



IGEL – Sicherer Kegelscanner für Autonome Fahrzeuge

BMBF-gefördertes Verbundprojekt
Götting KG, Lehrte · DFKI GmbH, Bremen
Förderkennzeichen 01IS09044B

Konzeptpapier Hinderniserkennung und Staubkornfilter

Zusammenfassung

Dieses Dokument enthält das Konzept des IGEL-Projekts für die Software zur Erkennung von Hindernissen aufgrund einer vorher erkannten Bodenebene auf der Grundlage kontinuierlich, d.h. zyklisch empfangener Messdaten eines oder mehrerer in Fahrtrichtung auf den Boden gerichteter Sicherheitslaserscanner.

<i>Projektbezeichnung</i>	IGEL
<i>Dokument-ID</i>	DOK-K-HE
<i>Verantwortlich</i>	R. Wagner
<i>Erstellt am</i>	20.07.2011
<i>Version</i>	1.3
<i>Bearbeitungszustand</i>	vg. (TÜV)
<i>Revision</i>	842
<i>Letzte Änderung</i>	2011-12-05 12:49:23Z
<i>Dokumentablage</i>	Konzept-Hinderniserkennung.tex

Änderungsliste

- 20.07.11 – Version: 0.1 – Bearbeiter: R. Wagner
Initiale Fassung mit bisherigen Ideen.
- 30.07.11 – Version: 0.2 – Bearbeiter: R. Wagner
Verfahren zur Hinderniserkennung und Staubkornfilterung beschrieben.
- 31.08.11 – Version: 1.0 – Bearbeiter: R. Wagner
Beschreibung abgeschlossen.
- 24.10.11 – Version: 1.1 – Bearbeiter: R. Wagner
Bestimmung des minimalen r_m als Abschnitt 6.3.2 aufgenommen.
- 21.11.11 – Version: 1.2 – Bearbeiter: R. Wagner
Sicherheitsanforderungsanalyse eingefügt.
- 25.11.11 – Version: 1.3 – Bearbeiter: R. Wagner
Fehlercode wird nicht verwendet. Allgemeine Verweise darauf entfernt. Behandlung von Sonderfällen in 6.2.1 klarer formuliert. Begriffe Konfiguration und effektiv überwachter Bereich eingeführt.

Prüfverzeichnis

- 31.08.11 – Version: 1.0 – Prüfer: C. Lüth
Neuer Dokumentenzustand: **vg**.
Korrektur gelesen, einige nicht-inhaltliche Änderungen direkt eingepflegt.
- 25.10.11 – Version: 1.1 – Prüfer: C. Lüth
Neuer Dokumentenzustand: **vg**.
Korrektur gelesen, einige nicht-inhaltliche Änderungen direkt eingepflegt.
- 05.12.11 – Version: 1.3 – Prüfer: C. Lüth
Neuer Dokumentenzustand: **vg (TÜV)**
Korrektur gelesen, minimale Änderung.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument ist Kernbestandteil der Dokumente des Projekts IGEL. Hierin werden Spezifikationen von grundlegenden Softwareanforderungen sowie (System- und Umgebungs-) Modelle festgelegt. Alle nicht ausdrücklich als *informativ* gekennzeichneten Abschnitte dieses Dokuments sind als *verbindlich* für alle weiteren, abgeleiteten (bzw. abzuleitenden) Produkte des Projekts anzusehen.

Über das Projekt IGEL hinaus findet dieses Dokument keine Anwendung.

2 Verweisungen

Dok.-ID	Dokumentname	Ablagepfad
DOK-K-BE	Konzeptpapier Bodenebene- erkennung	trunk/Projektdokumente/Konzepte/ Konzept-Bodenebenenenerkennung.tex

Inhaltsverzeichnis

1	Anwendungsbereich	3
2	Verweisungen	3
3	Einleitung	5
4	Auszuführende Funktionen	5
5	Grundlegende Annahmen	6
6	Verfahrensbeschreibung	7
6.1	Datenrepräsentation	7
6.1.1	Repräsentation der Eingabedaten	7
6.1.2	Zu berechnende Ausgabedaten	7
6.1.3	Parameter des Algorithmus	8
6.2	Hinderniserkennung	8
6.2.1	Klassifikation einzelner Strahlen	8
6.3	Staubkornfilterung	10
6.3.1	Filterverfahren	10
6.3.2	Einfluß der Scannerreichweite	12
6.4	Sicherheitsanforderungsanalyse	13
6.4.1	Termination	13
6.4.2	Korrektheit der Ergebnisse	13
6.4.3	Weitere Maßnahmen	13
6.5	Verhalten im Fehlerfall	13
7	Begriffe, Abkürzungen und Symbole	14
7.1	Begriffe	14
7.2	Abkürzungen	14
	Literaturverzeichnis	14

3 Einleitung

Derzeitiger Stand der Technik bei der Absicherung fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) vor Kollisionen sind i.d.R. berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen in Form von Sicherheitlaserscannern (z.B. ROTOSCAN RS4 von Leuze electronic oder S3000 von SICK), die in Fahrtrichtung eine Ebene parallel zum Boden in 15cm Höhe nach möglichen Hindernissen abtasten. Wird dabei ein Mindestabstand unterschritten, so wird ein Nothalt des Fahrzeugs (im folgenden allgemein EUC – Equipment under Control) ausgelöst.

Dies hat drei entscheidende Nachteile. Erstens können im folgenden als *negative Hindernisse* bezeichnete Hindernisse, die sich als Löcher im Boden oder Abgründe beschreiben lassen, von einem derartigen Scanneranbau nicht detektiert werden. Zweitens darf sich das EUC bei Lastwechsel (o.ä.) nur minimal neigen, da die Scanebene sonst in den Boden "eintauchen" und der Boden als Hindernis gewertet werden würde. Damit ist auch eine aufsteigende Rampenfahrt nicht möglich, da die Rampe als Hindernis verkannt werden würde. Drittens müssen die Hindernisse ihre maximale Ausdehnung auf der Scannerebene haben. Das Unterfahren von Tischen wird damit beispielsweise ebensowenig ausgeschlossen wie Kollisionen mit anderen vorragenden Hindernissen.

Hier setzt das in diesem Dokument beschriebene Konzept an. Ein oder mehrere Sicherheitslaserscanner werden zusätzlich in ein bis zwei Metern Höhe am EUC mit Scanrichtung auf den Boden in Fahrtrichtung vor dem Fahrzeug montiert. Diese werden im folgenden kollektiv als *Bodenscanner* bezeichnet. Der Bodenscanner misst im Normalfall nur Distanzwerte, die auf das Auftreffen des ausgesandten Laserlichts auf den Boden zurückgeht. Kleinere Distanzen ergeben sich bei positiven Hindernissen, größere Distanzen bei negativen Hindernissen.

Das sichere Erkennen der Bodenebene aus den Messdaten des Bodenscanners ist im Konzeptpapier Bodenebenenerkennung (DOK-K-BE) beschrieben. Dieses Dokument beschreibt den nachgelagerten Verarbeitungsschritt der Hinderniserkennung durch Vergleich gemessener mit aus der Ebenenhypothese berechneter, erwarteter Distanzwerte. Die beinhaltet eine Staubkornfilterung zur Erhöhung der Verfügbarkeit.

Die Überwachung durch den Bodenscanner ist dabei nicht als Ersatz existierender Schutzeinrichtungen, sondern als Ergänzung zu sehen. So ist eine Integration beispielsweise mit Schaltleisten zum Wiederanlauf denkbar.

4 Auszuführende Funktionen

Das in diesem Dokument beschriebene Konzept wird in einer größeren Softwarekomponente verwendet, die als Ganzes folgende Funktionen ausführen soll:

1. Erkennung der vom EUC befahrenen Bodenebene anhand von Messdaten eines oder mehrerer in Richtung Boden gerichteter Laserscanner
2. Erkennung von positiven (auf der Bodenebene) und negativen Hindernissen ("Löcher" im Boden) als Abweichung von der erkannten Bodenebene zur Vermeidung von Kollisionen oder Stürzen des EUC
3. Ausgabe von Signalen: Normal, Stopp auf Basis erkannter Bodenebene bzw. Hindernisse

Im folgenden wird nur die Teilkomponente zur Umsetzung des zweiten Punkts, der Erkennung von Hindernissen, betrachtet. Weitere Teilkomponenten sind nicht Gegenstand dieses Konzeptpapiers, sondern werden in separaten Dokumenten beschrieben (vgl. Abschnitt 2).

5 Grundlegende Annahmen

Es gelten die gleichen Annahmen wie im Konzeptpapier Bodenebenenerkennung (DOK-K-BE) bzgl. Einsatzumgebung, Sensoraufbau und Sensordaten.

6 Verfahrensbeschreibung

In diesem Abschnitt wird das *Lösungskonzept* der softwarebezogenen Aufgabenstellung zur Hinderniserkennung und Staubkornfilterung erläutert.

6.1 Datenrepräsentation

6.1.1 Repräsentation der Eingabedaten

Anders als die Bodenebenenerkennung kann die Hinderniserkennung nicht vollständig unabhängig von der Scangeometrie der eingesetzten Sensoren arbeiten – es wird eine Sensorbeschreibung benötigt.

Die allgemeinste, noch sinnvoll verwendbare Sensorbeschreibung geht davon aus, dass die Laserstrahlen des Bodenscanners in mehreren Ebenen angeordnet sind, wobei sich alle Strahlen einer Scanebene ein optisches Zentrum teilen. Somit sind pro Scanebene folgende Informationen anzugeben (jeweils in Scannerkoordinaten):

- eine Identifikationsnummer k ,
- das optische Zentrum o_k , von dem alle Laserstrahlen ausgehen,
- je ein Richtungsvektor pro Strahl,

Damit ist die genaue Geometrie jedes Strahls bekannt und es lassen sich Nachbarschaftsbeziehungen von einzelnen Strahlen innerhalb einer Scanebene ablesen, was bei der Staubkornfilterung relevant werden wird. Die Sensorbeschreibung ändert sich zur Laufzeit nicht.

Zur Laufzeit sind dann die Messwerte des Bodenscanners die eigentliche Eingabe in folgender Darstellung. Pro Scanebene ist anzugeben:

- Identifikationsnummer der Scanebene entsprechend der Sensorbeschreibung,
- pro Strahl in der Scanebene (in der gleichen Reihenfolge wie die Richtungsvektoren in der Sensorbeschreibung):
 - Gültigkeit des Strahls (ungültige Strahlen entsprechen z.B. zu geringer Remission)
 - für einen gültigen Strahl den gemessenen Distanzwert

6.1.2 Zu berechnende Ausgabedaten

Pro Strahl ist zu bestimmen, ob es sich um ein Hindernis handelt.

6.1.3 Parameter des Algorithmus

Folgende Parameter bilden zusammen mit den globalen Parametern der Bodenebenenerkennung (DOK-K-BE, Abschnitt 6.1.4) die *Konfiguration* des Algorithmus.

Parameter zur Hinderniserkennung:

<i>Parameter</i>	<i>Erläuterung</i>
ε	maximal erlaubte Differenz zwischen gemessener und anhand der erkannten Bodenebene erwarteter Länge eines Laserstrahls

Parameter zur Staubkornfilterung:

<i>Parameter</i>	<i>Erläuterung</i>
r_m	maximal genutzte Reichweite des Bodenscanners (siehe Abschnitt 6.3.2)
r_e	Effektiver Radius des sicher erkennbaren zylindrischen Normhindernis

6.2 Hinderniserkennung

Hinderniserkennung unter Verwendung eines horizontal scannendem Laserscanner ist ein wohlverstandenes Problem. Dabei ist die Anforderung, dass sich innerhalb eines sogenannten Schutzfeldes kein Hindernis befindet. Ein Nothalt wird ausgelöst, falls die gemessene Strahllänge kurz genug ist, dass der Strahl innerhalb des vordefinierten Schutzfeldes endet, dort also auf ein Hindernis getroffen ist.

Eine direkte Übertragung dieses Funktionsprinzips auf einen schräg nach vorne auf den Boden scannenden Laserscanner ist nicht möglich. Es kann jedoch in ähnlicher Form eine Erwartung/Anforderung formuliert werden, nämlich, dass im Normalfall der ebene Boden (und nur dieser) im Scanbild gesehen wird. Abweichungen der gemessenen Distanzwerte von den aus der erkannten Ebene berechneten (Schnittpunkt Gerade–Ebene) erwarteten Distanzwerte müssen unterhalb eines Schwellwertes liegen (Messrauschen). Bei größeren Abweichungen wurde offensichtlich ein Hindernis gefunden wie in Abbildung 1 dargestellt.

Es sei angemerkt, dass es keine Entsprechung eines konfigurierbaren Schutzfeldes gibt. Der überwachte Bereich ergibt sich direkt aus Montagewinkel und Schangeometrie des eingesetzten Bodenscanners. Die entscheidende Auswirkung auf die Hinderniserkennung dabei ist, dass eine künstliche Vergrößerung des Schutzfeldes um Aufschläge für Latenzzeiten etc. nicht möglich ist. Stattdessen begrenzen Schangeometrie und Latenzzeiten die maximal zulässige Geschwindigkeit des EUC.

6.2.1 Klassifikation einzelner Strahlen

Die Klassifikation einzelner Strahlen in Hindernisstrahlen und Nicht-Hindernisstrahlen erfolgt durch Vergleich des gemessenen Distanzwerts mit dem erwarteten. Die erwartete Distanz entspricht der



Abbildung 1: Hinderniserkennung durch Vergleich von erwarteter und gemessener Distanzwerte (nach Wagner (2009)). Die erwartete Distanz ergibt sich durch Schnitt des Strahls laut Sensorbeschreibung mit der erkannten Bodenebene (gestrichelte Linie). Ist die gemessene Distanz kürzer, so handelt es sich um ein positives Hindernis (links). Ist sie länger, um ein negatives Hindernis (Loch im Boden; rechts).

Distanzmessung, die bei freier Sicht auf die von der Bodenebenenerkennung berechnete Bodenebene hätte gemessen werden müssen.

Die Bodenebenenerkennung berechnet den Normalenvektor n und die Distanz d der Bodenebene. Die Bodenebene sind alle Punkte p , für welche die Ebenengleichung in Hessescher Normalenform gilt

$$n \cdot p - d = 0 \tag{1}$$

Der erwartete Distanzwert kann berechnet werden durch Schnitt jedes Strahls aus der Sensorbeschreibung mit der Bodenebene. Der Strahl mit Richtungsvektor u aus Scanebene k mit optischem Zentrum o_k (beides aus der Sensorbeschreibung) in Punkttrichtungsform wird beschrieben durch

$$p = \lambda u + o_k \tag{2}$$

wobei λ die Entfernung modelliert. Einsetzen von (2) in (1) und Auflösen nach λ ergibt die erwartete Entfernung der Bodenebene auf dem Strahl:

$$\lambda = \frac{d - n \cdot o_k}{u \cdot n} \tag{3}$$

Es sind dabei zunächst vier Fälle zu unterscheiden:

1. Die Gerade verläuft parallel zur Ebene, liegt jedoch nicht auf der Ebene. In diesem Fall ist der Nenner null und der Zähler ungleich null.
2. Die Gerade liegt auf der Ebene. In diesem Fall sind Zähler und Nenner beide gleich null.
3. Ist λ kleiner null, so läge der Schnittpunkt hinter dem Scanner.
4. Ansonsten ergibt Einsetzen von λ in die Geradengleichung den Schnittpunkt.

Strahlen ohne Schnitt mit der erkannten Bodenebene (Fälle 1. bis 3.) werden als Hindernis klassifiziert. Für alle übrigen Strahlen wird die Differenz aus erwarteter und gemessener Distanz berechnet. Ist diese kleiner ϵ , so wird der Strahl als Nicht-Hindernis klassifiziert, ansonsten als Hindernisstrahl. In den Eingabedaten als ungültig markierte Distanzmessungen (z.B. zu geringe Remission) werden als Hindernisstrahl behandelt.

6.3 Staubkornfilterung

Ziel der Staubkornfilterung ist es, die Verfügbarkeit zu erhöhen. Wendet man nämlich obiges Klassifikationsverfahren direkt an, so werden auch einzelne Fehlmessungen oder Messungen aufgrund von Reflexion an kleinen (Staub-)Partikeln in der Luft sofort als Hindernis erkannt und ein Nothalt ausgelöst.

Dieses Phänomen ist nicht neu, sondern auch bei horizontalen Ebenenscannern bekannt. Gängige Praxis dort ist es, eine Filterung nach einem oder beiden der folgenden Ansätze anzuwenden:

1. Bei hinreichend großer Winkelauflösung trifft mehr als nur ein einzelner Strahl auf ein Hindernis. Dies unterscheidet tatsächliche Hindernisse von Staubkörnern im Scanbild.

Um als Hindernis klassifiziert zu werden, müssen mehrere benachbarte Strahlen in einem Scan ein Hindernis anzeigen (z.B. mindestens drei aufeinanderfolgende Strahlen), damit sie als Hindernis markiert werden. Dies reduziert die effektive Winkelauflösung.

2. Es werden mehrere zeitlich aufeinanderfolgende Scans betrachtet. Erst wenn ein Strahl z.B. dreimal nacheinander ein Hindernis anzeigt, wird ein Nothalt ausgelöst. Die Latenzzeit erhöht sich entsprechend.

Die zweite Variante ist grundsätzlich schwieriger, da sie Annahmen darüber trifft, wie sich die Umgebung (aus Sicht des Scanners) über die Zeit ändert. Da eine saubere Behandlung insbesondere ein Bremsmodell des Fahrzeugs (sowie sichere Odometrie etc.) und Bewegungsmodelle für relevante Hindernisarten (speziell Personen) erfordern würde, wird dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt.

Bei der ersten Variante wird unmittelbar klar, wofür die oben definierte Sensorbeschreibung notwendig ist – ohne sie ist die Nachbarschaft einzelner Strahlen nicht zu klären. Die Umsetzung dieses Ansatzes ist auf den ersten Blick einfach. Um die Sicherheit zu gewährleisten ist es jedoch erforderlich, die Frage zu beantworten, wie verhindert werden kann, dass eine “Staubkornfilterung” dazu führt, dass relevante Hindernisse übersehen werden können.

6.3.1 Filterverfahren

Die folgenden Betrachtungen verwenden ein Normhindernis als Ausgangspunkt. Je nach gewünschter Schutzfunktion wird ein geeignetes Normhindernis (z.B. “Normbein”-Zylinder mit 70mm Radius) gewählt. Dafür ist ein effektiver Radius r_e anzugeben. Dieser scannerspezifische Wert entspricht dem Radius, den der Scanner vom Normhindernis im gesamten Arbeitsbereich des Scanners sicher erkennt. Dies erlaubt es, Effekte zu modellieren, die auftreten, wenn ein Laserstrahl den Rand eines Objekts nur “gerade so berührt”, d.h., r_e ist i.d.R. kleiner als der Radius des Normhindernis.

Im Scanbild ergibt der Schnitt einer Scanebene mit einem zylindrischen Normhindernis minimal einen Kreis. Die Idee hinter dem hier verfolgten Ansatz zur Staubkornfilterung ist jetzt, dass dieser Kreis trotz Herausfiltern einzelner Strahlen nicht durch das durch die übrigen, nicht als Hindernis klassifizierten, Strahlen aufgespannte Gitter hindurchfallen können, wie in Abbildung 2 veranschaulicht.

Das Herausfiltern aufeinanderfolgender Hindernisstrahlen aus dem Scanbild ergibt jeweils eine Lücke. Die beiden an die Lücke angrenzenden Nicht-Hindernisstrahlen ergeben unter Einbeziehung der Scannerreichweite ein Dreieck. Der Inkreisradius dieses Dreiecks muss kleiner als r_e sein, da sonst ein Normhindernis in die Lücke passt (vgl. Abbildung 3).

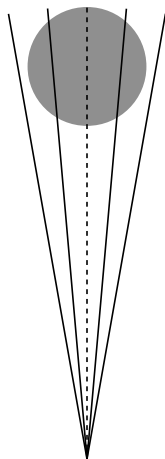


Abbildung 2: Idee der Staubkornfilterung: Zeigt der gestrichelte Strahl ein Hindernis an, die anderen jedoch nicht, so kann ein Hindernis der dargestellten Größe nicht übersehen werden, wenn die Klassifikation des gestrichelten Strahls als Hindernis herausgefiltert wird.

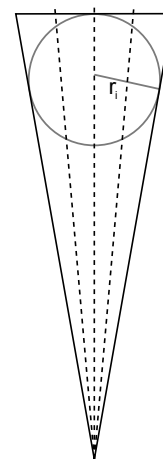


Abbildung 3: Der Inkreisradius r_i des Dreiecks, das durch die an einen Bereich von Hindernisstrahlen (gestrichelt) angrenzenden Nicht-Hindernisstrahlen gebildet wird, muss kleiner als der effektive Radius r_e des Normhindernis sein, damit die Hindernisstrahlen herausgefiltert werden dürfen.

Der Inkreisradius r_i kann berechnet werden als (Weisstein, 2011)

$$r_i = \sqrt{\frac{(s-a)(s-b)(s-c)}{s}} \tag{4}$$

mit

$$s = \frac{a+b+c}{2}. \tag{5}$$

Die Dreiecksseiten a , b und c werden wie folgt gewählt: a und b entsprechen der maximal genutzten Reichweite des Scanners r_m . Sind weiterhin u_i und u_j die Richtungsvektoren der eine Lücke begrenzenden Strahlen, so ergibt sich c als Distanz der Endpunkte bei Strahllänge r_m wie folgt:

$$c = \left\| r_m u_i - r_m u_j \right\|_2 \tag{6}$$

Die Staubkornfilterung filtert also als Hindernis klassifizierte Strahlen heraus, falls $r_i < r_e$, jedoch nur, falls zwischen herausgefilterten Strahlen genügend Nicht-Hindernisstrahlen liegen. Dazu wird das gleiche Verfahren zur Berechnung eines zweiten Inkreisradius r'_i angewendet, wobei dieses Mal die begrenzenden Hindernisstrahlen zwei der Dreiecksseiten bilden.

Dies stellt sicher, dass nicht ganze Bereiche mit unklarem Scanbild herausgefiltert werden. Der effektive Normhindernisradius r_e dient dabei als Umgebungsmaßstab.

Zu der Behandlung von Randbereichen sei angemerkt, dass keine Annahmen über die Umgebung jenseits des ersten und letzten Strahls einer Scanebene getroffen werden. Das bedeutet insbesondere, dass eine Staubkornfilterung dort nicht möglich ist, falls der erste oder letzte Strahl als Hindernisstrahl klassifiziert wurde, weil dann ein begrenzender Nicht-Hindernisstrahl fehlt. Es ist möglich dies Verfügbarkeitsproblem zu umgehen, indem an den Rändern Strahlen aus dem Ergebnis der Hinderniserkennung herausgenommen werden, diese aber in der Staubkornfilterung weiter verwendet werden. Der durch den Scanner *effektiv überwachte Bereich* verkleinert sich dadurch natürlich.

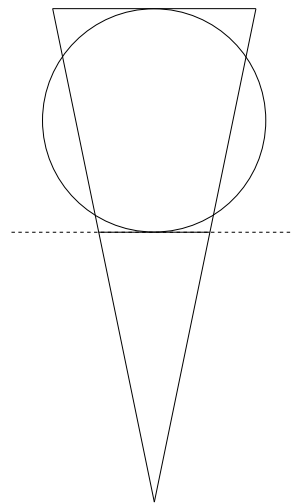


Abbildung 4: Der Schnitt mit der Bodenebene (gestrichelt) definiert den Arbeitsbereich des Bodenscanners. Bei der Bestimmung der maximal genutzten Reichweite des Scanners r_m wird ein Aufschlag berücksichtigt: r_m ergibt sich aus der maximalen Distanz der Schnittpunkte der Laserstrahlen mit einer Parallelen zu der Geraden durch die Schnittpunkte mit der Bodenebene im Abstand $2 \cdot r_e$ (Durchmesser Normhindernis; Zeichnung nicht maßstabsgetreu).

6.3.2 Einfluß der Scannerreichweite

Die maximal genutzte Reichweite des Scanners r_m hat einen entscheidenden Einfluß auf den durch die Staubkornfilterung erzielten Gewinn an Verfügbarkeit. Je größer r_m , desto größer wird auch der Inkreisradius des durch zwei (vor Filterung) benachbarte Strahlen, d.h., desto weniger Strahlen können bei gleichem r_e herausgefiltert werden.

Um eine bestmögliche Verfügbarkeit zu erreichen, ist r_m so klein wie möglich, aber so zu wählen, dass der für die Erbringung der Sicherheitsfunktionalität relevante Arbeitsbereich weiterhin abgedeckt bleibt. Dieser Arbeitsbereich wird durch den Schnitt der Scanebene(n) mit der Bodenebene definiert. Ein aus Sicht des Scanners vor dem Schnitt der Bodenebene befindliches Hindernis ist das am weitesten entfernte positive Hindernis, das auftreten kann. Negative Hindernisse befinden sich aus dieser Sicht direkt hinter dem erwarteten Schnitt mit der Bodenebene.

r_m kann also wie folgt gewählt werden:

- Für alle Strahlen aus der Sensorbeschreibung wird die Ebene aus dem erlaubten Winkel- und Distanzbereich bestimmt, die den Schnittpunkt mit der maximalen Distanz ergibt.
- Für jeweils zwei benachbarte Strahlen wird eine Parallele im Abstand $2 \cdot r_e$ zu der Geraden durch die maximal entfernten Schnittpunkte laut Abbildung 4 gelegt.
- r_m ist dann die maximale Distanz zu den Schnittpunkten mit dieser jeweiligen Parallelen über alle Strahlen.

Varianten dieses Verfahrens zur Bestimmung von r_m sind möglich. Insbesondere kann es bei entsprechender Scannergeometrie von Vorteil sein, nicht ein einziges r_m als das Maximum über alle Strahlen, sondern jeweils ein unterschiedliches $r_{m,i}$ für jeden Strahl zu verwenden. Darauf wurde in diesem Konzeptpapier jedoch verzichtet.

6.4 Sicherheitsanforderungsanalyse

Für das Erbringen der Sicherheitsfunktionalität müssen folgende Anforderungen gewährleistet sein:

- alle Schritte müssen in fest nach oben begrenzter Zeit terminieren,
- und es dürfen keine Hindernisstrahlen als Nicht-Hindernis klassifiziert werden.

6.4.1 Termination

Die Hinderniserkennung führt pro Strahl eine feste Anzahl von Operationen aus. Bei der Staubkornfilterung ist diese mindestens durch die Strahlenanzahl begrenzt (Suche nach benachbartem Hindernis- oder Nicht-Hindernisstrahl bei naiver Implementierung). Die Laufzeit ist also lediglich abhängig von der Anzahl Strahlen, welche zur Laufzeit konstant ist.

6.4.2 Korrektheit der Ergebnisse

Für das korrekte Funktionieren der Hinderniserkennung ist entscheidend, dass die als Eingabe erhaltene erkannte Bodenebene korrekt ist. Der eigentliche Hindernistest ist lediglich ein einfacher Schwellwerttest.

Dafür, dass die Staubkornfilterung nicht zum Übersehen von Hindernissen führt, ist die Berechnung des Inkreisradius entscheidend. Die Entscheidung bzgl. der Winkelausflösung nach Filterung entspricht der Auslegung der Winkelauflösung der Scannerhardware bei klassischen horizontal messenden Laserscannern.

6.4.3 Weitere Maßnahmen

Die in diesem Dokument beschriebene Staubkornfilterung ist kein Ersatz für Maßnahmen zur Überwachung der Integrität der vom Bodenscanner gelieferten Messdaten, wie sie beispielsweise notwendig sind, um die Anforderungen aus DIN CLC/TS 61496-3 (IEC 61496-3:2008) bzgl. "Beeinflussung durch Verschmutzung" (4.3.5) oder "Manuelle Beeinflussung" (4.3.8) zu erfüllen. Dies muss ebenso wie übliche Tests auf Stuck-At-Fehler o.ä. im Scanner selbst oder durch geeignete vorgelagerte Softwarekomponenten behandelt werden.

6.5 Verhalten im Fehlerfall

Die Hinderniserkennung und Staubkornfilterung sind zustandslos. Ein Fehlerzustand ist daher nicht vorgesehen.

7 Begriffe, Abkürzungen und Symbole

7.1 Begriffe

Bodenebene Die mathematisch den Boden beschreibende Ebene

Bodenscanner Gegen den Boden gerichteter Scanner am EUC, liefert Daten zur Ebenenerkennung

Positives Hindernis Aus dem Boden hervorragendes Hindernis

Negatives Hindernis Loch im Boden

Konfiguration Gesamtheit der Parameter des Algorithmus (siehe 6.1.3)

Effektiv überwachter Bereich Der Teil des Scanfelds, der nach Abzug von Randbereichen noch überwacht wird (siehe 6.3.1)

7.2 Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>vollständiger Begriff</i>
EUC	Equipment under Control

Literaturverzeichnis

[Wagner 2009] WAGNER, R.: *Autonomous Outdoor Navigation with a Robotic R/C Car*. 2009. – Diplomarbeit. Universität Bremen

[Weisstein 2011] WEISSTEIN, Eric W.: *Incircle*. <http://mathworld.wolfram.com/Incircle.html>. Version: 2011. – From MathWorld – A Wolfram Web Resource