapitel 4.3.1 wird für die Hauptszenarien S2 bis S4 noch die Möglichkeit der Priorisierung von Bereichen angesprochen. Für den Benchmark ist es in diesem Falle wichtig, die prozentuale Abdeckung der unterschiedlichen Bereiche zu berücksichtigen. Hierbei wird für die Vergleichbarkeit die jeweilige Gewichtung der Bereiche mit in die Berechnung aufgenommen. Analog zu 1-1 und 1-5 zur Berechnung der Fitness von Individuen wird die primäre Zielerfüllung mit *s* unterschiedlichen Bereichen der Größe  $C_{i,ges}$ , den jeweiligen Gewichten  $g_i$  und der erreichten Abdeckung  $C_i$  für den Benchmark wie folgt berechnet:

$$Z_P = \frac{\sum_{i=1}^{s} C_i * g_i}{\sum_{i=1}^{s} C_{i,ges} * g_i}; \{g_i \in R^+\}$$
7-1

Da keine Vermischung der Hauptszenarien vorgesehen ist, wird die Priorisierung immer nur bei der primären Zielerfüllung berücksichtigt.

Als letztes Kriterium wird die Berechnungsdauer der Ausbringstrategien in den Benchmark aufgenommen. Dies trägt der Forderung F2 Schnelle Berechnung in Kapitel 4.3.1 Rechnung. Der Benchmark besteht somit aus den folgenden drei Kriterien:

- 1. Erfüllung der primären Zielgröße
- 2. Erfüllung der sekundären Zielgröße, sofern vorhanden
- 3. Dauer der Berechnung

Zur Vergleichbarkeit werden allen Ergebnissen des Benchmarks noch die Randparameter beigefügt. Diese beinhalten, sofern vorhanden:

- Verwendeter Einsatzfall
- Verwendetes Szenario
- Anzahl der zur Verfügung stehenden Sonden

Bei allen Berechnungen der Simulation wird derselbe PC verwendet, um die Vergleichbarkeit der Berechnungsdauer zu gewährleisten.

# 7.2 Experimentelle Verifikation und Benchmark in simulierten Beispielszenarien

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 5.3 konzipierten Ausbringstrategien zunächst an den in Kapitel 7.1 definierten Einsatzfällen in der Simulationsumgebung getestet. Dies soll auf der einen Seite einen quantitativen Vergleich zwischen den Strategien ermöglichen, der aufgrund der großen Zahl an Testfällen mit den realen Tests nicht möglich ist, zum anderen können die in Kapitel 5.3 diskutierten Parameter und Vorgehensmöglichkeiten der jeweiligen Ausbringstrategie einzeln getestet und optimiert werden. Die Einsatzfälle werden mit zwei unterschiedlichen Konfigurationen von Sensorsonden simuliert. Zum einen mit einem Öffnungswinkel  $\alpha = 360^{\circ}$  und einem Radius r = 12 m, nachfolgend Konfiguration 1 genannt, zum anderen mit  $\alpha = 90^{\circ}$  und r = 30 m, nachfolgend als Konfiguration 2 bezeichnet. Ersteres entspricht einem typischen Passiv-Infrarot-Bewegungsmelders letzteres einer Kamera mit Weitwinkelobjektiv. Für die Simulation wird Hauptszenario S3 verwendet, da dieses leicht mit dem realen Demonstrator verglichen werden kann. Als weitere Vergleichsmöglichkeit werden die drei Beispielszenarien noch für den Einsatz eines Überwachungsroboters mit und ohne Sensorsonden bewertet.

# 7.2.1 Genetischer Algorithmus zur Positionierung der Sensorsonden

Für den in Kapitel 5.3.1 vorgestellten genetischen Algorithmus wird  $(\mu + \lambda)$  als Vermehrungsart sowie Cross-Over auf Chromosomenebene gewählt. Bezüglich der Parameter gibt es die Wahrscheinlichkeit  $p_c$ , beim Cross-Over von einem oder vom anderen Elternteil die Informationen zu erhalten, die anfängliche Mutationsrate  $p_{M,0}$ , die Werte für  $\mu$  und  $\lambda$ , die maximale Anzahl von Generationen  $G_{max}$  und das Abbruchkriterium  $\varepsilon$ .

Die verschiedenen sich aus Vermehrungsart und Cross-Over-Variante ergebenden Parametersätze werden nachfolgend mit dem in Tabelle 7.2 angegebenen Parameterraum simuliert, um die optimale Konfiguration des genetischen Algorithmus für den Vergleich mit dem Gridkartenansatz zu ermitteln. Da es sich bei den genetischen Algorithmen nicht um ein deterministisches Verfahren handelt, werden je Kombination 12 Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse statistisch ausgewertet.

Der verwendete Parameterraum erzeugt 50.000 verschiedene Kombinationen von Parametern. Mit den jeweils 12 Durchläufen ergeben sich daraus 600.000 Simulationen. Der Hauptteil der Berechnung wird für die Bestimmung der Fitness von neuen Sensorpositionen und -orientierungen benötigt. Wie in Kapitel 5.3.1.4 erwähnt, wird für die Rekombination nur Chromosomen-Cross-Over verwendet. Die Anzahl neu zu berechnender Positionen und Orientierungen pro Generation hängt also nur von  $p_{M,0}$  und nicht zusätzlich von  $p_c$  ab. In den 600.000 Simulationen müssen ca. 1,3065 \* 10<sup>9</sup> neue Positionen berechnet werden. Zum Vergleich: Wird die Rekombination auf Parameteroder Bitebene durchgeführt, hängt die Anzahl der benötigten Fitnessberechnungen zusätzlich von  $p_c$  ab. Dies würde zu ca. 3,5565 \* 10<sup>9</sup> Berechnungen führen.

Parameter	p <sub>c</sub>	$p_{M,0}$	μ	λ	G <sub>max</sub>	3
Min.	0.3	0.05	20	20	50	1%
Max.	0.7	0.5	100	100	200	5%
Schrittweite	0.1	0.05	20	20	50	1%

 Tabelle 7.2:
 Wertebereich der Parameter f

 Generation

 in Simulation.
 Simulation

Aus Gründen der Aufwandsreduktion werden die Simulationen zur Bestimmung der optimalen Parameter in zwei Abschnitte unterteilt. Zunächst werden die optimalen Werte für  $p_c$  und  $p_{M,0}$  bestimmt. Da genetische Algorithmen bei größerer Anzahl von Individuen und Generationen tendenziell besser konvergieren, werden die Werte für  $\mu$ ,  $\lambda$  und  $G_{max}$  auf die in Tabelle 7.2 angegebenen Maximalwerte gesetzt. Das Abbruchkriterium  $\varepsilon$  wird zunächst deaktiviert. In diesem ersten Schritt werden insgesamt ca.  $3,42 \times 10^6$  Fitnessberechnungen benötigt. Zum Vergleich: Bei Parameter-oder Bitebenenrekombinationen wären es ca.  $9,42 \times 10^6$  Neuberechnungen.

Die optimalen Werte für  $p_c$  und  $p_{M,0}$  werden im zweiten Schritt zur Ermittlung der optimalen Werte für  $\mu$  und  $\lambda$  herangezogen. Abhängig vom optimalen Wert für  $p_{M,0}$  werden in diesem Schritt zwischen ca.  $4,29 * 10^5$  und  $3,669 * 10^6$  Fitnessberechnungen benötigt. Für die Bestimmung von  $G_{max}$  und  $\varepsilon$  werden anschließend die Ergebnisplots herangezogen, wodurch diese Werte nicht notwendig simuliert werden müssen.

Durch die Aufteilung der Simulation in zwei Abschnitte – Ermittlung optimaler Werte für  $p_c$  und  $p_{M,0}$  anschließend Ermittlung optimaler Werte für  $\mu$  und  $\lambda$  – kann der Rechenaufwand von ca. 1,3065 \* 10<sup>9</sup> auf maximal 7,089 \* 10<sup>6</sup> Neuberechnungen reduziert werden. Diese Aufwandsreduktion ist umso wichtiger, als dass die Simulationen für alle drei in Kapitel 7.1 beschriebenen Einsatzfälle durchgeführt werden müssen.

# 7.2.2 Gridkartenansatz mit Greedy-Algorithmus zur Sensorsondenpositionierung

Der in Kapitel 5.3.2 vorgestellte Gridkartenansatz wird über drei Parameter definiert:

- $\Delta d$  Abstand der Flächengridpunkte bzw. der Sondenpositionen
- $\Delta l$  Abstand der Punkte des Perimetergrid
- $\Delta \omega$  Diskretisierung der Drehung der Sondenausrichtung

Die Werte für  $\Delta d$  und  $\Delta \omega$  bestimmen maßgeblich die Laufzeit des Algorithmus. Wie in Kapitel 5.3.2.1 dargestellt, wird  $\Delta l$  lediglich zur Vermeidung von mehrfach gewerteten, abgedeckten Perimetern verwendet und trägt somit nur unwesentlich zur Laufzeit des Algorithmus bei, wohl aber zur Qualität des Ergebnisses. Aus diesem Grund wird der Wert für  $\Delta l$  in der nachfolgenden Optimie-

rung konstant auf einen Wert von 1 cm gesetzt. Die zur Ermittlung der optimalen Konfiguration des Gridkartenansatzes verwendeten Werte für die beiden anderen Parameter sind in Tabelle 7.3 angegeben. Anders als bei der Verwendung eines genetischen Algorithmus liefert der Gridkartenansatz bei gleichen Ausgangsbedingungen immer dasselbe Ergebnis. Daher muss pro Parametersatz nur jeweils eine Simulation durchgeführt werden.

Tabelle 7.3: Werte der Parameter  $\Delta d$  und  $\Delta \omega$  für die Optimierung des Gridkartenansatzes mit Greedy-Algorithmus in Simulation.

Parameter					
$\Delta d/[m]$	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$\Delta \omega / [^{\circ}]$	3.6	7.2	14.4	18	36

Aufgrund der lediglich geringeren Anzahl von Parametern im Vergleich zum Genetischen Algorithmus und der Tatsache, dass jede Parameterkombination nur einmal simuliert werden muss, können hier alle 25 verschiedenen Parameterkombinationen mittels Simulation getestet und verglichen werden. Darüber hinaus ist im Falle von Sensorkonfiguration 1, also bei 360°-Öffnungswinkel keine Auswertung unterschiedlicher Werte für  $\Delta \omega$  nötig. In diesem Fall reduziert sich der Simulationsaufwand auf die 5 Werte für  $\Delta d$ .

# 7.2.3 Quantifizierung der zusätzlichen Überwachungsleistung durch Sensorsonden

Neben dem Vergleich der beiden Ausbringstrategien untereinander soll der Einsatz von Sensorsonden auch mit dem Einsatz eines Überwachungsroboters ohne diese Erweiterung untersucht werden. Um hier eine Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen der Simulationen der Ausbringstrategien zu erreichen, wird die mittlere Abdeckung von Perimeter bzw. Fläche, im Folgenden mittlere Fitness genannt, durch die Sensoren eines Überwachungsroboters betrachtet. Zu deren Berechnung wird zunächst eine Trajektorie ermittelt, von welcher aus die Sensoren des Roboters mindestens einmal jeden Perimeter und jede Fläche des Überwachungsareals abdecken. Hilfreich zur Bestimmung dieser Trajektorie sind die Sichtbarkeits- bzw. Überlappungsflächen, welche in Kapitel 5.3.1.2 eingeführt wurden. Sei T die Menge der Punkte (x, y) auf einer Trajektorie und  $A_{S,i}$  die i-te von  $n_s$ Sichtbarkeitsflächen, so kann von der Trajektorie aus jeder Perimeter mindestens einmal gesehen werden, wenn gilt:

$$\forall i \in M \ \exists (x, y) \in T: (x, y) \in A_{S,i};$$
 7-2

mit

$$M = \{i | 1 \le i \le n_s; i \in \mathbb{N}\}$$
7-3

Nutzt man zusätzlich die Überlappungsflächen bei der Trajektorienbestimmung, erhält man in den meisten Fällen einen optimierten Verlauf. Ähnlich wie beim Greedy-Verfahren wird zunächst die Überlappungsfläche mit den meisten Sichtbarkeitsflächen gewählt, also  $n_{\ddot{u}} = n_{\ddot{u},max}$ . Diese Sichtbarkeitsflächen werden dann bei den verbleibenden Überlappungsflächen ausgeblendet und aus diesen erneut jene mit den meisten Sichtbarkeitsflächen, also  $n_{\ddot{u}} = n_{\ddot{u},max}$  gewählt. Dieser Vorgang wird durchgeführt, bis  $n_{\ddot{u},max} = 0$  gilt. Damit ist sichergestellt, dass Bedingung 7-2 erfüllt ist.

Anhand dieser Trajektorie kann nun die mittlere Fitness berechnet werden. Sei  $n_{\ddot{u},GREEDY}$  die Anzahl der im vorangegangenen Schritt bestimmten Überlappungsflächen,  $l_{\ddot{u}}$  die Länge der Trajektorie durch Flächen mit der Überlappungsmenge  $n_{\ddot{u}}$  und  $F_P(A_{\ddot{U}})$  die erreichbare Fitness von einem Punkt innerhalb der Überlappungsfläche  $A_{\ddot{U}}$  nach 5-20, so ergibt sich die mittlere Fitness als:

$$F_m = \frac{\sum_{\ddot{\mathbf{u}}=0}^{n_{\ddot{\mathbf{u}}}, GREEDY} F_P(A_{\ddot{\mathbf{u}}}) * l_{\ddot{\mathbf{u}}}}{l_{ges}}$$
7-4

Anhand dieser Kriterien werden je Einsatzfall eine kurze und eine lange Trajektorie zufällig ausgewählt. Die kurzen Trajektorien haben nur geringe Überschneidungen mit den einzelnen Überlappungs- und Sichtbarkeitsflächen, die langen führen explizit durch jeden relevanten Raum. Dies soll klären, ob die Länge und der Verlauf der Trajektorie einen Einfluss auf die mittlere Abdeckung  $F_m$ hat, solange die oben genannten Kriterien eingehalten werden. Die zum einmaligen Abfahren der Trajektorie benötigte Zeit ist für den vorliegenden Vergleich von geringem Interesse. Sie kann in späteren Betrachtungen jedoch als qualitatives Maß für die Chance, unbemerkt einzudringen, herangezogen werden.

Die mittlere Abdeckung wird auch für die Bewertung der Verbesserung durch den Einsatz von Sensorsonden herangezogen. Damit Mehrfachabdeckungen durch Sonden und Überwachungsroboter die Berechnung nicht verfälschen, wird der bestehenden Fitnessberechnung einer Sensorsondenmenge die jeweilige Roboterposition  $R_T$  und Sensorkonfiguration des Überwachungsroboters hinzugefügt. Die Positionen werden entlang der gewählten Trajektorie mit einer Schrittweite von  $\Delta l_T = 1 \ cm$  diskretisiert. Die mittlere Abdeckung mit Sensorsonden  $F_{m+}$  berechnet sich dann wie folgt:

$$F_{m+} = \frac{F_{P+}(R_T) * \Delta l_T}{l_{T,ges}}$$
 7-5

Die Simulation wird analog zum Einsatz ohne Sonden für alle drei Einsatzfälle und zwei Trajektorien durchgeführt. Für die Positionen und Orientierungen der Sensorsonden werden die je Einsatzfall optimalen Individuen verwendet.

#### 7.3 Ergebnisse der Simulation

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Simulationen beschrieben und diskutiert. Hierbei wird zunächst auf die Ergebnisse der Optimierung der ausgewählten Ausbringstrategien eingegangen, nachfolgend werden diese dann verglichen.

#### 7.3.1 Optimierung genetischer Algorithmus – Erster Abschnitt

Wie in Kapitel 7.2.1 beschrieben wird der genetische Algorithmus in zwei Abschnitten optimiert. Zunächst werden die 50 Parametersätze für die Kombinationen aus  $p_c$  und  $p_{M,0}$  bei  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$  und  $G_{max} = 200$  jeweils 12 mal simuliert. Für die statistische Auswertung werden von den 12 Durchläufen jedes Parametersatzes in jeder Generation die Fitness des besten Individuums sowie der arithmetische Mittelwert  $\overline{F}$  und die Standardabweichung  $\sigma$  betrachtet.

Zum Vergleich der Parametersätze untereinander werden  $\overline{F}$  und  $\sigma$  nach 50, 100, 150 und 200 Generationen sowie die Berechnungsdauer t zur Erreichung dieser Generationenzahlen über den verschiedenen Parametersätzen aufgetragen und ausgewertet. Die Parametersätze werden dabei wie in Tabelle 7.4 dargestellt nummeriert. Die Ergebnisse für den Einsatzfall Fertigungshalle mit Foyer und Sensorkonfiguration  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m sind in Abbildung 7.7, Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 dargestellt. Die Ergebnisse für alle drei Einsatzfälle sowie beide Sensorkonfigurationen sind im Anhang in Abbildung 11.1 bis Abbildung 11.18 zu finden.

Tabelle 7.4: Nummerierung der Parametersätze zur Bestimmung der optimalen Werte von  $p_c$  und  $p_{M,0}$  beim genetischen Algorithmus.

Parameter- satz	p <sub>c</sub>	$p_{M,0}$	Parameter- satz	p <sub>c</sub>	$p_{M,0}$
1	0.3	0.05			
2	0.4	0.05	11	0.3	0.15
3	0.5	0.05	12	0.4	0.15
4	0.6	0.05			
5	0.7	0.05	49	0.6	0.5
6	0.3	0.1	50	0.7	0.5



Abbildung 7.7: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 7.8: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100, \lambda = 100, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 7.9: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert

Tabelle 7.5 und Tabelle 7.6 fassen die Ergebnisse der in den einzelnen Einsatzszenarien und mit den jeweiligen Sensorkonfigurationen besten Individuen zusammen. Eine tabellarische Übersicht über die Ergebnisse aller Simulationsdurchläufe ist im Anhang in Tabelle 11.1 und Tabelle 11.2 zu finden.

Tabelle 7.5:	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse der jeweils besten Individuen für
die Werte voi	n $\overline{F}, \sigma$ und $t$ – Sensorkonfiguration: $lpha = 360^\circ, r = 12 \ m$ – Die unterlegten Wer-
te stellen die j	jeweils besten Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.

Einsatzfall	Fertig	gungshall Foyer	le mit	H	Büroetage		Lagerhalle		
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]
4	64,94	0,44	99,5	68,44	0,63	111,8	59,02	0,45	76,5
14	64,52	0,32	240,9	67,88	0,49	240,5	59,23	0,29	189,0
17	64,45	0,22	301,4	68,01	0,78	296,9	59,30	0,36	235,1
23	64,32	0,14	356,8	67,37	0,62	344,0	58,73	0,54	278,7
39	62,82	0,67	489,3	64,62	0,95	446,7	57,54	0,21	391,7

Tabelle 7.6: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse der jeweils besten Individuen für die Werte von  $\overline{F}$ ,  $\sigma$  und t – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – Die unterlegten Werte stellen die jeweils besten Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.

Einsatzfall	Fertig	gungshall Foyer	le mit	Büroetage			Lagerhalle			
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	
3	61,59	2,39	48,8	38,47	1,74	46,2	55,88	1,15	46,3	
10	62,62	0,69	83,5	39,26	1,51	70,6	55,42	1,19	78,4	
15	61,53	0,87	115,6	38,95	1,78	92,8	54,57	0,71	108,8	
20	60,64	1,13	145,4	39,61	1,57	114,2	52,79	0,98	138,0	
47	50,03	0,92	286,4	34,01	0,83	215,0	42,13	2,10	268,1	

Den besten arithmetischen Mittelwert der Perimeterabdeckung bei Sensorkonfiguration 1 wird mit Parametersatz 4 erreicht. Die Abdeckung des darin besten Individuums ist in Abbildung 7.10 dargestellt. Im Falle von Sensorkonfiguration 2 wird der beste arithmetische Mittelwert mit Parametersatz 10 erreicht. Abbildung 7.11 stellt die beste Abdeckung für diesen Fall dar.



Abbildung 7.10: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 4 – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m



Abbildung 7.11: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 10 – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m

Die Ergebnisse der ersten Simulationsdurchläufe zeigen, dass die Ergebnisse der ersten Hälfte der Parametersätze ähnliche Werte für  $\overline{F}$  liefern, wohingegen in der zweiten Hälfte mit steigendem  $p_{M,0}$  eine Verschlechterung von  $\overline{F}$  eintritt. Die Verteilung der Standardabweichung scheint eher zufällig, bewegt sich jedoch mit einem Mittelwert von 1,38% nach 50 Generationen und 1,01% nach 200 Generationen in einem für die vorliegende Anwendung vertretbaren Rahmen.

Zur weiteren Bestimmung des am besten geeigneten Parametersatzes werden noch die Mittelwerte von  $\overline{F}$  über alle drei Einsatzszenarien  $\overline{\overline{F}}$  nach jeweils 50, 100, 150 und 200 Generationen für beide Sensorkonfigurationen betrachtet. Das Ergebnis für die relevanten Parametersätze ist in Tabelle 7.7 zusammengefasst. Der Überblick über die Mittelwerte von  $\overline{F}$  über alle Parametersätze ist im Anhang in Tabelle 11.3 zu finden.

Tabelle 7.7:	Zusammenfassung d	ler Mittelwerte	von <i>F</i>	über	alle	Einsatzfälle	nach	50,	100,
150 und 200 (	Generationen für beid	le Sensorkonfig	uration	en.					

Generationen	5	0	1	00	1:	50	20	00
Sensorkonfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	$ar{ar{F}}$ /[%]	$ar{ar{F}}$ /[%]	$\overline{ar{F}}/[\%]$	$ar{ar{F}}$ /[%]				
4	63,03	48,50	63,90	50,57	64,03	51,31	64,14	51,74
5	62,98	48,57	63,70	50,73	63,87	51,74	63,94	52,19
10	62,60	47,64	63,64	50,80	63,87	52,02	63,96	52,43

Anhand dieser Ergebnisse wurde Parametersatz 10 ( $p_c = 0.7$ ,  $p_{M,0} = 0.1$ ) für die weiteren Simulationen ausgewählt. Die Differenz der Ergebnisse zu Parametersatz 4 bei 200 Generationen und Sensorkonfiguration 1 liegt bei nur 0,18%. Für Sensorkonfiguration 2 liefert Parametersatz 10 die besten Mittelwerte. Ebenfalls ausschlaggebend ist das mittlere  $\sigma$ . Bei Parametersatz 10 ist es nach 200 Generationen 0,32%, nach 100 Generationen sogar 0,42% niedriger als bei Parametersatz 4.

# 7.3.2 Optimierung genetischer Algorithmus – Zweiter Abschnitt

Nach Bestimmung der am besten geeigneten Werte für  $p_c$  und  $p_{M,0}$  werden im zweiten Schritt die Werte für  $\mu$  und  $\lambda$  bestimmt, die den besten Kompromiss zwischen Berechnungsdauer und ergebnis liefern. Hierzu wird die Vorgehensweise analog des ersten Abschnitts angewandt. Bei festen Werten für  $p_c$  und  $p_{M,0}$  werden unterschiedliche Parameter für  $\mu$  und  $\lambda$  bis  $G_{max} = 200$  für jeden Einsatzfall und beide Sensorkonfigurationen jeweils 12 Mal simuliert. Die Parametersätze für die Simulationen werden wie in Tabelle 7.8 dargestellt durchnummeriert.

Die Ergebnisse für den Einsatzfall Fertigungshalle mit Foyer und Sensorkonfiguration  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m sind in Abbildung 7.12, Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 dargestellt. Die Ergebnisse für alle drei Einsatzfälle sowie beide Sensorkonfigurationen sind im Anhang in Abbildung 11.25 bis Abbildung 11.48 zu finden. Tabelle 7.9 und Tabelle 7.10 fassen auch hier die Ergebnisse der in den einzelnen Einsatzszenarien und mit den jeweiligen Sensorkonfigurationen besten Individuen zusammen.

Parameter- satz	μ	λ	Parameter- satz	μ	λ
1	20	20	7	40	40
2	40	20	8	60	40
5	100	20	24	80	100
6	20	40	25	100	100

Tabelle 7.8: Nummerierung der Parametersätze zur Bestimmung der optimalen Werte von  $\mu$  und  $\lambda$  beim Genetischen Algorithmus.

Der Gesamtüberblick ist im Anhang in Tabelle 11.4 und Tabelle 11.5 zu finden. Zur endgültigen Bestimmung des optimalen Parametersatzes werden nicht nur in Tabelle 7.11 die Mittelwerte  $\overline{F}$ , sondern in Tabelle 7.12 auch die Mittelwerte von  $\sigma$  über die Einsatzszenarien  $\overline{\sigma}$  zusammengefasst. In beiden Tabellen werden auch die Werte von Parametersätzen angegeben, die in der anderen Tabelle Maximalwerte aufweisen. Die vollständige tabellarische Übersicht ist wiederum im Anhang in Tabelle 11.6 und Tabelle 11.7 zu finden. Für die Erklärung zur Entscheidung bezüglich  $\epsilon$  wird zusätzlich die Statistik eines Parametersatzes in Abbildung 7.15 dargestellt.



Abbildung 7.12: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha=360^\circ$ , r=12 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 7.13: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha=360^\circ$ , r=12 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 7.14: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha=360^{\circ}$ , r=12 m – GA Parameter:  $p_{C} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert

Tabelle 7.9: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für  $\overline{F}$ ,  $\sigma$  und t – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – Die markierten Werte stellen die jeweils besten Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.

Einsatzfall	Fertig	gungshall Foyer	le mit	H	Büroetage	Ð	Lagerhalle		
Parametersatz	$\overline{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]
12	64,27	0,21	102,6	67,31	0,44	99,0	58,93	0,54	80,7
17	64,46	0,37	135,4	67,44	0,57	127,0	59,25	0,32	108,1
20	64,53	0,29	141,4	68,00	0,59	136,9	59,01	0,14	109,4
23	64,75	0,38	172,9	68,12	0,44	165,5	59,15	0,28	136,3
25	64,54	0,30	174,0	68,13	0,47	167,5	59,08	0,26	137,7

Tabelle 7.10: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für  $\overline{F}$ ,  $\sigma$  und t – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – Die markierten Werte stellen die jeweils besten Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.

Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer			Büroetage			Lagerhalle		
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]
5	55,08	1,81	25,1	35,54	0,78	21,5	50,28	1,33	23,4
16	62,80	1,30	82,4	38,50	1,33	72,8	54,11	1,26	79,6
18	62,77	0,99	84,8	38,44	1,39	76,5	54,81	1,34	81,6
20	62,17	1,05	87,1	39,04	1,56	78,2	55,44	0,88	82,6
24	62,40	1,44	105,6	39,81	1,22	95,4	55,07	1,23	101,8
25	62,42	1,29	106,9	38,29	1,79	97,4	55,71	1,00	102,3

Generationen	50		100		150		200	
Sensorkonfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	$ar{ar{F}}$ /[%]							
10	59,63	41,85	62,03	46,37	63 <i>,</i> 05	48,57	63,42	49,96
18	62,57	47,30	63,54	50,37	63,68	51,40	63,77	52,00
20	62,08	46,71	63,37	50,16	63,72	51,60	63,85	52,21
22	63,03	48,26	63,55	50,67	63,71	51,37	63,86	51,75
23	63,12	48,99	63,74	51,20	63,88	51,90	64,01	52,30
24	62,64	48,57	63,51	51,10	63,67	51,96	63,75	52,42
25	62,52	47,69	63,58	50,69	63,83	51,67	63,91	52,14

Tabelle 7.11: Mittelwerte von  $\overline{F}$  über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen für beide Sensorkonfigurationen.

Tabelle 7.12: Mittelwerte von $\sigma$ über	r alle Einsatzfälle	e nach 50, 100,	150 und 200	Generationen
für beide Sensorkonfigurationen.				

Generationen	50		100		150		200	
Sensorkonfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	$ar{\sigma}$ /[%]							
10	1,16	1,46	0,68	1,91	0,58	1,51	0,55	1,55
18	0,75	1,86	0,50	1,64	0,50	1,36	0,49	1,24
20	0,84	1,94	0,49	1,64	0,40	1,41	0,34	1,16
22	0,48	1,99	0,48	1,83	0,50	1,78	0,48	1,75
23	0,59	1,92	0,36	1,53	0,36	1,48	0,37	1,44
24	0,69	1,74	0,50	1,65	0,40	1,47	0,38	1,30
25	0,58	1,54	0,44	1,23	0,38	1,38	0,34	1,36



Abbildung 7.15: Darstellung der Perimeterabdeckung der besten Individuen jeder Generation, arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung über alle 12 Simulationsläufe mit Zoom auf die Generationen 170-200. – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}, r = 12 m$ – GA Parameter:  $p_{C} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, \mu = 70, \lambda = 100, G_{max} = 200, \epsilon$  deaktiviert

Betrachtet man die vorliegenden Ergebnisse, so erkennt man zunächst, dass die Werte zwischen den Parametersätzen nahezu genauso schwanken wie innerhalb eines Parametersatzes. So ist die Standardabweichung zwischen den Parametersätzen im Mittel nur 0,01% geringer, als der Mittelwert der Standardabweichungen aller Parametersätze. Es kann also davon ausgegangen werden, dass alle Parametersätze ähnlich gute Ergebnisse erzielen.

Betrachtet man weiterhin die Ergebnisse nach 50, 100, 150 und 200 Generationen, so wird deutlich, dass nach Ablauf von 50 Generationen noch deutliche Steigerungen bei  $\overline{F}$  möglich sind. Bei Sensorkonfiguration 1 ist im Mittel eine Verbesserung von  $\overline{F}$  um 2,27%, bei Sensorkonfiguration 2 sogar von 5,4% möglich. Nach 100 Generationen kann  $\overline{F}$  im Mittel noch um 0,27% bei Sensorkonfiguration 1 und 1,1% bei Sensorkonfiguration 2 gesteigert werden. Beide Werte liegen jedoch unter den Mittelwerten der Standardabweichungen nach 200 Generationen, welche 0,37% bei Sensorkonfiguration 1 und 1,44% Sensorkonfiguration 2 betragen. Eine Festlegung auf  $G_{max} = 100$  scheint somit ausreichend.

Bei der Bestimmung des optimalen Wertes für das zusätzliche Abbruchkriterium  $\epsilon$  erkennt man beispielhaft in Abbildung 7.15, dass es bereits vor Ablauf von 50 Generationen häufig zu einer mehrere Generationen anhaltenden Stagnation bei der Abdeckung des jeweils besten Individuums

kommt, was zum vorzeitigen Abbruch des GA führen würde. Nach den Stagnationsphasen kommt es jedoch in fast allen Fällen zu einer weiteren Verbesserung der Ergebnisse. Aus diesem Grund wird in der weiteren Betrachtung das zusätzliche Abbruchkriterium  $\epsilon$  nicht weiter verwendet.

Bei der abschließenden Betrachtung der Parametersätze wird die mittlere Berechnungsdauer mit berücksichtigt. Parametersatz 23 liefert für 50 und 100 Generationen die besten Ergebnisse für beide Sensorkonfigurationen benötigt im Schnitt aber 32,18 s zur Berechnung von 50 und 64,35 s zur Berechnung von 100 Generationen. Vergleichbare Berechnungsdauern liegen bei den Parametersätzen 10 und 11 für 100 und 200 Generationen vor. In Tabelle 7.13 sind die jeweiligen Werte für  $\overline{F}$ für beide Sensorkonfigurationen sowie die über die Sensorkonfigurationen gemittelten Berechnungsdauern dieser Parametersätze für den besseren Vergleich gegenübergestellt.

Sensorkonfiguration		1	2			1	2	
Parametersatz	Gen.	$\overline{ar{F}}$ /[%]	$ar{ar{F}}$ /[%]	$ar{t}$ /[s]	Gen.	${ar \overline F}/{[\%]}$	$ar{ar{F}}$ /[%]	$ar{t}$ /[s]
10	100	62,03	46,37	27,38	200	63,42	49,96	54,77
11	100	63,32	49,56	37,37	200	63,74	50,59	75,46
23	50	63,12	48,99	32,18	100	63,74	51,20	64,35

Tabelle 7.13: Gegenüberstellung der Werte für  $\overline{F}$  und  $\overline{t}$  für ausgewählte Parametersätze

In der Gegenüberstellung liegen die Ergebnisse für Parametersatz 23 nach 50 Generationen für Sensorkonfiguration 1 um 1,08% und für Sensorkonfiguration 2 um 2,62% über den Ergebnissen von Parametersatz 10 und um 0,2% bzw. 0,58% unter den Ergebnissen von Parametersatz 11. Die Werte für die Standardabweichung weichen kaum voneinander ab. Läuft Parametersatz 23 für 100 Generationen sind die Ergebnisse gleich bzw. um bis zu 1,24% besser. Die Standardabweichung ist in allen Fällen zwischen 0,02% und 0,66% besser als bei den Parametersätzen 10 und 11. Somit kann Parametersatz 23 auch unter zeitlichen Beschränkungen als beste Wahl angesehen werden.

Generell lässt sich festhalten, dass eine höhere Anzahl an Individuen je Generation zu einer Konvergenz des Ergebnisses nach weniger Generationen führt. Bei Sensorkonfiguration 2 ist das Optimierungsproblem um eine Größe komplexer, da neben der Position auch die Orientierung optimiert werden muss. Die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen Sensorkonfiguration 1 und 2 lassen darauf schließen, dass die Anzahl der Individuen je Generation umso stärker ins Gewicht fällt, je komplexer das Optimierungsproblem ist. Dennoch existiert unabhängig der Art der verwendeten Sensoren eine Konfiguration für den genetischen Algorithmus, welche den besten Kompromiss zwischen Abdeckung und Berechnungsdauer darstellt. Diese ist in Tabelle 7.14 dargestellt. Die erzielten Ergebnisse werden im weiteren Verlauf gegen die Ergebnisse des zweiten Ansatzes verglichen.

<b>Tabelle 7.14: (</b>	Optimale	Konfiguration	des genetischen	Algorithmus
------------------------	----------	---------------	-----------------	-------------

Parametersatz	p <sub>c</sub>	$p_{M,0}$	μ	λ	G <sub>max</sub>	Е
23	0.7	0.1	70	100	100	Deakt.

# 7.3.3 Optimierung Gridmap mit Greedy Ansatz

Anders als der Genetische Algorithmus liefert der zweite Ansatz bei gleichbleibenden Parametern immer dieselben Ergebnisse. Aus diesem Grund werden nur zwei Werte betrachtet. Die erreichte Fitness F und die zur Berechnung benötigte Zeit t. Im Falle der Sensorkonfiguration 1 werden 5 verschiedene Parametersätze simuliert, im Fall von Sensorkonfiguration 2 sind es 25 Parametersätze. Die Ergebnisse für Sensorkonfiguration 1 sind in Tabelle 7.15 dargestellt, die Ergebnisse für Sensorkonfiguration 2 in Tabelle 7.16.

Tabelle 7.15:	Ergebnisse für	F und t der	· Simulationen	des Gridmap	mit Greedy-A	nsatzes bei
Sensorkonfig	uration 1.					

Einsatzfall		Fertigungshalle mit Foyer		Büro	etage	Lagerhalle	
$\Delta d/[m]$	Δω/[°]	F/[%]	<i>t</i> /[s]	F/[%]	<i>t/</i> [s]	F/[%]	<i>t</i> /[s]
0,2	-	65,68	169,9	68,63	9,8	61,16	190,2
0,4	-	65,48	83,7	66,71	4,9	60,64	93,9
0,6	-	65,20	55,5	64,89	3,2	60,02	62,3
0,8	-	65,25	41,5	64,88	2,4	60,17	46,7
1,0	-	65,08	33,2	61,70	2,0	59,56	37,3

Tabelle 7.16: Ergebnisse für F und t der Simulationen des Gridmap mit Greedy-Ansatzes bei Sensorkonfiguration 2.

Einsatzfall		Fertigungshalle mitBüroetageLagerhFoyer		Büroetage		rhalle	
$\Delta d/[m]$	Δω/[°]	F/[%]	<i>t</i> /[s]	F/[%]	<i>t/</i> [s]	F/[%]	<i>t</i> /[s]
0,2	3,6	67,15	1774,0	43,60	82,6	61,38	1724,0
0,4	3,6	66,35	767,5	41,72	34,9	60,51	746,4
0,6	3,6	65,70	485,6	37,88	21,3	59,14	472,7
0,8	3,6	65,19	354,2	39,94	15,7	59,31	345,1
1,0	3,6	64,87	278,2	37,16	12,2	57,55	272,1
0,2	7,2	66,86	1536,1	42,35	69,1	60,61	1496,2
0,4	7,2	66,29	708,9	40,76	31,5	59,94	691,1
0,6	7,2	65,63	459,5	37,25	20,0	58,51	448,1
0,8	7,2	65,07	339,7	39,62	14,9	59,09	331,6

Kapitel 7 Optin	nierung und	Bewertung	der Ausb	ringstrat	egien
-----------------	-------------	-----------	----------	-----------	-------

Einsatzfall		Fertigungshalle mit Foyer		Büroetage		Lagerhalle	
$\Delta d/[m]$	Δω/[°]	F/[%]	<i>t</i> /[s]	F/[%]	<i>t</i> /[s]	F/[%]	<i>t</i> /[s]
1,0	7,2	64,76	269,2	36,64	11,7	57,12	263,1
0,2	14,4	66,70	1418,0	41,28	62,5	60,55	1382,8
0,4	14,4	66,28	679,4	40,68	29,7	59,75	663,0
0,6	14,4	65,63	446,5	36,08	19,3	57,77	435,7
0,8	14,4	65,07	332,4	38,47	14,5	59,07	324,5
1,0	14,4	64,76	264,6	36,75	11,5	56,90	258,5
0,2	18	66,68	1394,5	41,18	61,2	60,38	1362,2
0,4	18	66,24	673,5	39,86	29,4	59,54	657,6
0,6	18	65,47	443,8	36,67	19,2	57,77	433,2
0,8	18	65,07	330,9	38,85	14,4	58,80	323,1
1,0	18	64,74	263,7	36,78	11,4	56,99	257,6
0,2	36	66,49	1347,0	40,90	58,6	58,96	1314,8
0,4	36	66,02	661,7	39,26	28,7	59,88	646,0
0,6	36	65,38	438,6	36,08	19,0	58,24	428,2
0,8	36	64,88	328,0	38,85	14,2	58,56	320,3
1,0	36	64,11	261,9	36,60	11,3	57,06	255,8

Erwartungsgemäß ist die Berechnungsdauer von der Größe des zu überwachenden Areals und der gewählten Sensorkonfiguration abhängig. Der Einfluss der Parameter  $\Delta d$  und  $\Delta \omega$  auf die erreichte Abdeckung variiert leicht zwischen den Szenarien. Betrachtet man zunächst Sensorkonfiguration 1 und somit nur den Einfluss von  $\Delta d$ , ist der Unterschied der Ergebnisse für den Einsatzfall Büroetage mit ~6,9% mit Abstand am größten, gefolgt von ~1,6% für den Einsatzfall Lagerhalle und ~0,6% für den Einsatzfall Fertigungshalle mit Foyer. Dieser Unterschied kann auf die Menge an schmalen Durchgängen bzw. Türen im ersten Einsatzfall zurückgeführt werden. Wird in diesem Einsatzfall eine Sonde mit 360° Öffnungswinkel mittig zwischen zwei gegenüberliegenden Türen platziert, so kann vom jeweiligen Perimeter der beiden Räume am meisten gesehen werden. Ist der Wert für  $\Delta d$  ungefähr gleich oder größer als die Türbreite, kann es vorkommen, dass zwischen den Türen kein Punkt in der Gridkarte existiert oder dieser nicht optimal liegt. Vor diesem Hintergrund scheint ein Wert von  $\Delta d = 0,4 m$  der beste Kompromiss zwischen Berechnungsdauer, welche sich um ~51% reduziert und Verlust bei der Abdeckung, welche im Mittel über alle Szenarien dann bei ~0,9% liegt.

Bei Sensorkonfiguration 2 hat der Wert von  $\Delta d$  ebenfalls auf das Ergebnis des ersten Einsatzfalls mit ~5,1% den größten Einfluss. Auch hier spielt die Positionierung der Punkte der Gridkarte relativ zu den Türen eine Rolle. Auch der Wert für  $\Delta \omega$  hat auf den ersten Einsatzfall mit ~1,7% den größten Effekt. Generell ist die Schwankung über alle Szenarien bei den betrachteten Werten für  $\Delta d$  mit ~3,5% größer als bei den Werten für  $\Delta \omega$ . Hier liegt die Schwankung über alle Szenarien bei lediglich ~1,1%. Wird auch für die zweite Sensorkonfiguration ein Wert von  $\Delta d = 0,4 m$  gewählt, liegt bei  $\Delta \omega = 7,2^{\circ}$  der Verlust bei der Abdeckung im Mittel bei ~0,5% und der mittlere Zeitvorteil im Vergleich zu  $\Delta \omega = 3,6^{\circ}$  bei ~8,3%.

Die Konfiguration  $\Delta d = 0.4 \, m$  und  $\Delta \omega = 7.2^{\circ}$  hat im absoluten Vergleich zu den Werten für  $\Delta d = 0.2 \, m$  und  $\Delta \omega = 3.6^{\circ}$  einen mittleren Abdeckungsverlust von ~1.7% und einen mittleren Zeitvorteil von ~60.5%. Da der Zeitvorteil mit  $\Delta \omega = 36^{\circ}$  nur auf ~63.5% wächst (Verbesserung entspricht ~5%), der Abdeckungsverlust jedoch auf ~2.3% ansteigt (Verschlechterung entspricht ~35.3%), werden  $\Delta d = 0.4 \, m$  und  $\Delta \omega = 7.2^{\circ}$  als bester Kompromiss für Sensorkonfiguration 2 erachtet. Der direkte Vergleich der Ergebnisse mit denen des genetischen Algorithmus wird in Kapitel 7.5 vorgenommen.

## 7.3.4 Ergebnis Roboter ohne Sensorsonden

Abbildung 7.16 zeigt eine kurze Trajektorie, die nach dem in Kapitel 7.2.3 aufgestellten Optimalitätskriterium zufällig erstellt wurde. Die anderen verwendeten Trajektorien sind im Anhang in Abbildung 11.49 bis Abbildung 11.54 zu finden. Die Simulationsergebnisse für die mittlere Abdeckung  $F_m$  sind in Tabelle 7.17 zusammengefasst.

Die ähnlichen Ergebnisse für die kurze und lange Trajektorie zeigen, dass die Wahl der Trajektorie nur einen geringen Einfluss auf die mittlere Abdeckung hat, solange die Kriterien aus Kapitel 7.2.3 eingehalten werden. In allen Einsatzfällen führt die kurze Trajektorie zu einer etwas besseren mittleren Abdeckung. In der Hälfte der Fälle liegt die mittlere Abdeckung jedoch unter 10%, im besten Fall bei ~15% was eine signifikante Verbesserung durch den Einsatz von Sensorsonden vermuten lässt.



Abbildung 7.16: Kurze Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 3 Lagerhalle
Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer	Büroetage	Lagerhalle		
	<i>F<sub>m</sub></i> /[%]	<i>F<sub>m</sub></i> /[%]	<i>F<sub>m</sub></i> /[%]		
Kurze Trajektorie	15,25	13,12	7,73		
Lange Trajektorie	14,16	8,27	5,07		

Tabelle 7.17: Simulationsergebnisse der mittleren Abdeckung  $F_m$  für beispielhafte Trajektorien eines Überwachungsroboters ohne Sensorsonden

## 7.3.5 Ergebnis für Roboter mit Sensorsonden

Für die bessere Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen ohne Sensorsonden werden dieselben Trajektorien wie in Kapitel 7.3.4 verwendet. Die Ergebnisse für die mittlere Abdeckung  $F_{m+}$  sind in Tabelle 7.18 zusammengefasst. Für die Sensorsonden wurden die optimalen Positionen vom Gridkartenansatz verwendet.

Wie zu erwarten liegt die mittlere Abdeckung  $F_{m+}$  beim Einsatz eines Überwachungsroboters mit Sensorsonden zwischen der Abdeckung der Sensorsonden  $\overline{F}$  und der Summe aus  $\overline{F}$  und  $F_m$ . Die Steigerung der mittleren Abdeckung  $S_F$  erhält man durch:

$$S_F = \left(\frac{F_{m+}}{\bar{F}} - 1\right) * 100\%$$
 7-6

Sie ist für die Ergebnisse aus Tabelle 7.17 und Tabelle 7.18 in Tabelle 7.19 zusammengefasst und für die einzelnen Trajektorien und Konfigurationen über die Szenarien gemittelt.

Tabelle 7.18: Simulationsergebnisse der mittleren Abdeckung  $F_{m+}$  für beispielhafte Trajektorien eines Überwachungsroboters mit Sensorsonden

Einsatzfall		Fertigungshalle mit Foyer	Büroetage	Lagerhalle
Trajektorie	Konfig.	$F_{m+}/[\%]$	$F_{m+}/[\%]$	$F_{m+}/[\%]$
Kurz	$\alpha = 360^{\circ}$ $r = 12 m$	67,97	68,51	62,80
Kurz	$\alpha = 90^{\circ}$ $r = 30 m$	68,91	45,00	61,44
Lang	$\alpha = 360^{\circ}$ $r = 12 m$	67,66	69,37	62,21
Lang	$\alpha = 90^{\circ}$ $r = 30 m$	68,95	46,36	61,46

Einsatzfall		Fertigungshalle mit Foyer	Büroetage	Lagerhalle	Arithmetischer Mittelwert
Trajektorie	Konfig.	$S_F/[\%]$	$S_F/[\%]$	$S_F/[\%]$	$ar{S}_F$ /[%]
Kurz	$\alpha = 360^{\circ}$ $r = 12 m$	346	422	712	493
Kurz	$\alpha = 90^{\circ}$ $r = 30 m$	352	243	695	430
Lang	$\alpha = 360^{\circ}$ $r = 12 m$	378	739	1127	748
Lang	$\alpha = 90^{\circ}$ $r = 30 m$	387	461	1112	653

Tabelle 7.19: Steigerung der mittleren Abdeckung eines Überwachungsroboters durch den Einsatz von Sensorsonden.

Die Ergebnisse in Tabelle 7.19 zeigen, dass durch den Einsatz von Sensorsonden eine Steigerung der mittleren Abdeckung eines Überwachungsroboters für Sensorkonfiguration 2 zwischen ~430% und ~650% für Sensorkonfiguration 1 sogar zwischen ~490% und ~750% zu erwarten ist.

## 7.4 Realer Überwachungseinsatz und Vergleich mit den Simulationsergebnissen

Wie zuvor erwähnt wurde, ist die Quantifizierung eines realen Überwachungseinsatzes mit Sensorsonden nur schwer möglich. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nur ein qualitativer Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und dem realen Einsatz durchgeführt. Damit der tatsächlich abgedeckte Perimeter ohne weitere Maßnahmen direkt erkennbar ist, wird dieser Vergleich mit Kameras als Sensoren durchgeführt.

Zur Berechnung der optimalen Positionen der Sensorsonden verfügt der Roboter über dieselben Daten, wie die Simulationsumgebung. Daher werden dieselben Positionen berechnet. In Abbildung 7.17, Abbildung 7.18 und Abbildung 7.19 sind exemplarisch die Sichtfelder von realen, platzierten Sonden dargestellt.



Abbildung 7.17: Sichtfeld einer realen Sonde im Einsatzfall 2 Büroetage.



Abbildung 7.18: Beispiel reale Sichtfeldbeeinträchtigung durch Türen und nicht kartierte Hindernisse.



Abbildung 7.19: Sichtfeld einer realen Sonde im Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer.

Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen gibt es drei wesentliche Unterschiede. Es fällt auf, dass die meisten Türen in realen Situationen geschlossen und nicht wie in Simulation offen sind. Sensorsonden, die derart platziert werden, dass sie durch Türen hindurch weiteren Perimeter abdecken, liefern somit real geringere Abdeckungswerte. So würde sich der abgedeckte Perimeter in Falle der Sonde von Abbildung 7.18 bei geschlossenen Türen auf die erste Tür reduzieren. Die Türen, welche teilweise als sekundärer Perimeter klassifiziert sind, werden jedoch korrekt abgedeckt, wie in Abbildung 7.17 zu sehen ist. Auch Treppenaufgang und Aufzugstüren werden in der Realität abgedeckt, wie Abbildung 7.19 zeigt.

Ein weiterer Unterschied liegt in der unzureichenden Erfassung von Hindernissen, die das Sichtfeld blockieren können. Weder in der Karte des Roboters, noch in der Simulationsumgebung sind alle Hindernisse erfasst. Somit kann es vorkommen, dass der tatsächlich abgedeckte Perimeter geringer bis gar nicht vorhanden ist. Hier spielt auch die Reduktion auf zwei Dimensionen eine Rolle. So stellt z.B. der Schreibtisch in Abbildung 7.18 eine Sichtbehinderung dar, welche nur dank der Tatsache, dass der Perimeter ein Fenster ist und die Sensorsonde ausreichend weit vom Hindernis entfernt steht, den tatsächlich abgedeckten Perimeter nicht beeinflusst. Da die Steuerung des Roboters jedoch aktuell keine Kartierung unbekannter Hindernisse vornimmt und eine Anpassung der Steuerung diesbezüglich oder eine Erweiterung auf drei Dimensionen nicht im Fokus dieser Arbeit liegt, muss diese potentielle Abweichung in Kauf genommen werden. Beide Themen bieten somit Potential für weiterführende Arbeiten.

Die dritte Abweichung zwischen Simulation und Realität betrifft die Positioniergenauigkeit des Roboters. Eine Abweichung in der Positionierung oder Ausrichtung der Sonden kann das Ergebnis beeinträchtigen. Wird z.B. der Sensor in Abbildung 7.17 nur um wenige Grad nach links gedreht abgesetzt, werden die Türen auf der rechten Seite nicht mehr erfasst. Bei Positionen, welche direkt in Durchgängen platziert sind, kann durch eine seitliche Abweichung ein Teil des Durchgangs ggf.

nicht mehr vollständig erfasst werden. Da sich jedoch die Wiederholgenauigkeit bei der Positionierung von mobilen Robotern im Innenbereich im einstelligen Zentimeterbereich befindet, kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Positionierungenauigkeit auf das Abdeckungsergebnis im Vergleich zu nicht erfassten Hindernissen vernachlässigbar sein wird. Hierfür spricht auch die Tatsache, dass ein Sensor, welcher knapp an einer Tür vorbeischaut, dennoch erkennt, wenn eine Person durch diese Tür tritt.

## 7.5 Fazit

Ausschlaggebend für die abschließende Beurteilung der beiden untersuchten Verfahren zur optimalen Positionierung von Sensorsonden sind die erreichte Abdeckung und die zur Berechnung benötigte Zeit für die jeweils als optimal ermittelten Parameter. Hinsichtlich der Abdeckung erreicht der Gridkartenansatz wie erwartet in allen Einsatzfällen und für beide Sensorkonfigurationen die besseren Ergebnisse. Die Abweichung zu den mittleren Ergebnissen des genetischen Algorithmus liegt zwischen ~0,2% und ~5,5%. Bei der Berechnungsdauer unterscheidet sich das Ergebnis in Abhängigkeit der betrachteten Einsatzfälle. Im Falle Büroetage ist die Berechnung mittels Gridkarte um Faktor 8 schneller für Sensorkonfiguration 1 jedoch um Faktor 1,7 für Sensorkonfiguration 2 schlechter. Bei den beiden anderen Einsatzfällen ist der der genetische Algorithmus im Mittel um Faktor 36 schneller bei Sensorkonfiguration 1 und um Faktor 2,3 bei Sensorkonfiguration 2. Diese Diskrepanz liegt in der Abhängigkeit des Gridkartenansatzes von der Größe der zu überwachenden Fläche. Bestimmt man per linearer Interpolation die Größe der Fläche, für welche die Berechnungsdauer beider Ansätze gleich sein müsste, erhält man für Sensorkonfiguration 1 ungefähr 950 m<sup>2</sup> und für Sensorkonfiguration 2 etwa 64 m<sup>2</sup>. Liegt die zu überwachende Fläche bei entsprechender Sensorkonfiguration unter diesen Werten, ist definitiv der Gridkartenansatz die bessere Wahl. Sind die Flächen größer, muss von Fall zu Fall unterschieden werden, ob die optimale Abdeckung auf Kosten der Berechnungsdauer erreicht werden soll, oder ob das Ergebnis möglichst schnell vorliegen muss. Hinsichtlich der verwendeten Szenarien sei angemerkt, dass die Optimierung und der Vergleich der beiden Verfahren ausschließlich auf Hauptszenario S3 Maximale Abdeckung bei n Sonden durchgeführt wurden. Im Zusammenhang mit dem Gridkartenansatz mit Greedy-Algorithmus kann davon ausgegangen werden, dass auch die anderen in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Hauptszenarien durch einfache Anpassungen des Abbruchkriteriums für den Greedy-Algorithmus bzw. unterschiedliche Interpretationen der Ergebnisse mit diesem Verfahren berechnet werden können. Für die Szenarien S1 100% Abdeckung und S2 X% Abdeckung muss der Greedy-Algorithmus ausgeführt werden bis 100% bzw. X% des Perimeters oder der Fläche oder von beidem abgedeckt sind. Im Falle von Szenario S4 Bestes Verhältnis von Sonden zu Abdeckung können die Ergebnisse nach jedem Schritt des Greedy-Algorithmus durch die Anzahl von Sonden geteilt und danach miteinander verglichen werden. In allen Fällen ist eine erneute Optimierung der Parameter nicht erforderlich. Im Falle des genetischen Algorithmus müssen für die Szenarien S1 und S2 die Individuen anders gestaltet werden. In beiden Fällen muss die Anzahl von Sonden je Individuum flexibel gehalten und in die Schritte Reproduktion und Mutation mit eingebunden werden. Auch entfällt die maximale Anzahl von Generationen, da die Erreichung der gewünschten Abdeckung als Abbruchkriterium fungiert. Durch die Veränderung der Individuen muss davon ausgegangen werden, dass auch die Parameter erneut optimiert werden müssen. Im Falle des Hauptszenarios S4 ist vergleichbar mit dem Gridkartenansatz lediglich eine veränderte Interpretation der Ergebnisse vorzunehmen. Hierbei muss keine erneute Optimierung vorgenommen werden.

Hinsichtlich des Mehrnutzens der Sensorsonden für mobile Überwachungsroboter wurde in Kapitel 7.3.5 eine theoretische Steigerung der mittleren Abdeckung um Faktor 4,3 bis 7,5 ermittelt. In Kapitel 7.4 werden jedoch drei Abweichungen zwischen Simulation und Realität beschrieben, die das reale Abdeckungsergebnis negativ beeinflussen können. Da diese jedoch nicht nur die Sensorsonden, sondern auch den Überwachungsroboter selbst betreffen, kann davon ausgegangen werden, dass der Mehrwert durch die Verwendung von Sensorsonden auch im realen Einsatz gegeben ist, wenn auch nicht zwingend in der in Simulation bestimmten Höhe.

# 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Mobile Überwachungsroboter bieten durch hochwertige Sensoren, Einsatzflexibilität, Unbestechlichkeit und Ausdauer eine Verbesserung in der Qualität heutiger Überwachungstechniken. Dennoch zeigen Studien, wie die World Robotics Studie 2011 (Hägele & (Mitarb.) u.a., 2011) eine Stagnation bei den Neuinstallationen derartiger Roboter auf, obwohl noch keine Marktsättigung vorliegt. Dieser Arbeit liegt die These zu Grunde, dass eine mögliche Ursache hierfür die geringe Gleichzeitigkeit der Überwachung mit derartigen Robotersystemen im Vergleich zu fest installierten Überwachungseinrichtungen ist. Letztere bieten jedoch nicht die Flexibilität von Robotern und verursachen zudem sowohl höhere Installationskosten als auch einen höheren Installationsaufwand. Als Lösungsansatz wird in dieser Arbeit eine Kombination der Stärken beider Varianten verfolgt, welche durch die Einführung von Sensorsonden erreicht wurde. Die Problemstellung betreffend wurden zunächst drei Überwachungsarten unterschieden, zu deren Ausführung eine derartige Kombination in der Lage sein muss: Perimeterabdeckung, Blanketabdeckung und Maximum-Breach-Path.

Die Problemstellung umfasst weiterhin Anforderungen an Hardware und Software des Lösungskonzeptes. So ist zur Erreichung der Flexibilität eine zumindest passive Mobilität der Sensorsonden erforderlich. Die Möglichkeit der Kommunikation der Sonden mit dem Roboter bzw. einer Basisstation stellt eine weitere Anforderung an die Hardware dar. Eine Anforderung an die Software ist der möglichst effiziente Einsatz der Sensorsonden. Eine andere ist die Tatsache, dass die Sonden über eine begrenzte Energieversorgung verfügen und daher in regelmäßigen Abständen gegen Sonden mit vollem Energievorrat ausgewechselt werden müssen. Eine wichtige Forderung stellen die Kosten für die Erweiterung der Roboter dar, welche aus psychologischen und wirtschaftlichen Gründen maximal 20% der Anschaffungskosten eines Roboters betragen sollen. (vgl. (Kolwitz & Anker, 16.12.2012, 2012) im PKW Bereich)

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung autonomer, passiv mobiler Sensorsonden als Erweiterung für Überwachungsroboter und betrachtet hierbei das Gesamtsystem, bestehend aus Sensorsonden, Ausbringeinheit und Ausbringstrategien, das sowohl in Simulation als auch im realen Einsatz auf seine Leistungsfähigkeit hin untersucht wurde.

Zur Darstellung der Ausgangssituation wurden zunächst Begriffe und Definitionen geklärt. Anschließend wurden klassische Überwachungsformen mit Personal und fest installierten Sensoren beleuchtet. Im weiteren Verlauf wurden im Handel erhältliche Überwachungsroboter dargestellt. Im Detail wurde der Überwachungsroboter Secur-O-bot der Firma Neobotix vorgestellt, da dieser als Trägerplattform für den entwickelten Demonstrator diente. Abschließend wurden die Einsatzfälle für Sensorsonden untersucht und in Innen- und Außenanwendungen unterteilt. Es wurden drei für diese Arbeit relevante Einsatzszenarien identifiziert: Perimeterüberwachung, Überwachung sensibler Bereiche und sequenzielle Flächenüberwachung. Der Fokus wurde in dieser Arbeit auf den Inneneinsatz gelegt. Bei der Untersuchung des Standes der Technik wurden zunächst drahtlose Sensornetzwerke charakterisiert. Weiterhin wurden Funkprotokolle für sich selbst organisierende Kommunikationsnetzwerke, sog. Ad-hoc Netzwerke dargestellt. Anschließend wurden sechs der im Zusammenhang mit Adhoc Netzwerken am häufigsten diskutieren Funkprotokolle betrachtet. Zur Lösung des vorliegenden Problems der effizienten Ausbringung der Sonden wurden vier Methoden betrachtet, die für die Bestimmung der optimalen Positionen der Sensorsonden verwendet werden können: genetische Algorithmen, Potenzialfelder, Maximal-Breach Path Optimierung mit Voronoi-Diagrammen und Gridkarten. Abschließend wurde noch der Stand der Technik bezogen auf die Sensorsonden selbst erläutert. Hierbei wurden potentiell einsetzbare Sensoren, drahtlose Datenübertragungsformen, Schnittstellen zwischen Sensoren und Übertragungseinrichtung sowie mögliche Energieversorgungsformen dargelegt.

Im Kapitel Analyse wurden Anforderungen an Sensorsonden, Ausbringeinheit und Ausbringstrategien identifiziert. Die wichtigsten sind: Einfache Skalierbarkeit, Kreuzweise Verwendung, Beliebige Konfigurierbarkeit, Robustheit, Outdoortauglich und Integrierbarkeit. Ausgehend von diesen Anforderungen wurden weiterhin die für die Forderung Kreuzweise Verwendung benötigten bereitzustellenden Informationen der Sensorsonden identifiziert. Bei den Anforderungen an die Ausbringeinheit wurden mechanische und elektrische Anforderungen unterschieden. Im Falle der Ausbringstrategien wurden vier Hauptszenarien definiert: 100% Abdeckung, X% Abdeckung, maximale Abdeckung bei n Sonden und bestes Verhältnis von Sonden zu Abdeckung. Daraus abgeleitet wurden die Forderungen nach Flexibilität, schneller Berechnung, einfacher Skalierbarkeit und Interoperabilität. Die im Stand der Technik vorgestellten Methoden zur optimalen Positionsbestimmung wurden abschließend auf diese Anforderungen hin analysiert, wobei sowohl genetische Algorithmen als auch Gridkarten als geeignete Methoden für eine weitere Betrachtung identifiziert wurden.

Das Kapitel Konzeption wurde aufgrund der Betrachtung des Gesamtsystems in drei Abschnitte unterteilt: Sensorsonden, Ausbringeinheit und Ausbringstrategien. Im Abschnitt Sensorsonden wurden für jede der fünf Teilkomponenten unter Berücksichtigung des Standes der Technik und der definierten Anforderungen geeignete Konzepte identifiziert bzw. entwickelt (siehe Tabelle 6.6).

Zur Konzeption einer Ausbringeinheit wurden zunächst deren Hauptaufgaben spezifiziert: Aufbewahrung der Sonden, Handhabung der Sonden zum Ausbringen und Einholen, Identifikation der Sonden und Kommunikation mit dem Überwachungsroboter. Für die Aufbewahrung wurden sowohl ungeordnete als auch geordnete Varianten betrachtet. Aufgrund der Anforderung, kostengünstig zu bleiben, wurde eine geordnete Aufbewahrung mit kreisförmig angeordneten, durchgängigen Magazinpositionen gewählt. Diese Variante erlaubt den Einsatz von lediglich einem Freiheitsgrad bei der Handhabungskinematik. Um bei der Verwendung von gerichteten Sensoren die korrekte Ausrichtung der Sonden vor dem Absetzen sicherstellen zu können, wurde noch eine passive Kinematik für den Verdrehungsausgleich entwickelt, welche vollständig ohne die Verwendung von Sensoren oder zusätzlichen Aktoren auskommt. Im weiteren Verlauf wurde zunächst die Steuerung der Ausbringeinheit konzeptioniert und abschließend die Schnittstelle zwischen dem Roboter und der Ausbringeinheit entwickelt (siehe Tabelle 5.9).

Die Konzeption der Ausbringstrategien befasste sich mit der Anpassung der Methoden genetische Algorithmen und Gridkarten auf die vorliegende Problemstellung. Im ersten Fall wurden besonders bei der Initialisierung der Individuen als auch bei der Fitnessbestimmung eigene Methoden entwickelt. Für eine optimierte Initialisierung wurden Sichtbarkeits- und Überlappungsflächen eingeführt, welche bereits in der ersten Generation zu einer hohen Abdeckung durch die Sensoren führen. Bei der Fitnessbestimmung wurde ein geometrisches Verfahren entwickelt, das die Abschattung der Sichtbereiche der Sensoren durch Hindernisse effizient bestimmt. Die Methode der Gridkarten wurde um das Greedy-Verfahren erweitert. Zur Effizienzsteigerung der Abdeckungsbestimmung wurde das geometrische Verfahren, welches für den genetischen Algorithmus entwickelt wurde, um eine effiziente Berechnung von Winkelsegmenten erweitert.

Im Kapitel 6 wurde der tatsächliche Aufbau des Prototypen, bestehend aus Sensorsonden und Ausbringeinheit, beschrieben. Der Prototyp selbst wurde bereits erfolgreich auf der AUTOMATICA 2008 in München in Kombination mit dem Überwachungsroboter Secur-O-bot vorgestellt. Für die spätere Auswertung der Leistungsfähigkeit wurde eigens für diese Arbeit eine Simulationsumgebung in Matlab konzipiert.

Ein Benchmark für die Ausbringstrategien wurde in Kapitel 7 definiert. Dieser ermöglichte den Vergleich der Ergebnisse der beiden entwickelten Verfahren. Im weiteren Verlauf wurden die Randbedingungen und Parameter für die Simulation der Ausbringstrategien beschrieben. Zunächst galt es, die optimalen Parameter für beide Verfahren zu bestimmen. Da der Ansatz mit genetischen Algorithmen im Gegensatz zum zweiten Verfahren mit Gridkarten nicht bei jedem Durchlauf mit gleichen Parametern dasselbe Ergebnis liefert, wurden hierbei zusätzlich statistische Daten ausgewertet. Nach der Ermittlung der optimalen Parameter für beide Algorithmus bessere Ergebnisse hinsichtlich der Berechnungsdauer, der Gridkarten-Ansatz mit Greedy jedoch die besseren Ergebnisse hinsichtlich lich Abdeckungsergebnis und Ergebnisstabilität. Somit konnte festgehalten werden, dass die Wahl des Ansatzes von der zur Verfügung stehenden Zeit abhängig gemacht werden muss.

Für die Analyse des Mehrwerts von Sensorsonden für mobile Überwachungsroboter wurde abschließend der Wert der mittleren Abdeckung eingeführt. Dieser Wert bestimmt, wieviel zu überwachender Perimeter oder zu überwachendes Areal im Mittel zu jeder Zeit vom Roboter erfasst werden kann. Dieser Wert wurde dann für die Nutzung eines Roboters allein und in Kombination mit Sensorsonden bestimmt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Hierbei wurde festgestellt, dass bei den gewählten Szenarien ein Roboter allein im Mittel lediglich zwischen ca. 5 % und ca. 15 % des zu überwachenden Perimeters abdeckt und dass die Nutzung von Sensorsonden die mittlere Abdeckung eines Überwachungsroboters um das 4,3- bis 7,5-fache steigern kann.

Es wurde in dieser Arbeit somit ein funktionierendes System entwickelt, aufgebaut und analysiert, das einem bestehenden Überwachungsroboter die Nutzung von autonomen, passiv mobilen Sensorsonden ermöglicht. Das Gesamtsystem besteht aus den erforderlichen hardware- und softwaretechnischen Komponenten und bietet einen messbaren Mehrwert für Überwachungsroboter bei vergleichsweise geringem Preis.

### 8.2 Ergebnisanalyse

Bei der Analyse der Hardwarekosten für den Aufbau des Prototypen belaufen sich diese auf ca. 1 800 € für sechs Sensorsonden und weitere ca. 1 000 € für die Ausbringeinheit. Die Zielgröße von max. 20% des Anschaffungspreises eines Überwachungsroboters ist damit erreichbar, werden die ca. 18 000 € Neupreis für den verwendeten Roboter Secur-O-bot herangezogen. Hierbei bleiben jedoch Kosten für die Entwicklung sowie die Kosten für die Montage außer Acht. Auch fehlt in dieser Betrachtung der Gewinnaufschlag eines Herstellers. Ebenfalls nicht berücksichtigt sind jedoch auch mögliche Rabattverträge bei Abnahme größerer Stückzahlen sowie Kosteneinsparungen durch Massenproduktion. Zur Ermittlung eines realistischen Kaufpreises müsste daher noch eine Markt- und Absatzanalyse durchgeführt werden. Dies war jedoch nicht die vorrangige Aufgabe dieser Arbeit und sollte daher in weiterführenden Arbeiten mit betriebswirtschaftlichem Schwerpunkt erörtert werden, auch im Hinblick auf den mobilen Überwachungsroboter selbst.

Betrachtet man die Analyse der Ausbringstrategien, so fällt vorrangig auf, dass die Berechnungsdauer bei beiden Verfahren recht hoch ist. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass das Verfahren zur Sichtbarkeitsberechnung in Matlab implementiert wurde. Eine Analyse vergleichbarer Implementierungen in C++ hat ergeben, dass diese im Schnitt um Faktor 10 bis 15 schneller sind.

#### 8.3 Aktuelle Weiterentwicklungen

Die Themen der vorliegenden Arbeit werden bereits im Fraunhofer-internen Projekt SENEKA -Sensornetzwerk mit mobilen Robotern für das Katastrophenmanagement - weiter vorangetrieben. Das SENEKA-Projekt kombiniert die Stärken von luft- und landgestützten Robotern sowie zweierlei Arten von Sensorsonden, um im Falle einer Katastrophe den Rettungskräften in kürzester Zeit alle für die Situationseinschätzung benötigten Daten zur Verfügung zu stellen. Dadurch soll wertvolle Zeit für die Bergung von verschütteten oder verletzten Personen gewonnen werden. Das Konzept der Sensorsonden wurde für SENEKA in zwei Varianten unterteilt. Zum einen werden High-End Sensorsonden entwickelt, welche mit hochwertigen Sensorsystemen wie Thermografiekameras, Schwenk-Neige-Einrichtungen und differentiellem GPS ausgestattet sind. Diese High-End Sensorsonden werden von landgestützten Robotern an strategisch wichtige Punkte transportiert und aufgestellt. Mitglieder der Einsatzleitung können somit die Situation von festen Punkten aus beurteilen und laufende Operationen beobachten. Zum anderen werden kleine Sensorbälle entwickelt, die sogenannten Best-Price Sensorsonden, welche, mit einem Vibrationsantrieb ausgestattet, in die obere Trümmerschicht "einrieseln" sollen. Mit einfachen Sensoren ausgestattet z.B. zur Detektion von ausströmendem Gas oder zur Erkennung einer Berührung durch eine verschüttete Person können diese Sensorsonden sowohl von land- als auch von luftgestützten Robotern ausgebracht werden. Auch die Ausbringung durch Rettungskräfte oder High-End Sensorsonden ist möglich. Eine Wiederaufnahme der Best-Price Sensorsonden ist aufgrund der geringen Kosten und der Möglichkeit des Einrieselns nicht zwingend erforderlich. Die High-End-Sensorsonden müssen jedoch in jedem Fall geborgen werden können, was eine komplexere Kinematik für die Handhabung erforderlich macht. Wie bereits erwähnt werden im SENEKA-Projekt die Ausbringstrategien für die High-End-Sonden im Außeneinsatz und die vertikalen Sichtwinkel erweitert. Zudem werden Verfahren für die Berücksichtigung der Schwenk-Neige-Einrichtung betrachtet. Die Nutzung während der Exploration ist jedoch nicht Gegenstand des Projektes. Allerdings werden Verfahren zur effizienten Repositionierung bei Änderung der Einsatzanforderung z.B. von Überblick auf Personensuche entwickelt.

### 8.4 Ausblick

Die vorliegende Arbeit trifft einige Einschränkungen und Vereinfachungen, was Potential für weiterführende und ergänzende wissenschaftliche Arbeiten liefert. Hierbei sei vor allem die Erweiterung der vorgestellten Lösung auf nicht ebenes Gelände wie z.B. Rampen, Treppen oder Unebenheiten im Außenbereich genannt. Dies impliziert nicht nur eine Anpassung der Algorithmen zur Ausbringung, sondern auch Anpassungen in der Kinematik zur Handhabung der Sensorsonden. In Extremfällen muss diese in die Lage versetzt werden, umgefallene Sonden zu bergen. Bei der Konstruktion der Sonden sollten andererseits Vorkehrungen gegen Umfallen getroffen werden. Die Anpassung der Lösung an die Anforderungen von Außenanwendungen wäre ebenfalls eine konsequente Weiterführung der hier vorgelegten Arbeit. Eine weitere Fortführung ist die Berücksichtigung der Sensorsichtwinkel in vertikaler Richtung. Wird in der vorliegenden Arbeit z.B. ein Tisch als komplettes Sichthindernis betrachtet, kann unter Berücksichtigung des vertikalen Sichtwinkels eine Positionierung der Sonde unter einem Tisch durchaus sinnvoll sein.

Werden in dieser Arbeit die Algorithmen zur Ausbringung nur auf bekannte Karten angewendet, so kann in weiteren Arbeiten die Nutzung in unbekannten Bereichen von Interesse sein. So könnte der Roboter während der Exploration des unbekannten Gebietes bereits Sensorsonden positionieren, um z.B. eine Funkverbindung mit einer Zentrale aufrechtzuerhalten oder um diese als Stützstellen bei der Navigation zu verwenden. Mit fortschreitender Exploration können diese Sonden dann von dem aussetzenden oder sogar einem anderen Roboter neu positioniert werden, um diese Aufgaben besser oder auch andere Aufgaben erfüllen zu können.

Für weitere Anwendungen ist auch eine Kombination der hier vorgestellten Ausbringstrategien denkbar. So könnte das Gridkarten-Verfahren in grober Auflösung verwendet werden, um optimale erste Ergebnisse zu liefern, welche durch einen genetischen Algorithmus z.B. während der Anfahrt des Roboters an die erste Ausbringposition noch optimiert werden. Gleichermaßen ist eine Verbesserung der Verfahren denkbar, wie z.B. beim Gridkartenansatz eine umgebungsbasierte Anpassung der Gridweite. So könnte in großflächigen Arealen mit wenig Hindernissen eine gröbere Gridkarte verwendet werden, als in verwinkelten Bereichen oder z.B. in Bereichen von Durchgängen oder Türen.

# 9 Summary

Due to high quality sensors, flexibility in use, incorruptibility and endurance mobile security and surveillance robots are an increase in the quality of today's surveillance techniques. Nevertheless, studies like the World Robotics Study 2011 (Hägele & (Mitarb.) u.a., 2011) show stagnation in the numbers of newly installed robots of this kind, even a saturation of the market is not yet existent. This thesis identifies as one possible reason for this the low simultaneity of the surveillance when using robots compared to fix installed security and surveillance systems. However, the later ones do not provide the flexibility of robots and involve higher installation costs and effort. This thesis suggests an approach combining the strength of both kinds of systems, which was achieved by introducing sensor probes. Regarding the problem three different types of surveillance have been identified such an approach has to be able to perform: Perimeter coverage, blanket coverage and Maximum-Breach-Path surveillance.

Furthermore the problem includes requirements for hard- and software of the proposed solution. To achieve flexibility at least passive mobility of the sensor probes is required. The possibility of communication between the probes and the robot or a base station is another requirement for the hardware. One requirement for the software is the efficient use of the sensor probes. Another one is the fact, that the sensor probes have a limited energy source and have to be frequently exchanged with fully charged probes. A central requirement concerns the costs for the proposed solution, which, due to psychological reasons should not be more than 20% of the initial investment for the robot.

The presented thesis deals with the development of autonomous, passive mobile sensor probes as an extension for security and surveillance robots and considers the overall system including sensor probes, deployment unit and deployment strategies. The performance of the overall system was analysed both in simulation and in real life.

For the depiction of the initial situation first terms and definitions have been given. Next classic surveillance methods with security staff and fix installed sensors were analyzed. Further today's of the shelf surveillance robots have been depicted. Neobotix's Secur-O-bot was presented in more detail due to the fact that this robot was used as the base platform for the demonstrator developed in this thesis. Finally, the application cases for sensor probes have been examined and divided into indoor and outdoor scenarios. Three different application scenarios relevant for this thesis have been identified: Perimeter surveillance, surveillance of sensitive areas and sequential blanket surveillance. As the requirements for the optimal deployment of sensor probes are more complex indoors than outdoors due to a potentially higher number of obstacles, the focus of this thesis was put on indoor use.

During the investigation of the state of the art wireless sensor networks, which are related to the presented approach, have been characterized. Afterwards communication protocols for self-organizing communication networks, so called ad-hoc networks, have been investigated. In addition, six of the, in context of ad-hoc networks frequently, discussed protocols have been examined. To solve the problem of efficiently deploying the sensor probes four different methods have been

investigated which can be used for the optimal deployment of sensor probes: Genetic algorithms, potential fields, maximal-breach path optimization with Voronoi-Diagrams and grid maps. Finally, the state of the art regarding the sensor probes themselves was explained. Here potential sensors, wireless communication forms, interfaces between sensors and communication device as well as possible ways of power supply have been depicted.

In chapter Analysis first requirements for sensor probes, deployment unit and deployment strategies were identified. The most important ones are: (1) Easy Scalability, (2) Over-Cross Use, (3) Configurability, (4) Robustness, (5) Suitable for Outdoor use and (6) Ease of Integration. Based on these requirements the information to be provided in order to fulfill request (2) Over-Cross Use have been identified. Regarding the requirements for the deployment unit they have been divided into mechanical and electrical ones. In case of the deployment strategies four main scenarios have been defined: 100% coverage, X% coverage, maximum coverage with n probes and best probes to coverage ratio. From these the requirements flexibility, fast calculation, easy scalability and interoperability have been concluded. The methods for optimal deployment presented in the state of the art have been found most promising for further investigation.

Due to consideration of an overall system chapter Conception was divided into three sections: Sensor probes, deployment unit, and deployment strategies. In the section sensor probes suitable concepts for the five subcomponents – sensor, communication interface with repeater function, energy supply, interface for recharging and mechanical interface for handling and transportation by the robot – have been developed under consideration of the state of the art and the defined requirements.

For the concept of the deployment unit first of all its main functions have been specified: Storage of sensor probes, handling of probes for deployment and recovery, identification of probes and communication with the robot. For storage both sorted and unsorted versions have been examined. As the sorted storage with circular arranged cavities allows the use of only one degree of freedom for the handling unit this concept was chosen due to cost saving. To be able to assure correct orientation of directional sensor probes before deployment a passive kinematic for twist compensation without the use of additional sensors or actuators was developed as well. In the sequel, the control unit for the deployment unit was developed followed by the interface between deployment unit and robot.

The conception of the deployment strategies dealt with the adaption of the methods genetic algorithm and grid map to the specific problem. In the first case new methods for initialization of the individuals and for calculation of the fitness have been developed. For an optimized initialization visibility and overlapping areas have been introduced, which already in the first generation lead to a high coverage by the sensors. For calculation of the fitness a geometric procedure was developed to efficiently determine the effective field of view in presence of obstacles. The method of grid maps was combined with the greedy technique. The coverage calculation, which was initially developed for the genetic algorithm, was extended by an efficient calculation of angular segments. For later evaluation of the performance of the deployment strategies a simulation environment was developed for this thesis using Matlab. Chapter Realization describes the actual setup of the prototype consisting of sensor probes and deployment unit. The prototype itself was already successfully presented in combination with the security robot Secur-O-bot on the AUTOMATICA 2008 in Munich.

A benchmark for the deployment strategies was defined in chapter 6. This allows the comparison of the results of both approaches. Furthermore, the boundary conditions and parameters for the simulation are described. First of all, it was necessary to identify the optimal parameters for both approaches. As the genetic algorithm in contrast to the grid map approach not always produce the same results, further statistic data was evaluated for this approach. After the identification of the optimal parameters for both approaches their performance was compared. Here the genetic algorithm was better concerning the computational time, the grid map with greedy produced the better coverage and stability in the results. It can be concluded that the choice of the approach depends on the amount of time available.

For the analysis of the added value from sensor probes to mobile security and surveillance robots the value of average coverage was introduced. This value describes how much of the perimeter or area to be surveyed is simultaneously covered by the sensors of the robot in average over time. The average coverage was then calculated for both, robot alone and with sensor probes. Here it was found that the robot alone has an average coverage between around 5 % and 15 % in the chosen scenarios. The use of sensor probes increased this coverage by factors 4,3 to 7,5 so almost one order of magnitude.

Hence in this thesis a functional system was designed, build and analyzed that enables the use of sensor probes to an existing security robot. The system consists of all necessary hard- and software components and offers a measurable added value for security and surveillance robots for a reasonable price.

## 10 Literaturverzeichnis

- Abusalah, L., Khokhar, A. & Guizani, M., 2008. A survey of secure mobile Ad Hoc routing protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **10**(4), S. 78–93.
- Adriaens, J., Megerian, S. & Potkonjak, M., 2006. Optimal Worst-Case Coverage of Directional Field-of-View Sensor Networks. In: 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks.: Secon 2006 : 25-28 September 2006, Reston, Virginia, USA. Piscataway, N.J: IEEE, S. 336–345.
- Akihiko, O. & Wentz, D., 2009. "Banryu" Press Release: tmsuk and SANYO reveals new and improved "Banryu" home-robot. Verfügbar: http://jp.sanyo.com/koho/hypertext4eng/0211news-e/1106-e.html [Zugriff: 2011-01-04].
- ALSOK, 2006. ALSOK: Research and development. Verfügbar: http://www.alsok.co.jp/en/r\_and\_d.html [Zugriff: 2011-01-05].
- Arora, V. & Rama Krishna, C., 2010. Performance evaluation of routing protocols for MANETs under different traffic conditions. In: 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology. ICCET2010: 16-18 April 2010, Chengdu, China. Piscataway, NJ: IEEE, S. 79– 84.
- Aurenhammer, F., 1991. Voronoi diagrams: A survey of a fundamental geometric data structure. *ACM Computing Surveys* **23**(3), S. 345–405.
- Beermann, B., 2008. *Nacht- und Schichtarbeit ein Problem der Vergangenheit?* Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Birk, A., 2002. RoboGuard, a teleoperated mobile security robot. *Control engineering practice* **10**(11), S. 1259–1264.
- Cărbunar, B., u.a., 2006. Redundancy and coverage detection in sensor networks. *ACM Trans. Sen. Netw.* **2**(1), S. 94–128.
- Chakrabarty, K., u.a., 2001. Coding theory framework for target location in distributed sensor networks. In: *International Conference on Information Technology: Coding and Computing*, 2001. ITCC 2001: 2-4 April, 2001, Las Vegas, Nevada. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society, S. 130–134.
- Chakrabarty, K., u.a., 2002. Grid coverage for surveillance and target location in distributed sensor networks. *IEEE Trans. Comput.* **51**(12), 1448–1453.
- Chen, H., u.a., 2009. A Multi-objective Optimisation Approach to IDS Sensor Placement. In: Herrero, Álvaro, u.a. (Hg.): *Computational Intelligence in Security for Information Systems*. Berlin: Springer. (Advances in Soft Computing), S. 101–108.
- Chiba, N., Nishizeki, T. & Saito, N., 1981. A linear 5-coloring algorithm of planar graphs. J. *ALGORITHMS* 2(4), S. 317–327.

Verfügbar: http://citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.159.2346.

- Chien, T., u.a., 2007. Develop a Multiple Interface Based Fire Fighting Robot. In: 4th IEEE International Conference on Mechatronics. ICM2007: 8-10 May, 2007, Kumamoto, Japan. Piscataway, N.J.: IEEE Xplore, S. 1–6.
- Chvatal, V., 1975. A combinatorial theorem in plane geometry. *Journal of Combinatorial Theory, Series B* **18**(1), S. 39–41.
- Ciccimaro, D. A., u.a., 1999. A Supervised Autonomous Security Response Robot. In: American Nuclear Society 8th International Topical Meeting on Robotics and Remote Systems (ANS'99): 25-29 April, 1999, Pittsburgh Pennsylvania, U.S.A. Pittsburgh: American Nuclear Society, S. 1– 17.

- Cormen, T. H., Leiserson, C. E. & Rivest, R. L., 1990. Introduction to algorithms. Cambridge Mass. u.a: MIT Pr. (The MIT electrical engineering and computer science series).
- Cruz, A., Vélez, W. & Thomson, P., 2010. Optimal sensor placement for modal identification of structures using genetic algorithms – a case study: the olympic stadium in Cali, Colombia. Annals OR 181(1), S. 769-781.

Verfügbar: http://dblp.uni-trier.de/db/journals/anor/anor181.html#CruzVT10.

- Dhillon, S. S. & Chakrabarty, K., 2003. Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks. In: IEEE International Conference on Wireless Communications and Networking. WCNC 2003: 16-20 March 2003, New Orleans, LA, USA. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 1609-1614.
- Dhillon, S. S., Chakrabarty, K. & Iyengar, S., 2002. Sensor placement for grid coverage under imprecise detections. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion: 8-11 June, 2002, Annapolis, MD, USA. [Piscataway, N.J.]: IEEE, S. 1581-1587.
- DIN EN 1627 2011-09, 2011. Türen, Fenster, Vorhangfassaden, Gitterelemente und Abschlüsse -Einbruchhemmung - Anforderungen und Klassifizierung.
- Everett, H. R., Gilbreath, G. A. & Ciccimaro, D. A., 2001. An Advanced Telereflexive Tactical Response Robot. Auton. Robots 11(1), S. 39-47.

Verfügbar: http://dx.doi.org/10.1023/A:1011204111813.

Flann, N. S., Moore, K. L. & Ma, L., 2002. A small mobile robot for security and inspection operations. Control engineering practice 10(11), S. 1265–1270.

Glassner, A. S., 1989. An introduction to ray tracing. London u.a: Acad. Press.

- Goldberg, D. E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Repr. with corr. Reading, Mass: Addison-Wesley.
- Hägele, M. & (Mitarb.) u.a., 2010. World robotics 2010: Service robots. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH.
- Hägele, M. & (Mitarb.) u.a., 2011. World robotics 2011: Service robots. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH.
- Hägele, M. & (Mitarb.) u.a., 2012. World robotics 2012: Service Robots. Frankfurt am Main: VDMA Verlag GmbH.
- Hannig, F., 2009. Stand und Entwicklungspotenzial der Speichertechniken für Elektroenergie -Ableitung von Anforderungen an und Auswirkungen auf die Investitionsgüterindustrie. Freiburg, Breisgau. (BMWi-Auftragsstudie, Bd. 08/28).
- Hao Chen, u.a., 2010. Optimising IDS Sensor Placement. In: International Conference on Availability, Reliability, and Security. ARES '10: 15-18 February, 2010, Krakow, Poland. Piscataway, NJ: IEEE, S. 315-320.
- Herrero, A., u.a. (Hg.), 2009. Computational Intelligence in Security for Information Systems. Berlin: Springer. (Advances in Soft Computing).
- 2006. Polygon Clipper File Hölz, S... \_ Exchange MATLAB Central. Verfügbar: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8818-polygon-clipper [Zugriff: 2011-10-12].
- Howard, A., Matarić, M. J. & Sukhatme, G. S., 2002. Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem. In: Asama, Hajime, u.a. (Hg.): Distributed Autonomous Robotic Systems 5. Japan: Springer, S. 299-308. Verfügbar: http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-65941-9 30.
- Humanitarian Technology Network, 2009. Life-Saving Sensor networks for post disaster applications. Verfügbar: http://www.ieeehtn.org/htn/index.php/Life-

Saving Sensor networks for post disaster applications [Zugriff: 2011-01-08].

Hyland, M. T., u.a., 2007. Simulation-Based Performance Evaluation of Mobile Ad Hoc Routing Protocols in a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles. In: 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. AINAW '07: 21-23 May, 2007, Niagara Falls, Ontario, Canada. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, S. 249– 256.

iRobot, 2011. iRobot Ground Robots - 510 PackBot.

Verfügbar: http://www.irobot.com/gi/ground/510\_PackBot [Zugriff: 2011-01-09].

Ishikawa, M., 2009. "T-34" Press release: New security robot equipped with net launcher "T-34" controlled by cellular phone is newly developed.

Verfügbar: http://www.tmsuk.co.jp/english/pdf/t34.pdf [Zugriff: 2011-01-04].

ISO 8373:2012, 2012. Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch. 03. Aufl. Berlin: Beuth.

- ITWissen, 2012a. *Ad-hoc-Netz*. Verfügbar: http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Ad-hoc-Netzwerk-ad-hoc-network.html [Zugriff: 2014-02-26].
- ITWissen, 2012b. *Routing*. Verfügbar: http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Routing-routing.html [Zugriff: 2014-02-26].
- Jacquenot, G., 2008. *Polygon\_Intersection File Exchange MATLAB Central*. Verfügbar: http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18173 [Zugriff: 2011-10-12].
- Jacquet, P., u.a., 2001. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. In: Multi Topic Conference, 2001. IEEE INMIC 2001. Technology for the 21st Century. Proceedings. IEEE International DOI - 10.1109/INMIC.2001.995315, S. 62–68.
- Johnson, D., Ntlatlapa, N. & Aichele, C. Simple pragmatic approach to mesh routing using BATMAN. In: 2nd IFIP International Symposium on Wireless Communications and Information Technology in Developing Countries. WCITD 2008: 6-8 October, 2008, Pretoria, South Africa, S. 1–10.
- Johnson, D. B. & Maltz, D. A., 1996. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. *Kluwer International Series in Engineering and Computer Science* **353**, S. 153–181.
- Karp, B., u.a., 2000. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile Computing and Networking. MobiCom 2000: 6-11 August, 2000, Boston, Massachusetts, USA. New York: ACM, S. 243– 254.
- Katevas, N., u.a., 2007. Test environment for VSN routing algorithms using mobile robot. In: Grgić, Mislav & Grgić, Sonja (Hg.): 49th International Symposium focused on Mobile Multimedia. ELMAR 2007: 12-14 September, 2007, Zadar, Croatia. Zadar: Croatian Society Electronics in Marine, S. 219–222.
- Khatib, O., 1985. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA* '85: 25 28 March, 1985, St. Louis, Missouri, USA. Silver Spring, Md: IEEE Computer Society, S. 500–505.
- Kolwitz, K. & Anker, S., 2012. Teure Extras: Sonderwünsche für das Auto kosten Wuchersummen Nachrichten Motor DIE WELT.

Verfügbar: http://www.welt.de/motor/article112012196/Sonderwuensche-fuer-das-Auto-kosten-Wuchersummen.html [Zugriff: 2013-01-22].

- Kung, H.-Y., Huang, C.-M. & Ku, H.-H., 2008. Efficient Sensor Deployment Control Schemes and Performance Evaluation for Obstacle and Unknown Environments. *Third International Conference on Wireless and Mobile Communications. ICWMC* '07 45(2), S. 231–263. Verfügbar: http://dx.doi.org/10.1007/s11277-007-9411-z.
- Lewis, F. L., 2004. Wireless Sensor Networks. In: Cook, Diane J. & Das, Sajal K. (Hg.): *Smart Environments*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, S. 11–46.

- Luo, R. C., u.a., 2006. Multisensor Based Security Robot System for Intelligent Building. In: IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems: 3-4 September, 2006, Heidelberg, Germany. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 408–413.
- Luo, R. C., Lin, T. Y. & Su, K. L., 2009. Multisensor based security robot system for intelligent building. *Robotics and autonomous systems* **57**(3), S. 330–338.
- Luo, R. C. & Su, K. L., 2003. A multiagent multisensor based real-time sensory control system for intelligent security robot. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA* '03: 14-19 September, 2003, Taipei, Taiwan. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 2394–2399.
- Marengoni, M., u.a., 2000. A system to place observers on a polyhedral terrain in polynomial time. *Image and Vision Computing* **18**(10), S. 773–780.
- Mattikalli, R., u.a., 2007. Optimal Sensor Selection and Placement for Perimeter Defense. In: IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. CASE 2007: 22-25 September, 2007, Scottsdale, Arizona, USA. Piscataway, N.J: IEEE, S. 911–918.
- Megerian, S., u.a., 2005. Worst and best-case coverage in sensor networks. *IEEE TRANSACTIONS* ON MOBILE COMPUTING 4(1), S. 84–92.
- Meguerdichian, S., u.a., 2001. Coverage Problems in Wireless Ad-hoc Sensor Networks. In: Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. INFOCOM 2001: 22-26 April, 2001, Anchorage, Alaska, USA. Piscataway, N.J.: IEEE Operations Center, S. 1380–1387.
- Metzger, B., 2010. Bauherren-Handbuch: Schlüsselfertig bauen vom Architektenhaus bis zum Bauträgerobjekt. 9. Aufl. München: Haufe.
- Myers, D. G. & Reiss, M., 2008. *Psychologie*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag. Verfügbar: http://books.google.de/books?id=DFNaiswz3eUC.
- National Instruments, 2008. *Was ist ein Wireless-Sensornetzwerk?: 23 September, 2008.* Verfügbar: http://www.ni.com/white-paper/7142/de/ [Zugriff: 2014-02-26].
- NewMedia-NET, 2005. Unleash Your Router. Verfügbar: http://www.dd-wrt.com/site/index [Zugriff: 2011-11-07].
- O'Rourke, J., 1987. Art Gallery Theorems and Algorithms. Oxford: Oxford University Press. (International Series of Monographs on Computer Science, 3).
- Park, V. D. & Corson, M. S., 1997 // 2002, c1997. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. In: Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. INFOCOM '97: 7-12 April, 1997, Kobe, Japan. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society Press, S. 1405–1413.
- Perkins, C. E. & Royer, E. M., 1999. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. In: Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. WMCSA '99: 25-26 February, 1999, New Orleans, LA, USA. Piscataway, N.J.: IEEE Computer Society, S. 90–100.
- Pfeiffer, K., 2004a. Secur-O-bot: Autonomer Roboter zur Bewachung, Inspektion, Messung, Diagnose und Telepräsenz.

Verfügbar: http://www.care-o-bot.de/Produktblaetter/PB\_300\_311.pdf [Zugriff: 2011-01-04].

- Pfeiffer, K., 2004b. DE102004024917B4 Eigenfortbewegungsfähige Plattform sowie Verfahren zur Überwachung einer Umgebung mit der Plattform.
- Pfeiffer, K. & Schraft, R. D., 2004. Decentralized sensor probe positioning for security and surveillance robots. In: *IEEE International Workshop on Safety, Security, and Rescue Robotics.* SSRR 2004: 24-26 May, 2004, Bonn, Germany. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Poduri, S. & Sukhatme, G. S., 2004. Constrained coverage for mobile sensor networks. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA '04: 26 April - 1 May, 2004, New Orleans, LA, USA. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 165–171.

- Polastre, J., u.a., 2006. Analysis of Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring. In: Raghavendra, Cauligi S., Sivalingam, Krishna M. & Znati, Taieb (Hg.): Wireless sensor networks. New York: Springer, S. 399–423.
- RoboWatch, 2002. *Mosro Mini Brochure*. Verfügbar: http://www.quadratec-ltd.co.uk/Downloads/ Mosro%20Mini%20Brochure.pdf [Zugriff: 2011-01-04].

RoboWatch, 2003. *MOSRO1 Brochure*. Verfügbar: http://www.quadratec-ltd.co.uk/Downloads/ MOSRO1%20Brochure.pdf [Zugriff: 2011-01-04].

- RoboWatch, 2004. *Datasheet OFRO Security outdoors*. Verfügbar: http://www.quadratecltd.co.uk/Downloads/QL%200FRO%20Brochure.pdf [Zugriff: 2011-01-04].
- SECOM, 2009. Key Technologies for SECOM Robot X.

Verfügbar: http://www.secom.co.jp/isl/e2/research/ps/report01/ [Zugriff: 2011-01-05].

- Shimosasa, Y., u.a., 1999. Security Service System Using Autonomous Mobile Robot. In: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. SMC '99: 12-15 October, 1999, Tokyo, Japan. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 825–829.
- Sood, R. A., 2000. DE10013084A1 Aufklärungssystem.
- Spiegel, 2008. Olympia-Einsatz: Berliner Wachroboter patrouillieren in Peking SPIEGEL ONLINE. Verfügbar: http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/olympia-einsatz-berlinerwachroboter-patrouillieren-in-peking-a-569854.html [Zugriff: 2013-01-08].
- Stolkin, R., Vickers, L. & Nickerson, J. V., 2007. Using Environmental Models to Optimize Sensor Placement. *IEEE Sensors Journal* 7(3), S. 319–320.
- TechJapan, 2005. *Tmsuk Sanyo's "T7-4 Roborior"*. Verfügbar: http://www.techjapan.com/Article736.html [Zugriff: 2011-01-04].
- Tian, W. J. & Geng, Y., 2009a. A New Household Security Robot System Based on Wireless Sensor Network. In: Zhu, Junwu & Luo, Qi (Hg.): Second International Conference on Future Information Technology and Management Engineering. FITME 2009: 13-14 December, 2009, Sanya, China. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, S. 187–190.
- Tian, W. J. & Geng, Y., 2009b. Environment Monitoring System of Household Security Robot Based on Wireless Mesh Network. In: Hu, Zhengbing (Hg.): International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. NSWCTC '09: 25-26 April, 2009, Wuhan, China. Piscataway, NJ: IEEE, S. 176–180.
- Wiesspeiner, G., 2000. Akkus und Ladegeräte für autonome Roboter und andere mobile Anwendungen. *Design & Elektronik*, S. 437–447.

Verfügbar: http://www.bticcs.com/pub/d+e2000.pdf [Zugriff: 2013-01-08].

- Wietfeld, C., 2008. Forschungsbericht GFFT-2008-004: Trendanalyse Funktechnologien.
- Wojciechowski, A., 2006a. Camera Positioning Support Based on Potential Field in a Static Virtual Environment. In: Wojciechowski, K., u.a. (Hg.): *Computer Vision and Graphics*: Springer Netherlands. (Computational Imaging and Vision), S. 851–856. Verfügbar: http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-4179-9 124.
- Wojciechowski, A., 2006b. Generation of a Static Potential Field for Camera Positioning Support in a Virtual Environment. In: Wojciechowski, K., u.a. (Hg.): *Computer Vision and Graphics*: Springer Netherlands. (Computational Imaging and Vision), S. 857–862.
- Yoon-Gu Kim, u.a., 2006. Home Security Robot based on Sensor Network. In: International Joint Conference SICE-ICASE.: 18-21 October, 2006, Busan, Korea. Piscataway, N.J.: IEEE, S. 5977–5982.
- Zeiger, F., Kraemer, N. & Schilling, K., 2008. Commanding mobile robots via wireless ad-hoc networks: A comparison of four ad-hoc routing protocol implementations. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation. ICRA 2008: 19-23 May, 2008, Pasadena, CA, USA*. Pitscataway, N.J.: IEEE Xplore, S. 590–595.

# 11 Anhang

11.1



Ergebnisse der Simulationen des GA – Erste Optimierungsphase

Abbildung 11.1: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^\circ$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda =$ 100,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.2: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.3: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^\circ$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.4: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.5: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.6: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



11.1.2 Plots der Standardabweichungen

Abbildung 11.7: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda=100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.8: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100, \lambda = 100, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.9: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.10: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.11: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100, \lambda = 100, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.12: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



11.1.3 Plots der Berechnungsdauern

Abbildung 11.13: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.14: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.15: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.16: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.17: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.18: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $\mu = 100$ ,  $\lambda = 100$ ,  $G_{max} = 200$ ,  $\varepsilon$  deaktiviert

11.1.4 Ergebnisse in tabellarischer Form

Tabelle 11.1: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für  $\overline{F}$ ,  $\sigma$  und t – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – Die markierten Werte stellen die jeweils besten Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.

Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer			Büroetage			Lagerhalle		
Parametersatz	$\overline{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]
1	64,37	0,70	96,6	68,20	0,61	109,4	59,10	0,49	75,7
2	64,55	0,34	97,9	67,73	0,51	107,4	58,75	0,48	77,8
3	64,71	0,59	97,6	68,07	0,59	108,2	59,01	0,38	77,4
4	64,94	0,44	99,5	68,44	0,63	111,8	59,02	0,45	76,5
5	64,88	0,33	97,6	68,13	0,74	111,8	58,81	0,67	76,9
6	64,68	0,29	171,9	68,06	0,80	171,4	59,30	0,40	130,5
7	64,50	0,61	172,3	67,94	0,54	178,6	59,15	0,36	134,5

Einsatzfall	Fertig	gungshall Foyer	le mit	I	Büroetage	9	Lagerhalle		
Parametersatz	$\overline{F}/[\%]$	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$\overline{F}/[\%]$	σ/[%]	<i>t</i> /[s]
8	64,49	0,39	172,4	68,10	0,52	177,0	59,08	0,41	133,5
9	64,60	0,27	173,0	68,08	0,52	177,0	58,96	0,43	134,2
10	64,53	0,24	173,6	68,21	0,61	178,2	59,14	0,36	133,5
11	64,62	0,39	238,1	68,36	0,60	236,2	59,20	0,35	184,8
12	64,45	0,31	239,5	68,07	0,55	240,3	59,19	0,31	188,3
13	64,71	0,43	240,2	67,69	0,71	242,6	59,22	0,38	188,7
14	64,52	0,32	240,9	67,88	0,49	240,5	59,23	0,29	189,0
15	64,54	0,24	240,9	68,22	0,60	239,4	59,15	0,34	187,0
16	64,41	0,24	299,2	67,67	0,77	287,6	59,04	0,42	232,0
17	64,45	0,22	301,4	68,01	0,78	296,9	59,30	0,36	235,1
18	64,51	0,24	301,0	67,88	0,58	296,0	59,13	0,26	234,7
19	64,40	0,30	302,3	67,67	0,50	295,3	59,03	0,24	235,8
20	64,43	0,33	301,2	68,18	0,65	294,8	59,08	0,33	234,0
21	64,39	0,21	353,0	66,97	0,61	333,2	58,67	0,39	274,6
22	64,20	0,29	354,5	67,31	0,64	344,7	58,76	0,22	278,6
23	64,32	0,14	356,8	67,37	0,62	344,0	58,73	0,54	278,7
24	64,40	0,26	355,3	67,35	0,61	342,9	58,68	0,36	279,7
25	64,33	0,22	356,6	67,11	0,55	341,8	58,72	0,47	278,7
26	64,01	0,35	404,0	66,29	0,82	372,6	58,48	0,31	309,7
27	63,90	0,30	404,3	66,34	0,65	382,2	58,35	0,45	319,1
28	63,93	0,31	405,1	66,56	0,67	383,9	58,09	0,28	319,6
29	63,76	0,47	404,3	66,54	0,55	383,5	58,39	0,53	319,6
30	63,87	0,53	403,9	65,99	0,62	384,3	58,25	0,54	319,6
31	63,28	0,57	447,0	65,49	0,64	406,5	57,81	0,58	345,9
32	63,31	0,60	448,5	65,25	0,59	420,2	57,64	0,36	356,7

Anhan	g
-------	---

Einsatzfall	Fertig	gungshall Foyer	le mit	Büroetage			Lagerhalle			
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	
33	63,37	0,74	447,2	65,54	0,76	419,9	57,77	0,55	357,6	
34	63,20	0,70	448,5	65,23	0,71	419,7	57,79	0,31	356,6	
35	63,40	0,67	448,5	65,60	0,65	417,5	57,82	0,34	354,2	
36	62,57	0,80	487,8	64,65	0,84	434,6	57,43	0,55	378,5	
37	63,27	0,75	490,0	64,72	0,89	449,5	57,16	0,51	390,1	
38	62,99	0,95	490,4	64,60	0,79	448,1	57,38	0,67	390,5	
39	62,82	0,67	489,3	64,62	0,95	446,7	57,54	0,21	391,7	
40	62,56	0,46	488,0	64,12	1,20	448,0	57,05	0,52	391,2	
41	62,04	0,89	525,6	63,34	0,94	459,6	57,07	0,57	409,3	
42	61,64	0,61	526,8	63,67	1,02	473,4	56,77	0,65	421,0	
43	61,38	1,00	524,8	63,65	0,51	473,7	57,06	0,52	421,4	
44	61,91	0,92	525,7	62,90	1,00	472,9	56,94	0,64	421,5	
45	62,21	0,95	528,8	63,39	0,75	473,2	56,56	0,46	422,3	
46	61,70	0,73	559,6	62,25	1,05	480,2	56,00	0,47	442,2	
47	61,26	1,15	561,0	62,17	1,80	494,6	56,18	0,56	448,8	
48	61,12	0,95	561,6	61,95	0,96	493,2	56,24	0,65	449,5	
49	61,50	1,08	561,3	62,09	0,69	492,7	56,37	0,83	449,6	
50	61,55	0,77	561,3	62,59	1,10	493,3	56,56	0,66	448,7	

Tabelle 11.2: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für  $\overline{F}$ ,  $\sigma$  und t – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – Die markierten Werte stellen die jeweils besten Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.

Einsatzfall	Fertig	gungshall Foyer	e mit	Büroetage			Lagerhalle		
Parametersatz	$\overline{F}/[\%]$	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$\overline{F}$ /[%]	$\sigma$ /[%]	<i>t</i> /[s]	$\overline{F}/[\%]$	σ/[%]	<i>t</i> /[s]
1	61,84	1,48	47,1	38,14	1,86	44,3	54,29	1,84	44,6

Einsatzfall	Fertig	gungshall Foyer	le mit	I	Büroetage	9	Lagerhalle		
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]
2	61,80	1,24	48,9	38,78	1,89	45,9	54,69	1,63	46,8
3	61,59	2,39	48,8	38,47	1,74	46,2	55,88	1,15	46,3
4	61,87	2,33	48,0	38,93	1,61	45,8	54,43	1,08	46,4
5	61,81	1,77	48,6	38,88	1,51	45,2	55,87	1,89	47,0
6	62,28	1,21	80,3	39,28	1,57	68,2	55,19	1,05	76,1
7	62,36	0,85	83,4	39,55	1,39	70,8	55,04	1,39	78,9
8	62,56	1,56	83,2	38,94	1,68	69,7	55,68	1,38	78,9
9	61,21	3,27	83,9	38,97	1,80	70,4	55,27	1,14	79,4
10	62,62	0,69	83,5	39,26	1,51	70,6	55,42	1,19	78,4
11	62,08	1,14	111,1	38,42	1,09	90,2	54,88	1,42	108,1
12	61,60	1,16	115,6	39,31	1,67	92,2	55,17	0,91	109,4
13	61,81	0,89	115,7	38,98	1,31	92,9	54,63	1,35	110,2
14	62,50	1,30	115,6	38,81	1,98	92,9	55,03	1,47	109,4
15	61,53	0,87	115,6	38,95	1,78	92,8	54,57	0,71	108,8
16	60,55	1,06	139,8	39,46	0,99	110,9	53,42	1,09	133,8
17	60,08	1,12	145,1	39,00	1,90	114,3	53,28	0,93	136,6
18	59,98	0,87	146,0	39,40	1,52	115,2	53,07	0,99	136,9
19	60,52	1,41	145,4	39,40	0,97	113,7	53,29	1,40	138,2
20	60,64	1,13	145,4	39,61	1,57	114,2	52,79	0,98	138,0
21	59,05	0,99	167,5	38,74	1,06	128,6	51,52	1,45	158,5
22	58,89	1,03	173,5	39,37	1,25	133,3	51,48	2,06	163,8
23	58,78	1,26	173,9	39,11	1,33	133,7	51,88	1,54	164,3
24	58,21	1,21	173,3	38,70	1,96	134,0	51,50	1,44	164,7
25	58,40	1,27	172,7	38,31	1,16	135,9	50,67	1,45	164,1
26	56,22	1,46	192,3	37,62	1,29	146,2	49,30	1,35	183,2

5

Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer			I	Büroetage	e	Lagerhalle			
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$\overline{F}/[\%]$	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	
27	56,26	1,19	198,7	38,36	1,27	151,8	48,46	1,56	189,0	
28	56,72	1,61	199,4	38,44	1,47	153,2	48,77	1,55	189,2	
29	57,17	1,68	200,2	38,17	1,47	153,1	49,01	1,59	188,7	
30	56,28	1,39	199,0	37,68	1,50	153,5	48,79	1,39	189,1	
31	55,44	1,56	216,1	36,32	1,27	165,2	47,05	1,89	206,4	
32	54,64	1,05	223,0	37,52	1,44	170,2	46,99	1,64	211,3	
33	54,69	1,40	222,6	37,37	1,47	170,0	46,47	1,49	211,8	
34	54,70	1,10	223,1	37,98	1,01	169,2	46,54	1,61	211,8	
35	54,98	2,24	223,1	37,40	1,72	169,4	47,07	1,62	211,3	
36	53,39	0,71	237,2	35,94	1,34	179,7	44,99	1,63	226,0	
37	53,19	2,01	245,4	36,26	1,45	185,7	45,94	1,54	232,0	
38	52,67	1,54	244,8	36,83	1,19	185,6	43,88	1,45	231,7	
39	52,35	1,20	245,0	36,55	1,27	185,2	44,67	1,36	231,9	
40	53,04	1,57	245,7	36,44	1,71	185,8	44,92	2,10	231,9	
41	51,77	1,64	258,9	34,36	1,22	193,9	43,25	2,22	244,3	
42	51,07	2,02	266,6	35,56	1,49	201,0	43,60	1,22	251,0	
43	51,62	1,92	266,7	34,49	1,03	200,8	42,95	1,81	250,8	
44	52,27	2,11	267,0	35,93	1,95	201,1	42,82	1,97	251,3	
45	51,20	1,64	265,9	34,39	1,49	203,8	41,84	0,96	252,0	
46	50,03	1,42	278,1	34,15	1,43	207,3	41,54	2,36	261,2	
47	50,03	0,92	286,4	34,01	0,83	215,0	42,13	2,10	268,1	
48	49,51	1,98	285,9	33,35	1,56	215,2	41,19	1,48	268,0	
49	49,61	1,50	285,8	32,99	0,85	214,9	41,14	1,55	268,5	
50	49,47	1,14	286,1	33,36	1,36	213,9	40,34	1,14	268,5	

Generationen	50		10	00	15	50	200		
Konfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2	
Parametersatz	$ar{ar{F}}$ /[%]	$ar{F}$ /[%]							
1	62,63	47,44	63,40	50,10	63,63	51,06	63,78	51,43	
2	62,75	47,99	63,43	50,50	63,60	51,38	63,68	51,76	
3	62,81	48,21	63,64	50,70	63,85	51,62	63,93	51,98	
4	63,03	48,50	63,90	50,57	64,03	51,31	64,14	51,74	
5	62,98	48,57	63,70	50,73	63,87	51,74	63,94	52,19	
6	62,69	47,90	63,73	50,66	63,94	51,67	64,01	52,25	
7	62,50	47,47	63,55	50,69	63,76	51,81	63,87	52,32	
8	62,51	47,67	63,59	50,61	63,78	51,83	63,89	52,39	
9	62,64	47,52	63,56	50,04	63,76	51,28	63,88	51,82	
10	62,60	47,64	63,64	50,80	63,87	52,02	63,96	52,43	
11	61,89	45,85	63,44	49,37	63,88	50,94	64,06	51,80	
12	62,04	46,87	63,42	49,92	63,75	51,17	63,90	52,03	
13	62,15	47,04	63,40	49,84	63,70	51,24	63,87	51,81	
14	61,99	46,90	63,41	50,25	63,77	51,43	63,88	52,11	
15	62,05	46,44	63,48	49,77	63,86	50,96	63,97	51,68	
16	61,15	45,06	62,88	48,64	63,47	50,23	63,71	51,14	
17	61,60	44,95	63,14	48,68	63,65	50,02	63,92	50,79	
18	61,34	44,80	62,96	48,30	63,58	49,98	63,84	50,82	
19	61,51	44,69	62,86	48,50	63,42	50,13	63,70	51,07	
20	61,45	45,14	62,97	48,78	63,63	50,11	63,90	51,02	
21	60,53	42,94	62,28	46,41	62,97	48,47	63,34	49,77	
22	60,69	43,32	62,38	46,94	63,08	48,77	63,42	49,91	
23	60,53	42,68	62,28	46,76	63,02	48,54	63,48	49,93	

Tabelle 11.3: Mittelwerte von  $\overline{F}$  über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen für beide Sensorkonfigurationen.
hang
hang

Generationen	5	0	10	00	15	50	20	200	
Konfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2	
Parametersatz	$ar{ar{F}}$ /[%]								
24	60,41	42,44	62,47	46,32	63,03	48,43	63,48	49,47	
25	60,43	42,97	62,16	46,18	62,93	48,02	63,38	49,13	
26	59,89	41,33	61,50	44,60	62,46	46,90	62,93	47,71	
27	59,95	41,33	61,64	44,84	62,44	46,51	62,86	47,69	
28	60,16	41,41	61,81	44,86	62,46	46,72	62,86	47,98	
29	59,52	41,70	61,57	45,00	62,33	46,98	62,89	48,12	
30	59,73	41,51	61,38	45,22	62,25	46,81	62,70	47,58	
31	59,08	39,94	60,71	43,37	61,58	44,71	62,19	46,27	
32	58,95	40,52	60,65	43,82	61,64	45,37	62,07	46,38	
33	59,13	40,14	60,83	43,32	61,79	45,08	62,23	46,17	
34	58,85	40,08	60,62	43,10	61,59	45,10	62,07	46,40	
35	58,71	40,59	60,97	43,71	61,79	45,47	62,28	46,48	
36	58,33	39,10	60,22	41,79	61,10	43,52	61,55	44,77	
37	57,99	38,80	60,09	42,30	61,27	43,87	61,72	45,13	
38	58,05	39,23	60,19	42,09	61,09	43,30	61,66	44,46	
39	58,07	38,90	60,48	42,27	61,19	43,70	61,66	44,52	
40	58,10	39,12	60,21	42,44	60,84	44,05	61,24	44,80	
41	57,56	37,91	59,18	40,35	60,30	42,16	60,81	43,13	
42	57,12	38,47	59,43	40,96	60,31	42,30	60,69	43,41	
43	57,22	38,01	59,13	40,96	59,97	42,17	60,70	43,02	
44	57,45	37,87	59,25	40,20	60,06	41,91	60,58	43,67	
45	57,19	37,68	59,27	39,96	60,18	41,26	60,72	42,47	
46	56,68	37,67	58,15	39,77	59,35	41,29	59,98	41,90	
47	55,99	37,47	57,98	39,92	59,12	41,06	59,87	42,05	
48	56,15	36,88	58,12	39,08	59,22	40,63	59,77	41,35	

Generationen	50		100		1:	50	200	
Konfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	$\overline{ar{F}}$ /[%]	$ar{F}$ /[%]	$ar{F}$ /[%]	$ar{F}$ /[%]	$ar{ar{F}}$ /[%]	$ar{ar{F}}$ /[%]	$ar{F}$ /[%]	$ar{F}$ /[%]
49	56,77	37,40	58,34	39,30	59,28	40,67	59,99	41,25
50	56,33	36,71	58,70	38,80	59,38	40,53	60,24	41,05

11.1.5 Darstellung der Abdeckung der jeweils besten Individuen



Abbildung 11.19: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 4 – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m



Abbildung 11.20: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 10 – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m



Abbildung 11.21: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 4 – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m





Abbildung 11.22: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 10 – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m



Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}, r = 12 m$ 



Abbildung 11.24: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 10 – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m

## 11.2 Ergebnisse der Simulationen zur Optimierung des GA – Zweiter Abschnitt





Abbildung 11.25: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_{C} = 0, 7$ ,  $p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.26: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.27: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_{C} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.28: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_{C} = 0, 7$ ,  $p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.29: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.30: Arithmetische Mittelwerte der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_{C} = 0, 7$ ,  $p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



11.2.2 Plots der Standardabweichungen

Abbildung 11.31: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.32: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_{c} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.33: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.34: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_{c} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.35: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_{c} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.36: Standardabweichung der Perimeterabdeckung (Simulation) – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_{c} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert





Abbildung 11.37: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.38: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.39: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m – GA Parameter:  $p_{c} = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.40: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_c = 0,7$ ,  $p_{M,0} = 0,1$ ,  $G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.41: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_{C} = 0, 7$ ,  $p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert



Abbildung 11.42: Arithmetische Mittelwerte der Berechnungsdauer – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m – GA Parameter:  $p_c = 0, 7, p_{M,0} = 0, 1, G_{max} = 200, \varepsilon$  deaktiviert

## 11.2.4 Ergebnisse in tabellarischer Form

Tabelle 11.4: Zusammenfassung der Simulation	sergebnisse für die	e Werte für <del>F</del> ,	$\sigma$ und $t$ –
Sensorkonfiguration: $\alpha = 360^\circ$ , $r = 12 m$ – Die	e markierten Werte	e stellen die jev	veils besten
Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.			

Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer			I	Büroetage	e	Lagerhalle			
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	<b>σ</b> /[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	
1	63,41	1,80	35,4	66,40	0,78	33,0	58,25	0,55	26,9	
2	63,43	1,06	35,3	66,09	1,16	33,8	58,20	0,59	28,0	
3	63,61	0,87	36,5	65,80	1,32	35,6	58,18	0,77	28,4	
4	63,76	0,59	37,2	65,83	1,35	36,7	58,06	0,52	29,8	
5	63,21	0,90	38,6	65,47	1,34	38,1	57,52	0,63	30,8	
6	64,05	0,70	69,4	67,17	0,58	65,9	58,81	0,45	52,0	
7	64,35	0,37	68,7	67,04	0,81	66,6	58,87	0,51	54,6	

Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer			I	Büroetage	e	Lagerhalle			
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	
8	64,48	0,35	70,1	67,02	0,52	68,4	58,91	0,39	55,7	
9	64,37	0,48	71,7	67,44	0,51	69 <i>,</i> 4	58,56	0,57	56,1	
10	64,36	0,39	71,5	67,18	0,78	71,0	58,73	0,50	56,6	
11	64,30	0,24	104,7	67,69	0,49	92,3	59,23	0,51	78,2	
12	64,27	0,21	102,6	67,31	0,44	99,0	58,93	0,54	80,7	
13	64,27	0,63	104,1	66,99	0,99	102,0	59,02	0,47	82,6	
14	64,44	0,21	105,8	67,71	0,87	102,6	58,79	0,53	82,6	
15	64,30	0,66	106,7	67,61	0,59	102,8	58,96	0,33	84,6	
16	63,97	1,01	138,9	67,93	0,77	120,0	59,18	0,40	105,2	
17	64,46	0,37	135,4	67,44	0,57	127,0	59,25	0,32	108,1	
18	64,49	0,36	138,9	67,77	0,66	133,5	59,04	0,45	109,1	
19	64,57	0,53	140,0	67,90	0,77	135,7	59,01	0,45	108,6	
20	64,53	0,29	141,4	68,00	0,59	136,9	59,01	0,14	109,4	
21	64,73	0,94	173,8	67,81	0,65	150,2	59,06	0,48	133,0	
22	64,72	0,35	171,6	67,68	0,71	160,0	59,18	0,37	133,0	
23	64,75	0,38	172,9	68,12	0,44	165,5	59,15	0,28	136,3	
24	64,42	0,24	173,3	67,75	0,57	167,4	59,07	0,32	136,4	
25	64,54	0,30	174,0	68,13	0,47	167,5	59,08	0,26	137,7	

Tabelle 11.5: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse für die Werte für  $\overline{F}$ ,  $\sigma$  und t – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30m – Die markierten Werte stellen die jeweils besten Ergebnisse der jeweiligen Kategorie dar.

Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer			H	Büroetage	e	Lagerhalle			
Parametersatz	$\overline{F}/[\%]$	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$\overline{F}/[\%]$	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	
1	58,96	2,72	20,6	34,51	2,11	17,6	51,11	2,83	20,1	

An	han	g
----	-----	---

Einsatzfall	Fertigungshalle mit Foyer			I	Büroetage	e	Lagerhalle			
Parametersatz	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	$ar{F}$ /[%]	σ/[%]	<i>t</i> /[s]	
2	58,93	2,60	21,6	36,49	1,31	18,8	51,52	2,36	20,7	
3	55,86	2,72	22,7	36,31	1,71	19,7	49,27	2,57	21,7	
4	56,96	2,13	23,9	36,11	1,19	21,0	51,37	1,37	22,3	
5	55 <i>,</i> 08	1,81	25,1	35,54	0,78	21,5	50,28	1,33	23,4	
6	59,52	2,51	41,3	37,03	2,16	35,3	53,03	1,78	40,2	
7	60,51	2,63	42,2	37,01	1,97	36,8	53,09	2,22	41,1	
8	60,18	1,60	43,9	36,85	1,64	38,5	53,65	1,47	41,2	
9	58,81	3,29	44,8	37,39	1,03	38,7	53,79	1,55	42,4	
10	60,07	1,38	45,4	37,80	1,70	40,7	52,03	1,57	43,3	
11	59,11	2,64	62,7	38,24	2,07	55,1	54,43	1,87	59,8	
12	61,56	1,91	63,5	38,18	1,46	57,0	54,39	2,23	61,2	
13	60,81	1,68	64,5	37,81	1,10	56,5	54,09	1,84	61,4	
14	60,30	1,80	65,3	38,06	1,28	57,9	53,89	2,28	62,3	
15	60,97	1,60	65,6	38,74	1,37	59,4	53,71	1,48	63,1	
16	62,80	1,30	82,4	38,50	1,33	72,8	54,11	1,26	79,6	
17	62,52	1,57	83,1	37,91	1,74	74,1	54,75	1,37	79,4	
18	62,77	0,99	84,8	38,44	1,39	76,5	54,81	1,34	81,6	
19	61,98	2,00	85,8	39,15	1,48	76,4	55,08	1,51	82,3	
20	62,17	1,05	87,1	39,04	1,56	78,2	55,44	0,88	82,6	
21	62,66	1,10	102,5	38,07	2,09	82,9	55,41	1,60	92,6	
22	62,18	2,09	104,3	38,18	1,53	89,2	54,89	1,64	99,7	
23	62,57	1,30	106,0	38,98	1,49	91,6	55,35	1,52	99,8	
24	62,40	1,44	105,6	39,81	1,22	95,4	55,07	1,23	101,8	
25	62,42	1,29	106,9	38,29	1,79	97,4	55,71	1,00	102,3	

Generationen	50		1(	100		50	200	
Konfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	$ar{ar{F}}$ /[%]							
1	59,64	43,13	61,81	45,94	62,35	47,49	62,60	48,19
2	58,64	41,53	61,24	45,61	62,21	47,69	62,57	48,98
3	58,05	39,87	60,65	43,86	61,81	45,74	62,53	47,15
4	56,91	38,60	60,38	44,19	61,88	46,78	62,55	48,15
5	56,11	37,20	59,76	42,00	61,21	44,64	62,07	46,97
6	61,60	45,51	62,84	48,19	63,18	49,19	63,34	49,86
7	61,31	44,55	62,98	48,04	63,26	49,56	63,42	50,20
8	60,44	44,08	62,69	47,72	63,24	49,40	63,47	50,23
9	60,41	42,89	62,57	47,14	63,21	48,93	63,46	50,00
10	59,63	41,85	62,03	46,37	63,05	48,57	63,42	49,96
11	62,68	47,64	63,32	49,56	63 <i>,</i> 55	50,24	63,74	50,59
12	62,26	47,23	63,18	49,90	63,43	50,90	63,50	51,37
13	61,77	45,56	63,03	48,83	63,31	50,33	63,42	50,90
14	61,68	45,38	63,22	48,69	63,52	50,04	63,64	50,75
15	60,87	44,77	63,04	48,78	63,49	50,28	63,62	51,14
16	62,47	48,15	63,28	50,12	63,59	51,03	63,70	51,81
17	62,85	48,24	63,39	50,35	63,64	51,30	63,72	51,73
18	62,57	47,30	63,54	50,37	63,68	51,40	63,77	52,00
19	62,40	47,44	63,48	50,52	63,75	51,44	63,83	52,07
20	62,08	46,71	63,37	50,16	63,72	51,60	63,85	52,21
21	63,11	48,77	63,54	50,70	63,76	51,69	63,87	52,05
22	63,03	48,26	63,55	50,67	63,71	51,37	63,86	51,75
23	63,12	48,99	63,74	51,20	63,88	51,90	64,01	52,30

Tabelle 11.6: Mittelwerte von  $\overline{F}$  über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen für beide Sensorkonfigurationen.

Anhang

Generationen	50		100		15	50	200	
Konfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	${ar \overline F}/{[\%]}$	${ar \overline F}$ /[%]	$ar{ar{F}}$ /[%]	$ar{ar{F}}$ /[%]	${ar \overline F}$ /[%]	$ar{ar{F}}$ /[%]	${ar \overline F}/{[\%]}$	$ar{ar{F}}$ /[%]
24	62,64	48,57	63,51	51,10	63,67	51,96	63,75	52,42
25	62,52	47,69	63,58	50,69	63,83	51,67	63,91	52,14

Tabelle 11.7: Mittelwerte von  $\sigma$  über alle Einsatzfälle nach 50, 100, 150 und 200 Generationen für beide Sensorkonfigurationen.

Generationen	5	50		100		50	200	
Konfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	$ar{\sigma}$ /[%]							
1	1,72	2,87	1,13	2,49	1,13	2,46	1,04	2,55
2	1,79	2,70	1,00	2,43	1,00	2,19	0,94	2,09
3	1,44	2,19	1,29	1,90	1,18	2,20	0,99	2,33
4	1,77	2,42	1,30	2,00	1,07	1,86	0,82	1,56
5	1,88	2,25	1,14	1,49	1,04	1,55	0,96	1,31
6	1,36	1,91	0,82	2,43	0,65	2,28	0,57	2,15
7	1,20	1,88	0,59	2,32	0,52	2,31	0,56	2,27
8	1,08	1,57	0,55	1,55	0,49	1,52	0,42	1,57
9	0,87	2,15	0,62	2,28	0,58	2,04	0,52	1,96
10	1,16	1,46	0,68	1,91	0,58	1,51	0,55	1,55
11	0,90	2,00	0,58	1,91	0,59	2,03	0,41	2,19
12	0,73	2,17	0,43	2,07	0,40	1,86	0,40	1,87
13	0,79	1,86	0,68	1,87	0,71	1,59	0,70	1,54
14	0,76	2,11	0,58	1,94	0,57	1,85	0,54	1,79
15	1,03	2,19	0,65	1,71	0,55	1,43	0,53	1,48
16	1,07	2,34	0,93	1,71	0,83	1,63	0,73	1,30
17	0,73	2,04	0,48	2,03	0,45	1,69	0,42	1,56

Ergebnisse der Simulatior	en zur Optimierung	des GA –	Zweiter A	Abschnitt
Ligeomisse der Simulation	on Zur Opunnerung			tosemint

Generationen	50		100		150		200	
Konfiguration	1	2	1	2	1	2	1	2
Parametersatz	$ar{\sigma}$ /[%]							
18	0,75	1,86	0,50	1,64	0,50	1,36	0,49	1,24
19	0,83	1,88	0,53	1,57	0,57	1,60	0,59	1,66
20	0,84	1,94	0,49	1,64	0,40	1,41	0,34	1,16
21	0,61	2,45	0,64	2,10	0,66	1,69	0,69	1,59
22	0,48	1,99	0,48	1,83	0,50	1,78	0,48	1,75
23	0,59	1,92	0,36	1,53	0,36	1,48	0,37	1,44
24	0,69	1,74	0,50	1,65	0,40	1,47	0,38	1,30
25	0,58	1,54	0,44	1,23	0,38	1,38	0,34	1,36



11.2.5 Darstellung der Abdeckung der jeweils besten Individuen

Abbildung 11.43: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 23 – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m



Abbildung 11.44: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 23 – Einsatzfall 2 Büroetage – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m





Abbildung 11.45: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 23 – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^\circ$ , r = 12 m



Abbildung 11.46: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 23 – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m



Abbildung 11.47: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 23 – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 360^{\circ}$ , r = 12 m



Abbildung 11.48: Abdeckung des besten Individuums bei Parametersatz 23 – Einsatzfall 3 Lagerhalle – Sensorkonfiguration:  $\alpha = 90^{\circ}$ , r = 30 m



11.3 Trajektorien für Überwachungsroboter ohne Sensorsonden

Abbildung 11.49: Kurze Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 2 Büroetage



Abbildung 11.50: Lange Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 2 Büroetage



Abbildung 11.51: Kurze Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer



Abbildung 11.52: Lange Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 1 Fertigungshalle mit Foyer



Abbildung 11.54: Lange Trajektorie für Überwachungsroboter – Einsatzfall 3 Lagerhalle

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erweiterung des Nutzens von mobilen Überwachungsrobotern. Durch den Einsatz von autonomen Sensorsonden wird die zeitgleich von mobilen Robotern überwachte Fläche bzw. Grenzlinie signifikant vergrößert. Die Arbeit beleuchtet die Konzeption und Realisierung eines Gesamtsystems bestehend aus Sensorsonden, Ausbringeinheit und entsprechenden Strategien zur optimierten Positionierung der Sensorsonden. Hierbei werden sowohl Fragestellungen des mechanischen Designs betrachtet, als auch bestehende Optimierungsverfahren auf die Problemstellung angepasst und gegeneinander verglichen. In drei ausgewählten Szenarien wird der durch die vorgestellte Lösung geschaffene Mehrwert verdeutlicht und quantifiziert.



## FRAUNHOFER VERLAG