



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Matthias Wippich

Bildverarbeitungs-basierte Identifikation von Positionsmarken für die  
Präzisionsnavigation

Matthias Wippich

Bildverarbeitungs-basierte Identifikation von Positionsmarken für die  
Präzisionsnavigation

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Angewandte Informatik  
am Department Informatik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel  
Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Stephan Pareigis

Abgegeben am 8. Februar 2008

**Matthias Wippich**

**Thema der Bachelorarbeit**

Bildverarbeitungs-basierte Identifikation von Positionsmarken für die Präzisionsnavigation

**Stichworte**

Bildverarbeitung Identifikation Positionsmarke künstlich Landmarke Navigation Doppelverhältnis

**Kurzzusammenfassung**

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Implementierung eines Systems, das die Identifikation von kodierten Positionsmarken (künstlichen Landmarken) unter Verwendung der Bildverarbeitung realisiert. Ihr Ziel ist die präzise Positionsbestimmung eines autonomen Fahrzeugs im Innen- und Aussenbereich unter realen Bedingungen.

Ende des Textes

**Matthias Wippich**

**Title of the paper**

Image Processing-Based Identification of Landmarks for Precision Navigation

**Keywords**

Image Processing Identification Position Mark Artificial Landmark Navigation Cross Ratio

**Abstract**

This bachelor's thesis is concerned with the implementation of a system which realizes the identification of coded position marks (artificial landmarks) with the use of image processing. Its goal is the precise localization of an autonomous vehicle in indoor and outdoor environments under real conditions.

End of text

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel dieser Arbeit . . . . .	2
1.2	Vorgehensweise . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Positionsmarken</b>	<b>3</b>
2.1	Anforderungen . . . . .	3
2.2	Existierende Lösungen . . . . .	4
2.2.1	Selbstähnliche Barcodes von Scharstein und Briggs . . . . .	5
2.2.2	Doppelverhältnis-Barcodes von Taylor und Kriegman . . . . .	6
2.2.3	Neue kodierte Zirkular-Messmarken von Knyaz und Sibiryakov . . . . .	7
2.3	Neu gestaltete Positionsmarken mit kodiertem Doppelverhältnis . . . . .	7
2.3.1	Mathematisches Doppelverhältnis . . . . .	7
2.3.2	Verwendete Positionsmarken . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Programm zur Konfiguration von Doppelverhältnis-Positionsmarken</b>	<b>10</b>
3.1	Eingaben . . . . .	10
3.1.1	Daten der benutzten Kamera . . . . .	10
3.1.2	Positionsmarkenhöhe . . . . .	11
3.1.3	Betrachtungsentfernung . . . . .	11
3.1.4	Bildgröße des Kreisdurchmessers . . . . .	11
3.1.5	Genauigkeit zu produzierender Größen . . . . .	11
3.1.6	Erstellungsgenauigkeit . . . . .	12
3.1.7	Messgenauigkeit . . . . .	12
3.2	Berechnung . . . . .	12
3.2.1	Extreme . . . . .	12
3.2.2	Algorithmus . . . . .	13
3.3	Ausgabe . . . . .	14
3.3.1	Gültige Positionsmarken . . . . .	14
3.3.2	Kreisdurchmesser . . . . .	14
3.3.3	Minimale Erkennungsentfernung . . . . .	15
3.4	Berechnungsbeispiel . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Algorithmus zur Positionsmarkenerkennung</b>	<b>17</b>
4.1	Eingaben . . . . .	17
4.1.1	Liste aller erstellten Positionsmarken . . . . .	17
4.1.2	Liste der benutzten Positionsmarken . . . . .	17
4.1.3	Konfiguration der Erkennung . . . . .	17

4.1.3.1	Abmessungen des kleinsten erlaubten Kreises . . . . .	18
4.1.3.2	Maximale Neigung . . . . .	18
4.1.3.3	Maximaler Eckpunktefehler . . . . .	18
4.1.3.4	Parameter der Kantenerkennung . . . . .	19
4.2	Implementierung . . . . .	19
4.2.1	Kantendetektion . . . . .	19
4.2.1.1	Positionen auf der Kantenstrecke . . . . .	20
4.2.1.2	Pseudo-Code der Kantendetektion . . . . .	21
4.2.1.3	Berechnung der subpixelgenauen Kantenposition . . . . .	23
4.2.2	Bestimmung von Ecken . . . . .	23
4.2.2.1	Auffinden der Ecken . . . . .	24
4.2.3	Erkennung der Positionsmarken . . . . .	25
4.2.4	Identifikation der Positionsmarken . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Testergebnisse</b>	<b>27</b>
5.1	Testbilder . . . . .	27
5.1.1	Legende der Kenndatentabellen . . . . .	27
5.2	Ausführungszeiten . . . . .	38
5.3	Bestimmung der Messfehler der Kreismitten . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>40</b>
6.1	Kritik . . . . .	40
6.1.1	Aussagekraft der Testergebnisse . . . . .	40
6.1.2	Sichtbarkeit der Positionsmarken . . . . .	41
6.1.3	Rotation . . . . .	41
6.2	Ausblick . . . . .	41
6.2.1	Erkennungsentfernungen . . . . .	42
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>43</b>

# Tabellenverzeichnis

3.1	Erkennungsextreme . . . . .	13
4.1	Beispiel der Berechnung der subpixelgenauen Kantenposition . . . . .	23
5.1	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 01.bmp . . . . .	28
5.2	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 02.bmp . . . . .	29
5.3	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 03.bmp . . . . .	30
5.4	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 04.bmp . . . . .	31
5.5	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 05.bmp . . . . .	32
5.6	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 06.bmp . . . . .	33
5.7	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 07.bmp . . . . .	34
5.8	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 08.bmp . . . . .	35
5.9	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 09.bmp . . . . .	36
5.10	Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 10.bmp . . . . .	37
5.11	Ausführungszeiten . . . . .	38

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Selbstähnliche Barcodes von Scharstein und Briggs . . . . .	5
2.2	Doppelverhältnis-Barcodes von Taylor und Kriegman . . . . .	6
2.3	Neue kodierte Zirkular-Messmarken von Knyaz und Sibirjakov . . . . .	7
2.4	Projektive Invarianz des Doppelverhältnisses . . . . .	8
2.5	Verwendetes Positionsmarkenmuster . . . . .	9
4.1	Beispiel der vertikalen und horizontalen Neigung . . . . .	19
4.2	Beispiel einer Kantendetektion . . . . .	21
4.3	Eckkante . . . . .	24
4.4	Auffinden der Eckkante . . . . .	24
4.5	Beispiel eines Rasterschritts . . . . .	25
5.1	Testbild 01.bmp . . . . .	28
5.2	Testbild 02.bmp . . . . .	29
5.3	Testbild 03.bmp . . . . .	30
5.4	Testbild 04.bmp . . . . .	31
5.5	Testbild 05.bmp . . . . .	32
5.6	Testbild 06.bmp . . . . .	33
5.7	Testbild 07.bmp . . . . .	34
5.8	Testbild 08.bmp . . . . .	35
5.9	Testbild 09.bmp . . . . .	36
5.10	Testbild 10.bmp . . . . .	37

# 1 Einleitung

Die selbstständige Navigation eines autonomen Fahrzeugs ist eine der Aufgaben, mit denen sich die mobile Robotik seit einigen Jahren verstärkt beschäftigt. Es sind verschiedene Lösungen für unterschiedliche Einsatzgebiete entstanden. An der HAW Hamburg wird ein System gesucht, welches die Navigation im Innen- und Außenbereich, also unter realen Bedingungen, ermöglicht. Dabei soll die Lösung möglichst mit vorhandenen Mitteln realisiert werden, eine hohe Präzision der Positionsbestimmung ermöglichen und unter Echtzeitbedingungen praktikabel sein.

Die Navigation besteht aus drei Bereichen:

1. Bestimmen der geografischen Position
2. Berechnen des Weges zum Ziel
3. Halten des Kurses

Diese Arbeit befasst sich mit dem Sammeln der benötigten Daten für die Positionsbestimmung. Das Ermitteln der Position aus diesen Daten ist kein Teil dieser Arbeit.

Vor allem eignen sich folgende Methoden der Positionsbestimmung zur Realisierung der Navigation eines autonomen Fahrzeugs:

- Erkennen von Landmarken
- Koppelnavigation
- Funknavigation

Bei der Koppelnavigation wird die Position laufend aus Geschwindigkeit, Kurs und Zeit ermittelt. Zum Einsatz kommen sog. Odometer, die Bewegung und Orientierung der Fahrzeugräder messen. Das wohl bekannteste Beispiel eines Odometers ist der Kilometerzähler in Kraftfahrzeugen. Odometer liefern nur auf kurze Strecken genaue Positionen, denn mit zunehmender zurückgelegter Strecke summieren sich die Fehler der Positionsbestimmung auf (Khaleeli, 1997). Sie sind daher als alleiniges System zur präzisen Bestimmung der Position unbrauchbar.

Will man Navigation mit Funk realisieren, aber nicht in ein entsprechendes System investieren, kann man das vorhandene GPS-System verwenden. GPS - das „Global Positioning System“ ist der zurzeit bedeutendste Vertreter der Satellitennavigation. Portable Geräte zur Navigation stehen auf einem breiten Markt zur Verfügung und werden immer erschwinglicher. Leider ist

GPS lediglich für Outdoor-Navigation ausgelegt und ermöglicht eine Präzision von etwa 10 Metern (Brunato und Battiti, 2003).

Für das Navigieren durch Erkennung von Landmarken kann bereits eine einfache Digital-Kamera zum Einsatz kommen. Als Landmarken können natürliche oder künstliche Objekte verwendet werden, die von einem Softwaresystem erkannt werden müssen. Voraussetzung ist, dass mindestens drei Landmarken von jeder zu bestimmenden Position für eine Positionsbestimmung mittels Triangulation erkannt werden müssen (Betke und Gurvits, 1995).

## **1.1 Ziel dieser Arbeit**

Ziel dieser Arbeit ist es, die selbstständige Positionsbestimmung eines autonomen Fahrzeugs in realer Umgebung zur Navigation im Nahbereich zu ermöglichen. Diese Bestimmung soll in Subsekundenzeit und zentimetergenau durch Kameraaufnahmen von geeigneten Positionsmarken erfolgen können.

## **1.2 Vorgehensweise**

In Kapitel 2 (Positionsmarken) werden Positionsmarken und ihre Eigenschaften untersucht und sich für ein geeignetes Muster entschieden bzw. ein neues entworfen. Danach werden in Kapitel 3 (Programm zur Konfiguration von Doppelverhältnis-Positionsmarken) Merkmale betrachtet, unter denen die Positionsmarken erkannt und identifiziert werden sollen und können, um Positionsmarken nach realistischen Kriterien erstellen zu können. Das Kapitel 4 (Algorithmus zur Positionsmarkenerkennung) befasst sich mit der Implementierung eines Programms, welches die zuvor konfigurierten Positionsmarken erkennen und identifizieren soll. Kapitel 5 (Testergebnisse) präsentiert Ergebnisse, die bei der Erkennung von Testaufnahmen resultierten. Im abschließenden Kapitel 6 (Fazit) werden gewonnene Erkenntnisse zusammengefasst und kritisch betrachtet.

## 2 Positionsmarken

Der Begriff Positionsmarke, so wie er in dieser Arbeit benutzt wird, ist zu verstehen als künstliche, bewusst zu Navigationszwecken gestaltete und an eine gewollte Position platzierte Marke, an der sich ein System, welches diese Positionsmarke kennen muss, orientieren kann. Eine ebenfalls geläufige Bezeichnung dafür ist Landmarke. Unter diesem Begriff werden allerdings auch auffällige, meist weithin sichtbare topographische Objekte verstanden, was natürliche und zufällig positionierte Marken einschließt.

Neben der Verwendung in der Navigation finden Positionsmarken auch in der Messtechnik Verwendung. So können Positionsmarken bereits zur Vermessung des Navigationsbereichs benutzt werden, um die Positionen der Positionsmarken zu messen, nach denen das autonome Fahrzeug dann navigieren kann.

### 2.1 Anforderungen

Beim Entwurf der Positionsmarken und auch des Systems zu ihrer Erkennung sind gewisse Anforderungen zu beachten. Folgenden Kriterien sollte Aufmerksamkeit geschenkt werden:

- Erkennbarkeit
- Identifizierbarkeit
- Bestimmbarkeit der Position
- Ausführungszeit

Wenn eine Positionsmarke als solche erkannt werden soll, muss sie ein Merkmal besitzen, welches in ihrer eingesetzten Umgebung einzigartig ist. Das kann durch den Einsatz besonderer Muster (oder auch Farben) geschehen, die möglichst selbst in komplexer Hintergrundtextur nicht vorkommen. Da die Erkennbarkeit weitreichend unabhängig von herrschenden Lichtverhältnissen sein soll, ist es von Vorteil, wenn nicht nur die Erkennungsroutine, sondern auch die Positionsmarken selbst für eine hohe Erkennbarkeit sorgen. Bei der Verwendung eines Musters sollte der Kontrast möglichst stark sein, daher ist die Verwendung von schwarz und weiß empfehlenswert. Für noch stärkeren Kontrast kann retroreflektierende Folie benutzt werden, die von einer Lichtquelle angestrahlt wird.

Um identifizierbar zu sein, müssen die Positionsmarken untereinander ein variables Kriterium mit unterschiedlicher Ausprägung haben.

Die von der Kamera aufgenommenen Bilder unterliegen perspektivischen Verzerrungen, daher sollten die Positionsmarken, sofern ihre Erkennbarkeit an ein Muster gebunden ist, invariant gegenüber diesen Verzerrungen sein. Nur so kann eine optimale Erkennbarkeit und Identifizierbarkeit garantiert werden.

Die Hauptaufgabe einer Positionsmarke besteht in der Bereitstellung einer Position. Daher sollte ein Merkmal der Positionsmarke dazu dienen, ihre Position in der Umgebung darzustellen. Je exakter diese Position bestimmt werden kann, desto genauer kann die Position des navigierenden Systems ermittelt werden bzw. desto höher ist die Genauigkeit der Vermessung.

Ein entscheidender Faktor eines Systems zur Bestimmung der geografischen Position ist seine Ausführungszeit, da das navigierende System in der Lage sein soll, Kursänderungen rechtzeitig einzuleiten. Bei der visuellen Navigation mit Positionsmarken bedeutet dies die Zeit, die benötigt wird, um

- Bilder aufzunehmen,
- Positionsmarken zu erkennen,
- die Identifikation der Positionsmarken durchzuführen und
- die Position zu ermitteln.

Die Erkennung der Positionsmarken auf einem einzelnen Bild sollte in Subsekundenzeit geschehen.

## 2.2 Existierende Lösungen

Im Bereich der visuellen Navigation existieren bereits verschieden gestaltete Positionsmarken. Die Benutzung von Streifen (Barcodes) und Kreisen (Zirkularmarken) ist dabei dominant.

Barcodes zeichnen sich durch schnelle Erkennbarkeit aus, da durch das Lesen einer Bildzeile, in der sich der Barcode befindet, bereits alle Informationen zur Erkennung erfasst werden können. Die Sicherheit der Erkennung eines Barcodes nimmt zu, desto mehr Bildzeilen analysiert werden, auf denen sich der Barcode befindet. Das Hauptziel von Zirkularmarken ist die möglichst exakte Bestimmbarkeit ihrer Position, die aufgrund ihrer Kreisstruktur garantiert wird.

Nachfolgend werden einige Barcodes und Zirkularmarken genauer betrachtet.

### 2.2.1 Selbstähnliche Barcodes von Scharstein und Briggs

Die selbstähnlichen Barcodes von Scharstein und Briggs (Scharstein und Briggs, 1999) stützen sich auf die Annahme, dass Selbstähnlichkeit in der eingesetzten Umgebung als besonders unwahrscheinlich gilt. Bei selbstähnlichen Strukturen sind Ausschnitte aus der Graphik zum ganzen Bild ähnlich (Beck, 1988). In diesem Falle ist der Barcode aus Strichen aufgebaut, die von links nach rechts immer im gleichen Verhältnis dünner werden (siehe Abb. 2.1). Dadurch wird die Erkennbarkeit aus großen und kleinen Entfernungen gleichermaßen ermöglicht. Dieses Verhältnis variiert unter den einzelnen Positionsmarken nicht, denn die Selbstähnlichkeit dient der Erkennbarkeit und nicht der Unterscheidbarkeit. Zu diesem, waagrecht zu lesenden Barcode findet ein weiterer, in senkrechter Richtung zu identifizierender Barcode Verwendung. Wurde eine Positionsmarke aufgrund seiner selbstähnlichen Eigenschaft erkannt, kann die Identifizierung über diesen zweiten Barcode erfolgen. Die Erkennung geschieht in Subsekundenzeit, so kann man nachlesen: „The running time is 0.75 seconds on a 450 MHz Pentium II machine for a 640 x 480 image.“ (Scharstein und Briggs, 1999).



Abbildung 2.1: Selbstähnliche Barcodes von Scharstein und Briggs

### 2.2.2 Doppelverhältnis-Barcodes von Taylor und Kriegman

Die Doppelverhältnis-Barcodes von Taylor und Kriegman (Taylor und Kriegman, 1999) bestehen aus einem weißen, rechteckigen Hintergrund, auf dem sich drei senkrechte Streifen in jeweils unterschiedlicher Anordnung befinden (siehe Abb. 2.2). Werden diese Streifen in waagerechter Richtung erkannt, so werden zur Identifikation die von ihnen gebildeten Doppelverhältnisse (zur Erläuterung des Doppelverhältnisses siehe 2.3.1) berechnet.



Abbildung 2.2: Doppelverhältnis-Barcodes von Taylor und Kriegman

### 2.2.3 Neue kodierte Zirkular-Messmarken von Knyaz und Sibiryakov

Bei den neuen kodierten Zirkular-Messmarken von Knyaz und Sibiryakov (Knyaz und Sibiryakov, 1998) ist der Kreis das dominante Objekt. Um einen Kreis, der die Position der Zirkularmarke bestimmt, befindet sich ein Ring (siehe Abb. 2.3). An der Innenseite dieses Ringes befinden sich bis zu zehn weitere, kleinere Kreise. Unterschiedliche Positionsmarken lassen sich durch Weglassen einer, mehrerer oder aller dieser kleinen Kreise erschaffen. So ergeben sich zwar 1024 Möglichkeiten, doch „in view of the requirement of invariance of a code to rotation and reflection only 76 numbers can be coded.“ (Knyaz und Sibiryakov, 1998).



Abbildung 2.3: Neue kodierte Zirkular-Messmarken von Knyaz und Sibiryakov

## 2.3 Neu gestaltete Positionsmarken mit kodiertem Doppelverhältnis

In dieser Arbeit werden Positionsmarken mit kodiertem Doppelverhältnis genauer betrachtet.

### 2.3.1 Mathematisches Doppelverhältnis

Aus vier auf einer Gerade liegenden Punkten A bis D berechnet man den Quotienten der Teilverhältnisse von  $(ADC)$  und  $(BDC)$ . Das Teilverhältnis (TV) von  $(ADC)$  ist  $\frac{\overline{AC}}{\overline{AD}}$ , das von  $(BDC)$  entsprechend  $\frac{\overline{BC}}{\overline{BD}}$ , und somit wird das Doppelverhältnis (DV) berechnet mit:

$$DV(ABCD) = \frac{\overline{AC} \cdot \overline{BD}}{\overline{BC} \cdot \overline{AD}} \quad (2.1)$$

In der Anwendung als Positionsmarke wird die Eigenschaft als „invariant under a projectivity“ (Hartley und Zisserman, 2003) genutzt (siehe Abb. 2.4).

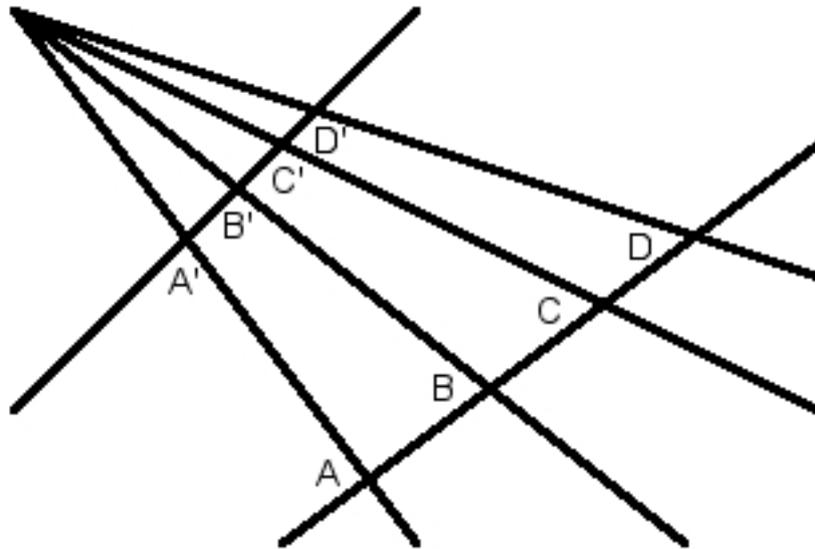


Abbildung 2.4: Projektive Invarianz des Doppelverhältnisses  
Bei einer Projektion einer Linie auf eine andere entspricht das Doppelverhältnis (DV) der Streckenpunkte A' bis D' dem der Streckenpunkte A bis D. Es gilt:

$$DV(ABCD) = DV(A'B'C'D') \quad (2.2)$$

### 2.3.2 Verwendete Positionsmarken

Das verwendete Muster der in dieser Arbeit näher betrachteten Positionsmarken mit kodiertem Doppelverhältnis ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

Die neu gestalteten Positionsmarken bestehen aus einem Rechteck, in dem sich vier übereinander liegende Kreise befinden. Die Kreise liegen auf einer Linie und bilden Doppelverhältnisse. Aus Gründen der Kontrastbildung ist die Hintergrundpappe schwarz und das Rechteck und die Kreise aus retroreflektierender Folie gefertigt. Desweiteren sind die Abmessungen zu beachten. Die Linienbreite des Rechtecks, der äußere Abstand zu den Enden der Positionsmarke, als auch der innere Abstand zu den Kreisen entsprechen jeweils dem Kreisdurchmesser. Die Abstände zwischen den Kreisen betragen ebenfalls mindestens den Kreisdurchmesser, sind ansonsten aber variabel, damit unterschiedliche Doppelverhältnisse erzeugt werden können. Durch die Verwendung der Abstände soll die Beeinträchtigung der Erkennbarkeit aus schwie-

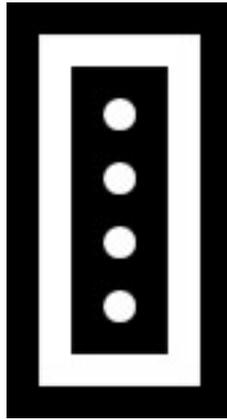


Abbildung 2.5: Verwendetes Positionsmarkenmuster

rigen Betrachtungswinkeln und unter schwierigen Lichtverhältnissen minimiert werden. Zudem wird die Reflexion der Folie dadurch berücksichtigt. Der untere Kreis fungiert nicht nur als Teil des Doppelverhältnisses, er gilt auch als Position der Marke. Die Kreisstruktur soll durch ihre Überlegenheit gegenüber anderen geometrischen Figuren in Hinsicht auf die Bildpunktmessung (Sung Joon Ahn und Recknagel, 1999) eine hohe Genauigkeit der Positionsmessung ermöglichen.

## 3 Programm zur Konfiguration von Doppelverhältnis-Positionsmarken

Wählt man die Abmessungen einer Doppelverhältnis-Positionsmarke nach Belieben, so ist es unsicher, ob die Positionsmarken unter realen Bedingungen erkannt oder eindeutig identifiziert werden können. Das Programm zur Konfiguration von Doppelverhältnis-Positionsmarken soll helfen, diese Unsicherheit zu minimieren, indem es einen Satz von Positionsmarken aufgrund festgelegter und geschätzter Parameter erstellt.

### 3.1 Eingaben

Sollen unterscheidbare Positionsmarken erstellt werden, so sind bestimmte Randbedingungen, unter denen sie unterschiedlich sein sollen, zu definieren. Die folgenden Größen können zwar beliebig gewählt werden, doch es ist ratsam, sie aufeinander abzustimmen, da einige von ihnen in Wechselwirkung stehen.

#### 3.1.1 Daten der benutzten Kamera

Um die Berechnung der Bildgröße der Kreise und des Abstandes zwischen ihnen zu ermöglichen, werden folgende Daten der benutzten Kamera benötigt:

- Pixelgröße auf dem Chip (in Mikrometer)
- Pixelanzahl (Breite und Höhe)
- Brennweite (in Millimeter)

Je kleiner die Brennweite ist, desto größer müssen die Kreise sein, um noch mit vorgegebener Bildgröße betrachtet werden zu können. Bei gleicher Positionsmarkenhöhe (siehe 3.1.2) sind folgendermaßen weniger Doppelverhältnisse erstellbar und somit ist die maximale Reichweite des navigierenden Systems begrenzt. Allerdings sind die Positionsmarken auch noch aus geringerer Entfernung als bei einer größeren Brennweite erkennbar. Je höher die Anzahl der Pixel ist, desto mehr Positionsmarken können erstellt werden, da die Kreisgröße auf dem Bild (siehe 3.1.4) kleiner sein darf.

### 3.1.2 Positionsmarkenhöhe

Bei der Positionsmarkenhöhe wird es praktisch meist der Fall sein, dass die Höhe natürlich begrenzt wird. Steht die Positionsmarke z. B. in einem Raum, so kann ihre Höhe maximal der Raumhöhe entsprechen. Vorausgesetzt, dass die Marke aus der Betrachtungsposition überhaupt ins Kamerabild passt. Die Höhe der Positionsmarke entscheidet also darüber, was für eine minimale Betrachtungsentfernung möglich ist. Sie darf allerdings auch nicht zu niedrig gewählt werden. Zumindest die Kreise und die Mindestabstände zwischen ihnen müssen auf die Positionsmarke passen, um wenigstens ein Doppelverhältnis darstellen zu können. Je höher die Positionsmarkenhöhe ist, umso mehr Doppelverhältnisse können erstellt werden.

### 3.1.3 Betrachtungsentfernung

Die gewünschte Weite, aus der die Kreise mindestens mit einer vorgegebenen Bildgröße erkennbar sein sollen. Je niedriger sie gewählt wird, desto mehr Positionsmarken sind möglich, da die Kreisgröße kleiner sein darf.

### 3.1.4 Bildgröße des Kreisdurchmessers

Minstdurchmesser der Kreise auf dem Bild, das die Kamera bei angegebener Betrachtungsentfernung aufnimmt. Je größer dieser Wert ist, umso genauer können die Kreismitten potentiell bestimmt werden. Allerdings sinkt damit die Anzahl der möglichen Doppelverhältnisse.

### 3.1.5 Genauigkeit zu produzierender Größen

Unabhängig davon, ob die Marken mithilfe von Hand, Lineal und Stift oder maschinell erstellt werden, die resultierenden Gegenstandsgrößen könnten Genauigkeiten besitzen, die nicht produziert werden können. Dazu gehören:

- Kreisdurchmesser
- Rechtecklinienbreite
- Abstände vom Rechteck zu den Kreisen
- Doppelverhältnisstrecken (von Kreismitte zu Kreismitte)

Beispielsweise sind bei einem Millimeter Genauigkeit ein Kreisdurchmesser von 24 oder 25 mm als zu produzierende Größe erlaubt, dagegen sind 24,1 oder 25,12 mm verboten.

### 3.1.6 Erstellungsgenauigkeit

Sowohl das Ausschneiden möglichst runder Kreise als auch das Aufkleben auf die angestrebten Positionen stellen Ungenauigkeitsfaktoren dar. Das erstrebte Doppelverhältnis exakt abzubilden, ist Menschen und auch Maschinen schlicht unmöglich. Die Folgen sind Änderungen der Längen der einzelnen Streckenabschnitte und Verschiebungen, sodass die Kreismitten nicht exakt auf einer Gerade liegen. Für die Identifizierbarkeit ist aber vor allem die damit verbundene Änderung des Doppelverhältnisses interessant. Im Gegensatz zur Genauigkeit der zu produzierenden Größen (siehe Kapitel 3.1.5) ist mit dieser Genauigkeit der maximal erlaubte Fehler bei der Erstellung dieser Größen gemeint. Ein Beispiel:

- Genauigkeit zu produzierender Größen: 1 mm
- Erstellungsgenauigkeit: 0,3 mm

Soll eine zu produzierende Strecke von Kreismitte zu Kreismitte z. B. 30 mm betragen, so dürfte die tatsächlich erstellte Streckenlänge zwischen 29,7 und 30,3 mm liegen. Man beachte, dass die Erstellungsgenauigkeit stets kleiner als die Genauigkeit zu produzierender Größen sein sollte, damit die zu produzierenden Größen grundsätzlich erstellt werden können.

### 3.1.7 Messgenauigkeit

Die Messgenauigkeit bestimmt den maximal erlaubten Fehler beim Messen der Kreismitten einer Positionsmarke, bei dem das Doppelverhältnis innerhalb der Betrachtungsentfernung (siehe 3.1.3) identifizierbar bleiben soll. Die Angabe erfolgt in Prozent in Abhängigkeit vom theoretisch sichtbaren, durch die Entfernung bestimmten Kreisdurchmesser. Beispielsweise wählt man eine Messgenauigkeit von einem Prozent und nimmt eine Positionsmarke aus maximaler Betrachtungsentfernung auf. Wenn die Kreisdurchmesser jeweils vier Pixel betragen, so darf der Messfehler pro Kreis 0,04 Pixel sein.

## 3.2 Berechnung

Die aufgeführten Eingaben bieten die Grundlage der Berechnung eines Satzes an Positionsmarken, der diesen Eingaben genügt.

### 3.2.1 Extreme

Die Angaben der Erstellungsgenauigkeit (siehe 3.1.6) und der Messgenauigkeit (siehe 3.1.7) spielen eine besondere Rolle, wenn es darum geht, wie die Doppelverhältnisse beschaffen sein sollen. Denn sie ermöglichen die Berechnung zweier Extreme, anhand derer entschieden

werden kann, ob zwei Doppelverhältnisse unter den Bedingungen der Eingaben unterscheidbar sind:

- Die minimale Erkennung eines minimal erstellten Doppelverhältnisses
- Die maximale Erkennung eines maximal erstellten Doppelverhältnisses

Diese Extreme werden an einem Beispiel (siehe Tabelle 3.1) demonstriert, welches von folgenden Genauigkeiten ausgeht:

- Erstellungsgenauigkeit: 1 mm
- Messgenauigkeit: 2 mm

Die Messgenauigkeit wird hier zur Vereinfachung in Millimetern angegeben. Am stärksten wirkt sich eine Veränderung der Strecke  $\overline{BC}$  auf das Doppelverhältnis aus, daher wird ihre Veränderung in der Berechnung des Positionsmarkensatzes und auch im Beispiel verwendet.

	Position (mm) von				Doppelverhältnis
	A	B	C	D	
Minimal erkanntes minimal erstelltes Doppelverhältnis	3	27	63	87	1,1905
Minimal erstelltes Doppelverhältnis	1	29	61	89	1,2784
Angestrebtes Doppelverhältnis	0	30	60	90	1,3333
Maximal erstelltes Doppelverhältnis	-1	31	59	91	1,3975
Maximal erkanntes maximal erstelltes Doppelverhältnis	-3	33	57	93	1,5625

Tabelle 3.1: Erkennungsextreme

### 3.2.2 Algorithmus

Die Berechnung der Positionsmarken geht zunächst von der Positionsmarke mit dem kleinsten maximal erstellten Doppelverhältnis aus, welches das mit der größtmöglichen Strecke  $\overline{BC}$  ist. Nun wird nach einer Nachfolger-Positionsmarke für diese erste Vorgänger-Positionsmarke gesucht. Dafür herrschen Regeln:

1. Die Streckenlängen müssen gültig sein (siehe 3.1.5).
2. Das minimal erkannte minimal erstellte Doppelverhältnis (siehe 3.2.1) der Nachfolger-Positionsmarke muss größer als das maximal erkannte maximal erstellte Doppelverhältnis der Vorgänger-Positionsmarke sein.
3. Das maximal erkannte maximal erstellte Doppelverhältnis der Nachfolger-Positionsmarke soll minimal sein, um möglichst viele Marken zu bekommen.

4. Wenn bei möglichen Nachfolger-Positionsmarken das maximal erkannte maximal erstellte Doppelverhältnis gleich ist, soll die Nachfolger-Positionsmarke mit dem höchsten minimal erkannten minimal erstellten Doppelverhältnis als Nachfolger-Positionsmarke gewählt werden, um den Unterschied zur Vorgänger-Positionsmarke zu maximieren.

Die resultierende Nachfolger-Positionsmarke wird nun Vorgänger-Positionsmarke für die weitere Berechnung. Das Programm endet, wenn keine weitere Nachfolger-Positionsmarke errechnet werden konnte.

### 3.3 Ausgabe

Nach der Berechnung wird ein Satz an Positionsmarken und der Kreisdurchmesser ausgegeben, anhand derer die Erstellung der Positionsmarken durchgeführt werden kann. Als zusätzliche Information wird die minimale Erkennungsentfernung angegeben. Für ein Beispiel siehe Kapitel 3.4.

#### 3.3.1 Gültige Positionsmarken

Den Eingaben entsprechend und dem Algorithmus 3.2.2 folgend wird ein Satz von Positionsmarken ausgegeben. Die Ausgabe umfasst:

- Positionsmarkennummer (fortlaufend)
- die zu produzierenden Streckenlängen
- Doppelverhältnissbereich zur Identifikation

Der zur Identifikation genügende Bereich des Doppelverhältnisses wird von den Extremen (siehe 3.2.1) des minimal erkannten minimal erstellten Doppelverhältnisses und des maximal erkannten maximal erstellten Doppelverhältnisses gebildet. Dieser Bereich dient als Eingabe für die Erkennungsroutine (siehe 4.1.1). Zusätzlich werden die angestrebten Doppelverhältnisse (entsprechend der Streckenlängen) und der Bereich der erlaubten Erstellung als Doppelverhältnisse angegeben.

#### 3.3.2 Kreisdurchmesser

Der Kreisdurchmesser, der genügt, um aus der maximal gewünschten Betrachtungsentfernung die Kreise mit entsprechendem Durchmesser auf dem Bild zu erkennen, wird ausgegeben. Der Durchmesser entspricht sowohl der Linienbreite des umgebenden Rechtecks als auch den Abständen zwischen Kreisen und Rechteck. Zusammen mit den zu produzierenden Streckenlängen (siehe 3.3.1) können die Positionsmarken erstellt werden.

### 3.3.3 Minimale Erkennungsentfernung

Die Positionsmarkenhöhe bestimmt die minimale Erkennungsentfernung, die zusätzlich zu den Positionsmarken ausgegeben wird. Bei der Angabe wird davon ausgegangen, dass die Kamera die Positionsmarken genau senkrecht, also in einem Winkel von null Grad auf die Positionsmarkenmitte, betrachtet. Wenn Kamera und Positionsmarken sich nicht auf gleicher Höhe befinden, ist die tatsächliche minimale Erkennungsentfernung höher.

## 3.4 Berechnungsbeispiel

Um ein Gefühl dafür zu bekommen, welche Werte im realistischen Bereich liegen, folgt ein Beispiel der Berechnung. Die folgenden, aus Erfahrung gewonnenen Angaben dienen als Berechnungsgrundlage:

- Daten der benutzten Kamera:
  - Pixelgröße auf dem Chip [ $\mu\text{m}$ ]: 5,6
  - Pixelanzahl (Breite x Höhe): 640 x 480
  - Brennweite [mm]: 6,0
- Positionsmarkenhöhe [mm]: 500
- Betrachtungsentfernung [mm]: 5363
- Bildgröße des Kreisdurchmessers [Pixel]: 5
- Genauigkeit zu produzierender Größen [mm]: 1
- Erstellungsgenauigkeit [mm]: 0,3
- Messgenauigkeit [Prozent]: 3,3

Setzt man die Betrachtungsentfernung auf 8934 mm und die Bildgröße des Kreisdurchmessers auf 3 Pixel so erhält man eine Ausgabe, die nahezu identisch mit der ist, die bei den getroffenen Eingaben resultiert. Die Abhängigkeit dieser Werte voneinander sollte stets bedacht werden.

Hier nun die Ausgabe des Programms bei den oben getroffenen Einstellungen:

Kreisdurchmesser in mm = 25.0

Minimale Betrachtungsentfernung in mm = 1122.0714285714284

Marke Nr.: 1

Angestrebte Streckenlänge AB in mm....: 50.0  
Angestrebte Streckenlänge BC in mm....: 225.0  
Angestrebte Streckenlänge CD in mm....: 50.0  
Min. erk. min. erst. Doppelverhältnis..: 1.0310645305292274  
Minimal erstelltes Doppelverhältnis...: 1.0333452484018504  
Angestrebtes Doppelverhältnis.....: 1.0341880341880343  
Maximal erstelltes Doppelverhältnis...: 1.0350423953365129  
Max. erk. max. erst. Doppelverhältnis..: 1.0374767439345467

Marke Nr.: 2

Angestrebte Streckenlänge AB in mm....: 53.0  
Angestrebte Streckenlänge BC in mm....: 216.0  
Angestrebte Streckenlänge CD in mm....: 54.0  
Min. erk. min. erst. Doppelverhältnis..: 1.0374915268806228  
Minimal erstelltes Doppelverhältnis...: 1.0400699738113732  
Angestrebtes Doppelverhältnis.....: 1.0410216718266254  
Maximal erstelltes Doppelverhältnis...: 1.0419858761633571  
Max. erk. max. erst. Doppelverhältnis..: 1.0447303110046613

Marke Nr.: 3

Angestrebte Streckenlänge AB in mm....: 55.0  
Angestrebte Streckenlänge BC in mm....: 209.0  
Angestrebte Streckenlänge CD in mm....: 60.0  
Min. erk. min. erst. Doppelverhältnis..: 1.0447904628660643  
Minimal erstelltes Doppelverhältnis...: 1.0476709767876617  
Angestrebtes Doppelverhältnis.....: 1.0487329434697856  
Maximal erstelltes Doppelverhältnis...: 1.049808238812748  
Max. erk. max. erst. Doppelverhältnis..: 1.0528656562316896

...

Marke Nr.: 28

Angestrebte Streckenlänge AB in mm....: 134.0  
Angestrebte Streckenlänge BC in mm....: 51.0  
Angestrebte Streckenlänge CD in mm....: 138.0  
Min. erk. min. erst. Doppelverhältnis..: 2.046605875820515  
Minimal erstelltes Doppelverhältnis...: 2.1017874660972935  
Angestrebtes Doppelverhältnis.....: 2.1225641959570205  
Maximal erstelltes Doppelverhältnis...: 2.14385043263288  
Max. erk. max. erst. Doppelverhältnis..: 2.205807042104073

## 4 Algorithmus zur Positionsmarkenerkennung

In diesem Kapitel wird die Implementierung des Algorithmus zur Positionsmarkenerkennung vorgestellt.

### 4.1 Eingaben

Neben dem auf Positionsmarken zu untersuchenden 8-Bit Grauwert-Bild werden folgende Angaben benötigt:

#### 4.1.1 Liste aller erstellten Positionsmarken

Eine Liste aller erstellten Positionsmarken mit den Identifikationsnummern der Positionsmarken sowie dem minimal erkannten minimal erstellten und dem maximal erkannten maximal erstellten Doppelverhältnis (siehe 3.2.1). Anhand dieser Liste im XML-Format werden die Positionsmarken identifiziert.

#### 4.1.2 Liste der benutzten Positionsmarken

Die Liste der benutzten Positionsmarken bedient sich der Positionsmarken aus der Liste aller erstellten Positionsmarken. Es müssen allerdings nicht alle Positionsmarken aufgeführt werden, sondern nur die tatsächlich in Position gebrachten. Die Positionen sollen in diese Liste eingetragen werden, sie beziehen sich auf den jeweils unteren Kreis einer Positionsmarke. Diese Liste im XML-Format dient der Navigation.

#### 4.1.3 Konfiguration der Erkennung

Der Algorithmus zur Erkennung der Positionsmarken muss mit folgenden Konfigurationseinstellungen initialisiert werden:

- Breite und Höhe der zu untersuchenden Bilder in Pixeln (z. B. 640 x 480)
- Mindestgrauwert eines zu erkennenden Punktes auf der Reflexfolie (Empfehlung: 75)
- Abmessungen des kleinsten erlaubten Kreises (siehe 4.1.3.1)
- Maximale Neigung (siehe 4.1.3.2)
- Maximaler Eckpunktefehler (siehe 4.1.3.3)
- Parameter der Kantenerkennung (siehe 4.1.3.4)

Diese Einstellungen werden aus einer XML-Datei eingelesen.

#### **4.1.3.1 Abmessungen des kleinsten erlaubten Kreises**

Diese Einstellung entscheidet darüber, welche auf dem Bild befindlichen Positionsmarken als identifizierbar gelten sollen. Höhe und Breite der kleinsten erlaubten Kreises in Pixeln sollten maximal der Bildgröße des Kreisdurchmessers (siehe 3.1.4) entsprechen. Ist mit Betrachtungswinkeln zu rechnen, welche eine optische Stauchung bewirken, so sollten kleinere Abmessungen gewählt werden. Empfohlene Werte:

- Breite: 2 Pixel
- Höhe: 5 Pixel

#### **4.1.3.2 Maximale Neigung**

Die maximal erlaubte vertikale und horizontale Neigung der Seiten des Rechtecks der Positionsmarken in Grad. Die vertikale Neigung findet bei der oberen und unteren Rechteckseite Anwendung, die horizontale bei der linken und rechten. Das Beispiel in Abbildung (4.1 stellt ein Szenario dar, in dem die Winkel aller Seiten aufgrund von Rotation 5 Grad betragen. Die Winkel der einzelnen Seiten können aber, z. B. durch Verzerrung, unterschiedliche Ausprägungen besitzen. Empfohlene Werte:

- Maximal erlaubte vertikale Neigung: 15 Grad
- Maximal erlaubte horizontale Neigung: 40 Grad

#### **4.1.3.3 Maximaler Eckpunktefehler**

Wird die selbe Ecke erneut bestimmt, so kann die Ungenauigkeit bei der Bestimmung von Ecken (siehe 4.2.2) dazu führen, dass nicht der selbe Eckpunkt gefunden wird. Liegen die Eckpunkte um den maximalen Eckpunktefehler auseinander, so gelten sie als die selbe Ecke kennzeichnend. Empfohlener Wert: 3 Pixel

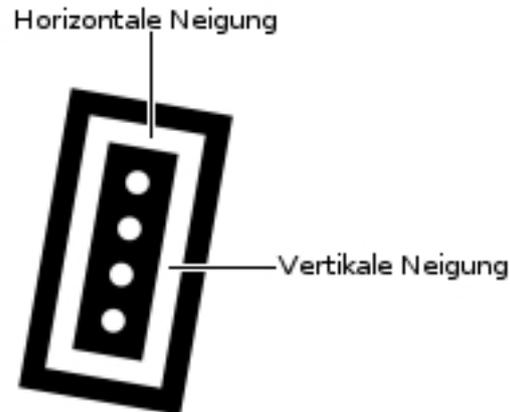


Abbildung 4.1: Beispiel der vertikalen und horizontalen Neigung

#### 4.1.3.4 Parameter der Kantenerkennung

Die zu treffenden Einstellungen der Parameter:

- Minimale Grauwert-Differenz (Empfohlener Wert: 50)
- Minimales good-Verhältnis (Empfohlener Wert: 75%)

Auf einer Strecke von Punkten muss die Grauwert-Differenz zweier Punkte eine minimalen Grauwert-Differenz erreichen bzw. überschreiten, damit diese Strecke als Kante angesehen wird. Ein Punkt (*good*) auf der Kantenstrecke wird ab einem bestimmten Grauwert, den das minimale good-Verhältnis bestimmt, als pixelgenaue Annäherung an die Kantenposition angesehen. Diese Parameter werden in Kapitel 4.2.1, welches sich mit der Kantendetektion befasst, ausführlicher erklärt.

## 4.2 Implementierung

Die Implementierung des Algorithmus zur Erkennung des Positionsmarkenmusters basiert auf der Verwendung von Kantendetektion (siehe 4.2.1) und der Bestimmung von Ecken (siehe 4.2.2).

### 4.2.1 Kantendetektion

Die Kantendetektion ist ein elementarer Mechanismus beim Erkennen von Mustern.

Die verwendete Kantendetektion kann in acht Richtungen (horizontale, vertikale und diagonale Richtungen) angewendet werden. Sie verfügt über die Fähigkeit, neben harten Kanten (Kanten

an zwei benachbarten Pixeln) auch weiche Kanten (Kanten an mehr als zwei benachbarten Pixeln) zu erkennen, was ohne Vorverarbeitung des Bildes (etwa durch Binarisierung) eine Notwendigkeit darstellt. Die von den benachbarten Punkten gebildete Strecke wird dabei als Kante angesehen. Als Parameter für die verwendete Kantendetektion dienen:

- Startpunkt (*init*)
- Suchrichtung (z.B. links)
- Minimale Grauwert-Differenz (z.B. 100)
- Minimales good-Verhältnis (z.B. 75 %)

Die minimale Grauwert-Differenz ist die Differenz der Grauwerte zweier Punkte (*best* und *bad*), die mindestens erreicht werden muss, um die Strecke zwischen diesen Punkten als auf einer Kante befindlich anzusehen. Im Beispiel (siehe Abb. 4.2) wird von einer minimalen Grauwert-Differenz von 100 ausgegangen. Bei Position 5 (250) angefangen nach links suchend, ist bei Erreichen der Position 3 (100) diese Punktstrecke als Kante anzusehen, da  $100 \leq 150 = 250 - 100$  ist.

Auf der als Kante bestimmten Strecke vom dunkelsten (*worst*) bis hellsten (*best*) Punkt kann ein Punkt *good* bestimmt werden, der einen Grauwert von mindestens einem bestimmten Prozentsatz (minimales good-Verhältnis) der Grauwert-Differenz von *worst* und *best* besitzt. Als Beispiel (siehe Abb. 4.2) dient ein minimales good-Verhältnis von 75 %. Bei *best* (250) angefangen nach links suchend, liegt *good* an Position 4, da  $200 \geq 187,5 = (250 - 0) * 75\% + 0$  ist.

#### 4.2.1.1 Positionen auf der Kantenstrecke

Im Algorithmus der Kantendetektion finden einige Positionen Anwendung, die im Folgenden erläutert werden. Die Positionsbestimmungen können dem Pseudo-Code der Kantendetektion 4.2.1.2 entnommen werden.

**init** Die Position, die der Kantendetektionsfunktion übergeben wurde (z.B. durch Rasterschritt bestimmt).

**start** Eine geeignete Start-Position der Kantendetektion und die erste *best*-Position.

**best** Auf der Suche nach *bad* in Suchrichtung (von *start* aus) gefundene Position mit hellstem Grauwert.

**bad** Die erste Position in Suchrichtung, deren Grauwert mindestens um die minimale Grauwert-Differenz kleiner als der von *best* ist (erfolgreiche Kantendetektion).

Die Berechnungen der folgenden Positionen sind optional, da die Kante mit Auffinden von *bad* bereits erfolgreich erkannt wurde. Sie umfassen:

**worst** Die letzte Position in Suchrichtung (von *bad* aus), deren Grauwert kleiner als der seines Suchvorgängers ist. *worst* ist der dunkelste Punkt der Kante und Voraussetzung für die Berechnung von *edge* und *good*. Im Sinne des Algorithmus ist die Kante mit *worst* erst vollständig erfasst.

**edge** Subpixelgenaue Position der Kante, errechnet anhand des gewichteten arithmetischen Mittels der Differenzen der Grauwerte von den Positionen *best* bis *worst*. *edge* kommt nur bei der Bestimmung der Kreisrandpunkte zum Einsatz, wo Genauigkeit besonders gefragt ist. Die Berechnung ist in Kapitel 4.2.1.3 zu finden.

**good** Position, die einen Grauwert besitzt, der mindestens dem minimalen good-Verhältnis zwischen den Grauwerten von *best* und *worst* entspricht. Von *worst* aus entgegen der Suchrichtung bestimmt. *good* wird statt *edge* bei der Suche nach Eckpunkten eingesetzt, da dort eine pixelgenaue Bestimmung genügt und zur Weitersuche als neue *init*-Position erforderlich ist.

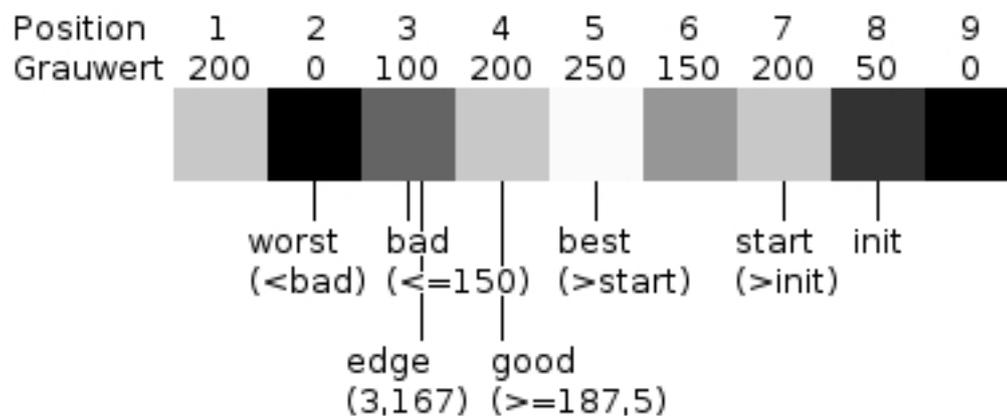


Abbildung 4.2: Beispiel einer Kantendetektion

#### 4.2.1.2 Pseudo-Code der Kantendetektion

Zur Veranschaulichung der verwendeten Kantendetektion ist nachfolgend ein beispielhafter Pseudo-Code aufgeführt, der sich auf die Suche im grafischen Beispiel (siehe Abb. 4.2) bezieht.

Suchrichtung: nach links

```

init = Position 8;
Minimale_Grauwert-Differenz = 100;
Minimales_good-Verhältnis = 75 \%;

```

```

// SUCHE NACH start
start = init;
WHILE(Grauwert(links_von_start) > Grauwert(start)) {
    start = links_von_start;
}
WHILE(Grauwert(rechts_von_start) > Grauwert(start)) {
    start = rechts_von_start;
}

// SUCHE bad UND best
best = start;
links = start;
WHILE(TRUE) {
    links = gehe_um_1_Position_nach_links();
    IF(Grauwert(links) >= Grauwert(best)) best = search;
    IF(
        Grauwert(best) - Grauwert(links) >= Minimale_Grauwert-Differenz)
    {
        bad = links;
        BREAK; // KANTE GEFUNDEN
    }
}

// SUCHE worst (optional)
worst = bad;
WHILE(Grauwert(links_von_worst) < Grauwert(worst)) {
    worst = links_von_worst;
}

// SUCHE good (optional)
good = worst;
Minimaler_Grauwert_von_good = Grauwert(worst)
+ Minimales_good-Verhältnis * ((Grauwert(best) - Grauwert(worst)));
rechts = worst;
WHILE(TRUE) {
    rechts = gehe_um_1_Position_nach_rechts();
    IF(Grauwert(rechts) >= Minimaler_Grauwert_von_good) {
        good = rechts;
        BREAK;
    }
}
}

```

### 4.2.1.3 Berechnung der subpixelgenauen Kantenposition

Die auch als *edge* bezeichnete subpixelgenaue Position der Kante wird anhand des gewichteten arithmetischen Mittels der Differenzen der Grauwerte von den Positionen *best* bis *worst* errechnet. Das gewichtete arithmetische Mittel  $\bar{x}$  wird wie folgt berechnet, wobei bei  $n$  Werten  $w$  als Gewicht und  $x$  als zu gewichtender Wert fungiert:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.1)$$

Die angeführte Berechnung (Tabelle 4.1) bezieht sich auf das Beispiel in Abbildung 4.2. Zu beachten ist, dass die Positionen gemittelt werden, die Differenz also jeweils zwischen zwei Punkten (z. B. zwischen 2 und 3 entspricht 2,5) herrscht. Die Differenzen werden vor dem arithmetischen Mittel durch Quadrieren gewichtet, um größere Differenzen stärker einfließen zu lassen.

POSITION DER DIFFERENZ (WERTE, $x$ )	DIFFERENZ	QUADRAT DER DIFFERENZ (GEWICHT, $w$ )	MIT DEM QUADRAT DER DIFFERENZ GEWICHTETE POSITION (GEWICHTETE WERTE, $w \cdot x$ )
2,5	100	10000	25000
3,5	100	10000	35000
4,5	50	2500	11250

Tabelle 4.1: Beispiel der Berechnung der subpixelgenauen Kantenposition

Summe der gewichteten Werte  $[\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i]$ : 71250

Summe des Gewichts  $[\sum_{i=1}^n w_i]$ : 22500

Gewichtetes arithmetisches Mittel der Position  $[\bar{x}]$ :  $3,1\bar{6}$

### 4.2.2 Bestimmung von Ecken

Die Bestimmung von Ecken ist neben der Kantendetektion (siehe 4.2.1) ebenfalls ein Mechanismus der Mustererkennung.

Die verwendete Bestimmung von Ecken macht sich die bereits vorgestellte Kantendetektion (siehe 4.2.1) zunutze. Sie kann ebenfalls in acht Richtungen (horizontale, vertikale und diagonale Richtungen) angewendet werden. Das Ziel ist das Auffinden einer Kante, die in einem zusammenhängenden (von Kanten umschlossenen) Bereich die am weitesten in der bestimmten Richtung liegende ist.

Zum Beispiel ist die schwarz umrandete Strecke in Abbildung 4.3 die am weitesten links liegende Kante.

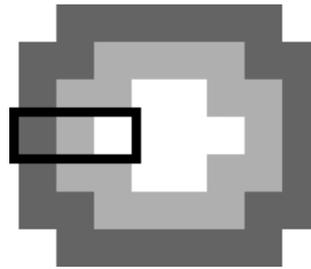


Abbildung 4.3: Eckkante

#### 4.2.2.1 Auffinden der Ecken

Das Auffinden der Ecken wird an einem kleinen Beispiel in Abbildung 4.4 demonstriert. Die Suchrichtung ist dabei nach oben, die Suche in andere Richtungen läuft vom Grundprinzip her gleich. In **Schritt 1** beginnt die Suche von einem Startpunkt aus. Zunächst wird in den Richtungen senkrecht zur Suchrichtung nach Kanten gesucht, in diesem Falle nach links und nach rechts. Als Kantenpunkte werden die *good*-Positionen der Kanten betrachtet (siehe 4.2.1). Sie Punkte von linkem bis rechtem Kantenpunkt werden in **Schritt 2** als Ausgangspunkte für die Suche nach oben genommen. Nacheinander werden sie überprüft, ob einer von ihnen zu einem weiter oben liegenden Kantenpunkt führt. Dies ist im Beispiel beim mittleren Punkt der Fall, der zuvor schon Startpunkt war. Von ihm aus wird der in **Schritt 3** markierte Punkt gefunden, von dem aus die Suche weiter geht. Die Vorgehensweise erfolgt analog zu Schritt 1, einziger Ausgangspunkt für die Suche nach oben in **Schritt 4** bleibt der markierte Punkt. Da kein weiter oben liegender Kantenpunkt gefunden wird, bildet der markierte Punkt den gefundenen Eckpunkt und seine Kantenstrecke die Eckkante.

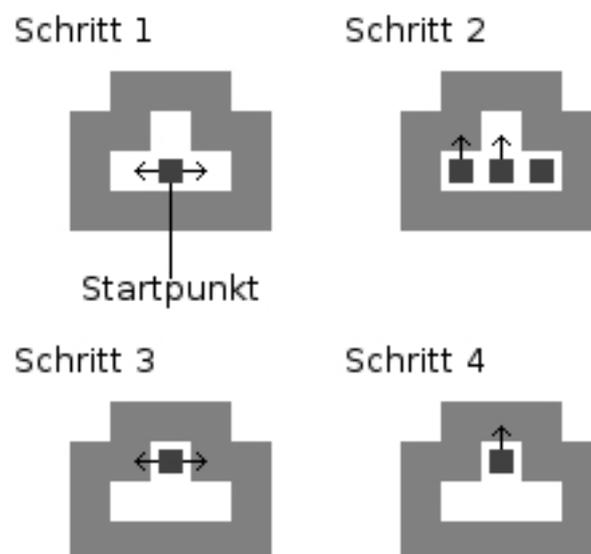


Abbildung 4.4: Auffinden der Eckkante

### 4.2.3 Erkennung der Positionsmarken

Nachdem die Mechanismen der Mustererkennung vorgestellt wurden, können sie in diesem Kapitel bei der Erkennung der Positionsmarken Anwendung finden.

#### 1. Rasterschritt

Rasterschritt (siehe Abb. 4.5) über den Teil des Bildes, in dem sich erkennbare Positionsmarken befinden können. Als erkennbar gilt jede Positionsmarke, deren Kreise auf dem zu untersuchenden Bild bestimmbare Mindestabmessungen aufweisen können. Die Weite des Rasterschritts wird bestimmt durch die kleinsten erlaubten Abmessungen des linken Streifens des umgebenden Rechtecks. Diese Abmessungen werden errechnet aus den kleinsten erlaubten Abmessungen der Kreise (siehe 4.1.3.1).

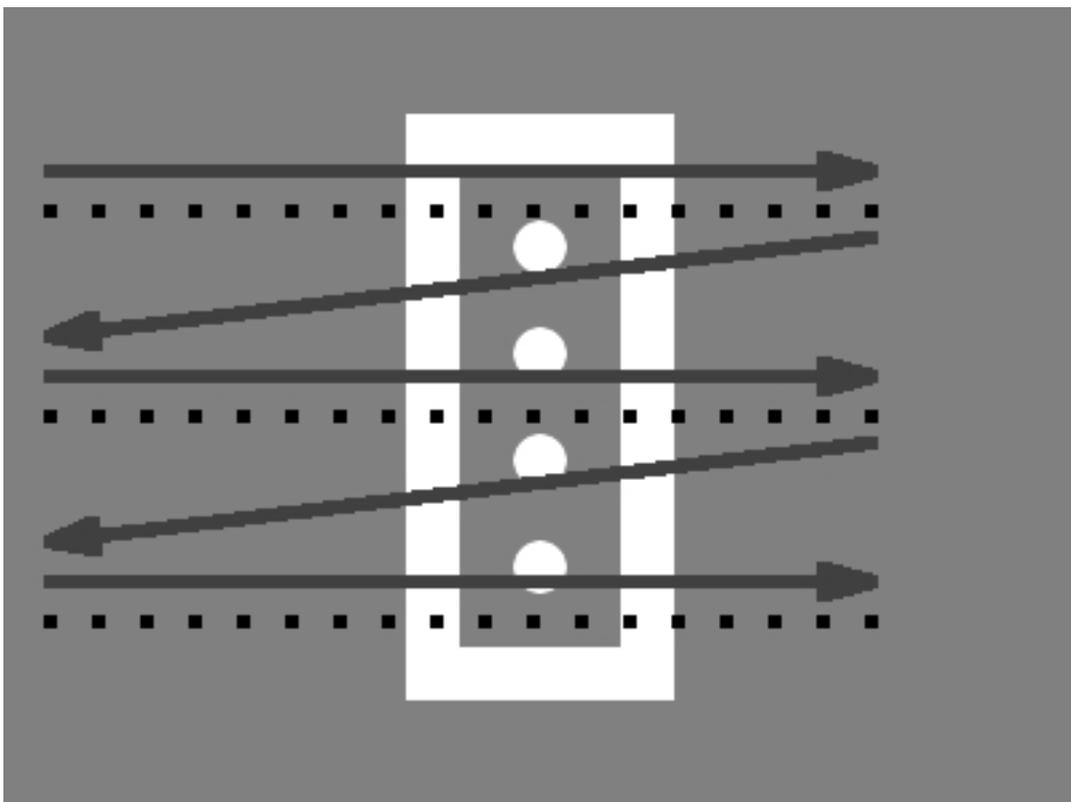


Abbildung 4.5: Beispiel eines Rasterschritts

#### 2. Grauwert-Prüfung

Jeder Punkt, auf den der Rasterschritt trifft, wird auf einen minimalen Grenzwert geprüft. Ist der Grauwert des Punktes größer oder gleich dem Grenzwert, so wird der Punkt als potentiell auf der Reflexfolie angesehen. Wird der minimale Grenzwert unterschritten, so geht es weiter im Rasterschritt.

### 3. Auffinden der Rechteck-Ecken

Nacheinander werden die Rechteck-Ecken gesucht (siehe 4.2.2), angefangen links-oben geht die Suche im Uhrzeigersinn weiter. Ist der Abstand zwischen zwei Eckpunkten zu gering, wird die Suche nach den Rechteck-Ecken abgebrochen und im Rasterschritt weiter gemacht. Gleiches geschieht, falls die Ecke links-oben bereits schon einmal gefunden wurde (siehe 4.1.3.3) oder eine gefundene Seite des Rechtecks einen nicht erlaubten Winkel besitzt.

### 4. Auffinden der Kreise

Die Suche nach den Kreisen innerhalb des Rechtecks, das zumindest als Viereck erkannt wurde, beginnt mit einem Rasterschritt über diesen Bereich. Die Weite des Schritts wird durch die kleinsten erlaubten Abmessungen der Kreise (siehe 4.1.3.1) bestimmt. Analog zu der Suche nach dem Rechteck findet auch hierbei eine Grauwert-Prüfung auf den selben Grenzwert statt. Ebenso werden nun von potentiell auf Reflexfolie befindlichen Punkten „Ecken“ gesucht. Da ein Kreis keine Ecken besitzt, ist mit „Ecke“ hierbei der in einer Richtung äußerst liegende Punkt eines Kreises gemeint (dies entspricht auch der Definition in Kapitel 4.2.2). Wieder wird zunächst in die Richtung links-oben gesucht, dann nach oben, und so weiter im Uhrzeigersinn, bis nach links. Kann eine „Ecke“ innerhalb des Rechteck-Bereichs nicht gefunden werden, so wird abgebrochen und es wird wieder im Rasterschritt nach Rechtecken gesucht. Ansonsten, oder wenn eine linke obere Kreis-„Ecke“ erneut gefunden wird, geht es mit der Suche nach weiteren Kreisen weiter. Nachdem das Rechteck durchsucht wurde findet eine Überprüfung statt, ob sich tatsächlich genau vier Kreise im Rechteck befinden.

### 5. Messung der Kreismitten

Die acht beim Auffinden der Kreise gefundenen „Ecken“ der Kreise dienen als Basis für die Berechnung der Kreismitten. Als x- und y-Werte der Kreismitten werden die arithmetischen Mittel (Katz, 2000) der x- und der y-Werte dieser „Ecken“ betrachtet. Abschließend wird geprüft, ob die Strecken zwischen den Kreismitten erlaubte Winkel besitzen. Wenn ja, so wurde eine Positionsmarke erfolgreich gefunden.

## 4.2.4 Identifikation der Positionsmarken

Die Identifikation der Positionsmarken geschieht durch Ermittlung der Doppelverhältnisse der erkannten Positionsmarken. Dazu werden die Längen der drei Strecken ( $\overline{AB}$ ,  $\overline{BC}$  und  $\overline{CD}$ ) von Kreismitte zu Kreismitte berechnet. Aus diesen Streckenlängen wird, wie im Kapitel zum mathematischen Doppelverhältnis (siehe 2.3.1) beschrieben, das Doppelverhältnis errechnet. Abschließend findet eine Prüfung in der Liste der benutzten Positionsmarken (siehe 4.1.2) statt, bei welcher Positionsmarke das Doppelverhältnis zwischen dem minimal erkannten minimal erstellten und dem maximal erkannten maximal erstellten Doppelverhältnis (siehe 3.2.1) liegt.

# 5 Testergebnisse

Zur Überprüfung der Funktionalität und Qualität des Algorithmus zur Positionsmarkenerkennung wurden Testaufnahmen von drei Positionsmarken gemacht. Die Konfiguration dieser Positionsmarken kann dem Beispiel aus Kapitel 3.4 entnommen werden, sie entsprechen den laufenden Nummern 1 bis 3. Anschließend wurden die Bilder vom Erkennungsprogramm auf Positionsmarken überprüft.

## 5.1 Testbilder

Es wurde eine Testreihe von zehn Bildern aufgenommen, die auf den folgenden Seiten vorgestellt werden.

### 5.1.1 Legende der Kenndatentabellen

Die Datentabellen der Testbilder enthalten folgende Kenngrößen:

**Erstelltes Doppelverhältnis** Das nach der Erstellung der Positionsmarke gemessene Doppelverhältnis mit einer Messgenauigkeit von geschätzten  $0,2\text{mm}$  pro Strecke.

**Betrachtungsentfernung** Die Entfernung, aus der die Positionsmarke aufgenommen wurde. Konfiguriert wurde eine Betrachtungsentfernung (siehe 3.1.3) von  $5,363\text{ m}$ , aus der die Positionsmarke identifizierbar sein soll.

**Betrachtungswinkel (vertikal)** Der Winkel von oben oder unten, aus dem die Positionsmarken fotografiert wurden. Null Grad bedeutet, dass die Kamera die Positionsmarken aus gleicher Höhe aufgenommen hat.

**Betrachtungswinkel (horizontal)** Der Winkel von links oder rechts, aus dem die Positionsmarke betrachtet wurde. Null Grad entspricht einer Sicht direkt von vorne auf die Positionsmarke.

**Gemessenes Doppelverhältnis** Das vom Erkennungsprogramm gemessene Doppelverhältnis der Positionsmarke auf dem Bild.

**Messfehler der Kreismitten** Prozentualer Messfehler der Kreismitten in Abhängigkeit vom - aus der Betrachtungsentfernung berechnetem - Kreisdurchmesser (siehe auch 3.1.7). Kapitel 5.3 beschreibt die Berechnung der Messfehler.



Abbildung 5.1: Testbild 01.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	4,13 Meter	3,18 Meter	3,13 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	19 Grad	19 Grad	17 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	0 Grad	0 Grad	0 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0346171	1,0406909	1,0489058
Messfehler der Kreismitten	0,80 Prozent	1,66 Prozent	1,22 Prozent

Tabelle 5.1: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 01.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Testbild 01.bmp stellt eine Aufnahme aus einem leichten Winkel von unten bei mittlerer Betrachtungsentfernung dar. Im Vergleich zu den übrigen Testaufnahmen ist das aufgenommene Szenario nahezu ideal für die Erkennung. Dennoch sind die Messfehler der Kreismitten stark unterschiedlich. Im Testfeld von 26 erkannten Positionsmarken rangiert die linke Positionsmarke dieser Aufnahme mit dem niedrigsten Messfehler auf Rang eins. Die mittlere Positionsmarke liegt mit einem 1,66 Prozent betragenden Fehler nur auf Platz 19 und Positionsmarke 3 nimmt einen mittleren elften Platz ein.



Abbildung 5.2: Testbild 02.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	3,15 Meter	2,76 Meter	2,99 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	25 Grad	22 Grad	18 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	45 Grad	45 Grad	45 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0348095	1,0408634	1,0488036
Messfehler der Kreismitten	1,07 Prozent	1,44 Prozent	1,33 Prozent

Tabelle 5.2: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 02.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Bei der Aufnahme in Testbild 02.bmp wurde gegenüber Testbild 01.bmp (siehe Abbildung 5.1) ein Kamerawinkel von etwa 45 Grad von links eingenommen. Es wurde ebenfalls eine mittlere Betrachtungsentfernung und ein leichter Winkel von unten gewählt. Die Messfehler der Kreismitten sind im Vergleich relativ niedrig.



Abbildung 5.3: Testbild 03.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	2,70 Meter	2,48 Meter	2,89 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	34 Grad	25 Grad	28 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	10 Grad	10 Grad	10 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	nicht erkannt	nicht erkannt	nicht erkannt
Messfehler der Kreismitten	nicht erkannt	nicht erkannt	nicht erkannt

Tabelle 5.3: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 03.bmp  
 Legende siehe Kapitel 5.1.1

Bei dieser Aufnahme mit starkem Gegenlicht und bei automatisch geregelter Belichtungszeit ist die Kontrastbildung von Pappe und Reflexfolie nicht mehr ausreichend, um eine Erkennung zu ermöglichen. Die obige Abbildung veranschaulicht, wie schwierig die Positionsmarken, gegen das Sonnenlicht fotografiert, zu erkennen sind. Die Automatik der Kamera entschied sich für eine Belichtungszeit von 1/1024 Sekunde und sorgte somit dafür, dass die Positionsmarken die Lichtquelle nicht ausreichend reflektierten.

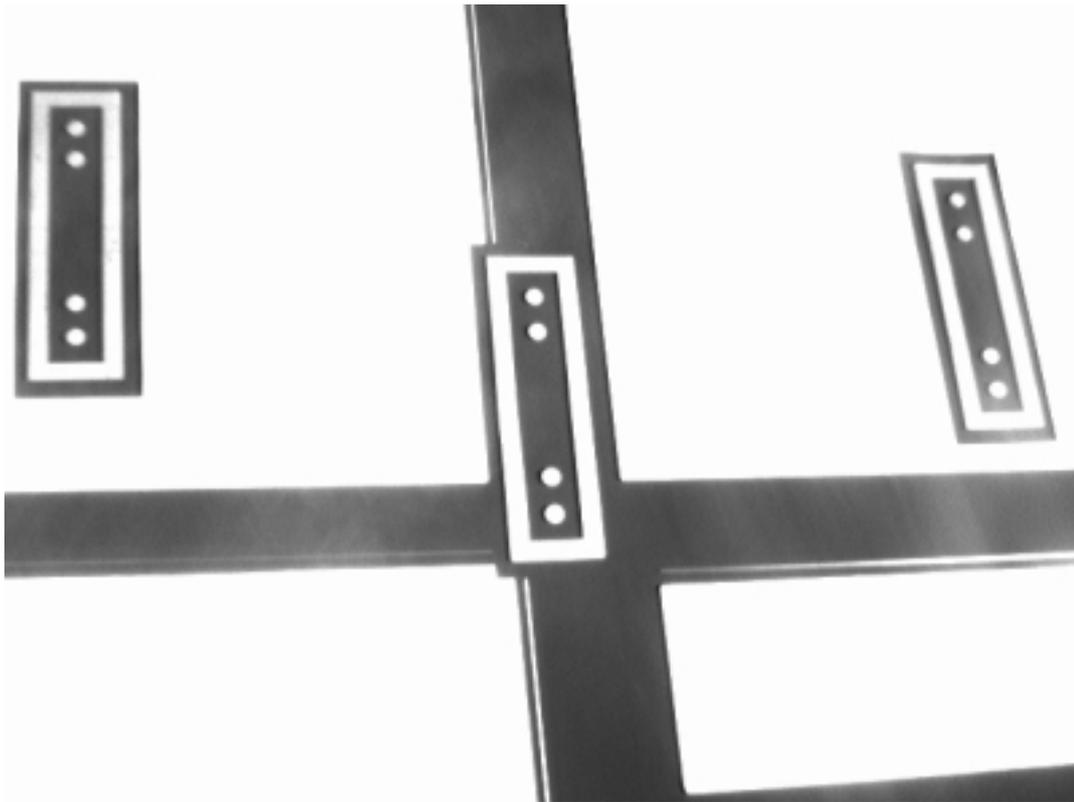


Abbildung 5.4: Testbild 04.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	2,70 Meter	2,48 Meter	2,89 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	34 Grad	25 Grad	28 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	10 Grad	10 Grad	10 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0341082	1,0410408	1,0490788
Messfehler der Kreismitten	1,52 Prozent	1,22 Prozent	1,02 Prozent

Tabelle 5.4: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 04.bmp  
 Legende siehe Kapitel 5.1.1

Die obige Testaufnahme stellt das Pendant zum Testbild 03.bmp in Abbildung 5.3 dar. In diesem Fall führte eine manuelle Einstellung der Belichtungszeit dazu, dass die Reflexion der Positionsmarken für eine Erkennung genügte. Das Testbild wurde mit einer Belichtungszeit von 1/64 Sekunde aufgenommen, was dem Maximum der verfügbaren Einstellungen entsprach. Die Messfehler der Kreismitten sind vergleichsweise niedrig bis mittelhoch (Positionsmarke 1).



Abbildung 5.5: Testbild 05.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	3,57 Meter	4,88 Meter	4,71 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	15 Grad	11 Grad	9 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	72 Grad	5 Grad	5 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0337314	1,0406584	1,0481037
Messfehler der Kreismitten	2,06 Prozent	1,70 Prozent	2,12 Prozent

Tabelle 5.5: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 05.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Die Aufnahme, die in Testbild 05.bmp zu sehen ist, wurde aus relativ hoher Entfernung zu den Positionsmarken Nummer 2 und Nummer 3 aufgenommen. Dazu kommt, dass Positionsmarke 1 aus einem schwierigen Winkel von links betrachtet wurde. Der Kontrast ist nicht sehr stark und deutlich, was sich dadurch ausdrücken lässt, dass die Positionsmarke lediglich bei einer minimalen Grauwert-Differenz (siehe 4.2.1) von 43 bis 52 erkannt wird. Die Messfehler der Kreismitten befinden sich unter den sechs höchsten im Testfeld.



Abbildung 5.6: Testbild 06.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	5,92 Meter	7,40 Meter	7,24 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	9 Grad	7 Grad	6 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	73 Grad	5 Grad	5 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	nicht erkannt	1,0415299	1,0493607
Messfehler der Kreismitten	nicht erkannt	1,00 Prozent	0,89 Prozent

Tabelle 5.6: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 06.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Gegenüber Testbild 05.bmp (siehe Abbildung 5.5) wurde die Betrachtungsentfernung weiter erhöht. Die konfigurierte maximale Erkennungsentfernung von 5,363 m wurde bei allen Positionsmarken überschritten. Während Positionsmarke Nr. 1 - erneut aus schwierigem Winkel betrachtet - nicht erkannt wurde, befinden sich die Messfehler der Kreismitten der anderen beiden Positionsmarken unter den sechs besten im Test. Die Kreise der Positionsmarken 2 und 3 fielen nicht durch das Raster (siehe 4.2.3), da ihre hohe Reflexion (23 bzw. 31 Prozent) sie größer erscheinen ließ.



Abbildung 5.7: Testbild 07.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	4,71 Meter	4,77 Meter	4,77 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	9 Grad	13 Grad	13 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	10 Grad	10 Grad	10 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0339980	1,0406984	1,0507917
Messfehler der Kreismitten	1,68 Prozent	1,65 Prozent	2,47 Prozent

Tabelle 5.7: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 07.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Die Positionsmarken in der Aufnahme in Testbild 07.bmp wurden mit einer Schräglage von ungefähr fünf Grad angebracht. Die Betrachtungsentfernung wurde wieder relativ hoch gewählt und die Positionsmarken 2 und 3 dem Schatten des Schrankes rechts neben ihnen ausgesetzt. Der Messfehler der Kreismitten bei Positionsmarke Nr. 3 ist der höchste im Testfeld gemessene. Die Messfehler bei den anderen beiden Positionsmarken liegen im mittleren Bereich.



Abbildung 5.8: Testbild 08.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	2,23 Meter	2,12 Meter	2,02 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	42 Grad	45 Grad	48 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	10 Grad	10 Grad	10 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0352300	1,0414921	1,0493216
Messfehler der Kreismitten	1,65 Prozent	0,95 Prozent	0,85 Prozent

Tabelle 5.8: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 08.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Als Veränderung gegenüber der Testaufnahme in Abbildung 5.7 wurde bei der Aufnahme in Testbild 08.bmp eine niedrige Betrachtungsentfernung eingesetzt. Die mittlere und rechte Positionsmarke befanden sich weiterhin im Schatten des hier nicht im Bild sichtbaren Schrankes. Während der Messfehler der Kreismitten bei der linken Positionsmarke weiterhin mittelhoch blieb, zählen die der im Schatten liegenden Positionsmarken zu den vier besten gemessenen.



Abbildung 5.9: Testbild 09.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	3,35 Meter	3,32 Meter	2,74 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	10 Grad	18 Grad	9 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	0 Grad	0 Grad	0 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0347454	1,0411796	1,0485866
Messfehler der Kreismitten	0,98 Prozent	1,04 Prozent	1,58 Prozent

Tabelle 5.9: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 09.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Testbild 09.bmp stellt eine Aufnahme der Positionsmarken bei mittlerer Betrachtungsentfernung dar. Trotz komplexerer Hintergrundtextur gegenüber den vorigen Testaufnahmen wurden nur die Positionsmarken als solche erkannt. Der Messfehler der Kreismitten bei Positionsmarke 3 ist mit 1,58 Prozent relativ mittelhoch, liegt aber bei den anderen beiden Positionsmarken im niedrigen Bereich.



Abbildung 5.10: Testbild 10.bmp

	Positionsmarke Nr. 1 (links)	Positionsmarke Nr. 2 (Mitte)	Positionsmarke Nr. 3 (rechts)
Erstelltes Doppelverhältnis	1,0346195	1,0413732	1,0492800
Betrachtungsentfernung	3,90 Meter	3,35 Meter	2,40 Meter
Betrachtungswinkel (vertikal)	2 Grad	10 Grad	0 Grad
Betrachtungswinkel (horizontal)	67 Grad	60 Grad	60 Grad
Gemessenes Doppelverhältnis	1,0336723	1,0420950	1,0487314
Messfehler der Kreismitten	2,14 Prozent	1,70 Prozent	1,41 Prozent

Tabelle 5.10: Kenndaten der Positionsmarken im Testbild 10.bmp

Legende siehe Kapitel 5.1.1

Bei der Aufnahme in Testbild 10.bmp wurde gegenüber Testbild 09.bmp (siehe Abbildung 5.9) ein Kamerawinkel von etwa 60 Grad von rechts eingenommen. Auch hier wurden - trotz komplizierterem Hintergrund - nur die Positionsmarken als solche erkannt. Die Messfehler der Kreismitten liegen im mittleren Bereich des Testfeldes, bis auf Positionsmarke Nr. 1, deren Fehler der zweithöchste im Test ist.

## 5.2 Ausführungszeiten

Bei der Ermittlung der Ausführungszeiten wurden bereits auf Festplatte befindliche Bilder geladen, Positionsmarken erkannt und identifiziert. Die Positionsbestimmung aus den so gewonnenen Daten selbst ist kein Teil dieser Arbeit und wurde daher nicht berücksichtigt. Die gestoppten Ausführungszeiten sind, in Millisekunden angegeben und gerundet, der Tabelle 5.11 zu entnehmen. Sie wurden auf einem Computer mit einem Pentium IV Prozessor mit 2,6 GHz Takt gemessen. Zudem ist zu bemerken, dass es sich um 8-Bit-Grauwert-Bilder mit den Abmessungen 640 x 480 Pixel handelt. Pixel-Werte bei Farbbildern müssten zunächst umgerechnet werden, zudem wäre die Ladezeit eines 24-Bit-Bildes mit gleichen Abmessungen länger. Ob ein einziges Bild in einem realen Einsatzgebiet zur Positionsbestimmung ausreicht, hängt davon ab, wie viele Positionsmarken auf dem aufgenommenen Bild erkannt wurden. Auf den verwendeten Bildern waren es einmal keine (03.bmp), einmal zwei (06.bmp) und ansonsten drei Positionsmarken, was sich auf die Ausführungszeiten auswirkt. Zudem existierte im Test keine Abbruchbedingung, die nach bestimmter Anzahl erkannter Positionsmarken eine Beendigung der Bildanalyse zur Folge gehabt hätte. Falls noch weitere Bilder von der selben Kamera zur Positionsbestimmung aufgenommen werden müssen, ist dies nur mit zusätzlichem Zeitaufwand möglich (man denke gar an ein Schwenken der Kamera).

BILDNAME	AUSFÜHRUNGSZEIT IN MILLISEKUNDEN
01.bmp	66
02.bmp	93
03.bmp	86
04.bmp	155
05.bmp	87
06.bmp	77
07.bmp	79
08.bmp	108
09.bmp	97
10.bmp	83

Tabelle 5.11: Ausführungszeiten

## 5.3 Bestimmung der Messfehler der Kreismitten

Zur Bestimmung der Messfehler der Kreise müssen die getesteten Positionsmarken zunächst ausgemessen werden, um Ungenauigkeiten bei der Erstellung zu berücksichtigen. Doch auch das Ausmessen ist nicht beliebig exakt, so dass auch hierbei eine Ungenauigkeit berücksichtigt werden muss. Unter Berücksichtigung der Genauigkeit der Ausmessung lassen sich ein minimales und ein maximales ausgemessenes Doppelverhältnis (siehe auch 3.2.1) für jede der

getesteten Positionsmarken berechnen. Die Abweichungen dieser Doppelverhältnisse vom erkannten Doppelverhältnis werden auf die Bildgröße der Kreise umgerechnet. Der größere der beiden Werte wird zur Bestimmung der Messfehler der Kreise genutzt. Der Messfehler wird als Prozentsatz bestimmt, der die Kreisgröße und die Abweichung in Relation setzt, da eine gleich große absolute Abweichung bei unterschiedlicher Kreisgröße das erkannte Doppelverhältnis unterschiedlich stark verändert. Die aus den Testergebnissen gewonnenen Messfehler können für die Erstellung zukünftiger Positionsmarken genutzt werden.

## 6 Fazit

Für die selbstständige Positionsbestimmung eines autonomen Fahrzeugs wurde ein System auf Basis der Erkennung von Positionsmarken realisiert. Zunächst wurden existierende Lösungen untersucht und ein Positionsmarkenmuster entworfen, welches als Kodierung der Positionsmarken das mathematische Doppelverhältnis nutzt. Es wurden Kriterien und ihre Wechselwirkungen dargestellt, anhand derer die Positionsmarken erkannt und identifiziert werden sollen. Resultat dieser Überlegungen ist ein Programm zur Konfiguration von Doppelverhältnis-Positionsmarken, das eine Positionsmarkenerstellung unter realistischen Aspekten ermöglicht. Für die Erkennung und Identifikation der Positionsmarken wurde ein Algorithmus auf Basis von Kantendetektion und Eckbestimmung erdacht und anschließend getestet. Für den Test wurden Positionsmarken erstellt und Aufnahmen gemacht. Der Algorithmus war in der Lage, die Testaufnahmen in Subsekundenzeit zu verarbeiten und konnte Positionsmarken aus einem großen Bereich an Betrachtungswinkeln - 60 Grad und mehr - erkennen. Die maximale Erkennungsentfernung überstieg sogar die Erwartung aus den Konfigurationskriterien. So wurden Positionsmarken mit einem Kreisdurchmesser von 25 mm aus über sieben Meter Entfernung eindeutig identifiziert. Der größte Messfehler der Kreismitten von 2,47 Prozent trat allerdings schon bei einer Weite von unter fünf Metern auf.

### 6.1 Kritik

Ungeklärt ist, ob der vorliegende Erkennungsalgorithmus eine zentimetergenaue Positionsbestimmung tatsächlich ermöglicht. Wenn nicht, sollte die Methode der Kreismittenbestimmung überdacht werden.

#### 6.1.1 Aussagekraft der Testergebnisse

Die Aufnahmereihe von zehn Testbildern im Innenbereich lässt nur bedingt Aussagen über das System zu. Die Betrachtungsentfernung hat in den Testaufnahmen - trotz Überschreitung des im Programm zur Konfiguration angegebenen Maximalwertes - die Identifizierbarkeit (noch) nicht beeinflusst. Auch die Aufnahmen aus verschiedenen Betrachtungswinkeln lassen keine präzisen Schlüsse zu. Man beachte allerdings, dass eine repräsentative Studie eine sehr große Zahl an Testaufnahmen - im Optimalfall alle Kombination der Betrachtungskriterien - erfordert.

### 6.1.2 Sichtbarkeit der Positionsmarken

Optische Systeme in realen Einsatzgebieten unterliegen situationsabhängigen Gegebenheiten, sodass eine optimale Erkennbarkeit der Positionsmarken nicht immer gewährleistet sein kann. Im Außenbereich und teilweise auch im Innenbereich (Sonneneinstrahlung durchs Fenster) kann die Witterung die Sichtbarkeit der Positionsmarken beeinträchtigen. Zudem können Positionsmarken verdeckt sein, was eine Erkennung unmöglich macht.

### 6.1.3 Rotation

Die Positionsmarken, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind nicht auf Rotationsunabhängigkeit ausgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass die Positionsmarken senkrecht angebracht werden, wobei ein Toleranzbereich an Winkeln erlaubt ist, um leichte Drehungen und perspektivische Verzerrungen zu berücksichtigen. Als positionsbestimmend wird der untere der vier Kreise angesehen. Würde eine Positionsmarke z. B. an eine Raumdecke geklebt und aus verschiedenen Richtungen betrachtet werden, so könnte das Erkennungsprogramm nicht wissen, welcher der Kreise als Position der Marke fungiert. Abhilfe könnte eine Änderung der Positionsmarken schaffen, indem die Anzahl der Kreise auf fünf erhöht und der mittlere Kreis als Markenposition angesehen würde. Entsprechend müssten auch die Programme für Konfiguration und Erkennung angepasst werden.

## 6.2 Ausblick

Um für die Zukunft genauere Erkenntnisse über das System zu erlangen ist eine umfassende, repräsentative Untersuchung notwendig. Bei den dafür nötigen Testaufnahmen könnten verschiedene Kriterien systematisch variiert werden:

- Betrachtungsentfernungen
- Aufnahmewinkel
- Lichtverhältnisse

Zum Vergleich können die Tests mit unterschiedlich konfigurierten Positionsmarken wiederholt werden.

Ebenfalls wäre eine Vergleichsstudie mit anderen Lösungen wünschenswert. Sie könnte als Entscheidungshilfe dienen, wenn es darum geht, welche Lösung für das gewählte Einsatzgebiet geeignet ist.

### 6.2.1 Erkennungsentfernungen

Die minimale Erkennungsentfernung, aus der die Positionsmarken noch ins Bild passen und die maximale Erkennungsentfernung, aus der die Positionsmarken noch identifiziert werden können, sind von der Konfiguration der Positionsmarken abhängig. Will man den Entfernungsbereich vergrößern, kann eine Lösung darin bestehen, sich einen Satz an Positionsmarken mit anderen Anforderungen an die Erkennungsentfernungen erstellen zu lassen. Diese kleineren oder größeren Positionsmarken könnten dann neben ihre Originalversionen angebracht werden. Allerdings müsste dann sichergestellt werden, welche der Positionsmarkenversionen erkannt wurde, damit die Positionsbestimmung korrekt verlaufen kann.

# Literaturverzeichnis

- [Beck 1988] BECK, Uwe: *Computer-Graphik - Bilder und Programme zu Fraktalen, Chaos und Selbstähnlichkeit*. Birkhäuser Verlag, 1988. – ISBN 3-7643-1857-0
- [Betke und Gurvits 1995] BETKE, Margrit ; GURVITS, Leonid: Mobile robot localization using landmarks. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* Bd. 2, April 1995, S. 135–142
- [Brunato und Battiti 2003] BRUNATO, M. ; BATTITI, R.: PILGRIM: A location broker and mobilityaware recommendation system. In: *Proceedings of IEEE PerCom2003*, March 2003
- [Bässmann und Besslich 1989] BÄSSMANN, Henning ; BESSLICH, Philipp W.: *Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung*. Springer-Verlag GmbH, 1989. – ISBN 0-387-50772-8
- [Hartley und Zisserman 2003] HARTLEY, Richard ; ZISSERMAN, Andrew: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. First. Cambridge University Press, 2003. – ISBN 0-521-54051-8
- [Katz 2000] KATZ, Alfred R. J.: *Image analysis and supervised learning in the automated differentiation of white blood cells from microscopic images*, RMIT, Diplomarbeit, February 2000
- [Khaleeli 1997] KHALEELI, Nikfar A.: *Ä robust robot navigation architecture using partially observable semi-Markov decision processes*, University of South Florida, Diplomarbeit, April 1997
- [Knyaz und Sibiryakov 1998] KNYAZ, V. A. ; SIBIRYAKOV, A. V.: The development of new coded targets for automated point identification and non-contact 3D surface measurements. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Bd. XXXII(5), 1998, S. 80–85
- [Lei 1990] LEI, Guo: Recognition of planar objects in 3-D space from single perspective views using cross ratio. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 6 (1990), August, Nr. 4, S. 432–437
- [Scharstein und Briggs 1999] SCHARSTEIN, D. ; BRIGGS, A.: Fast recognition of selfsimilar landmarks. In: *Workshop on Perception for Mobile Agents (in conjunction with IEEE CVPR'99)* (1999), June, S. 74–81
- [Stöcker 1999] STÖCKER, Dr. H.: *Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren*. Harri Deutsch Verlag, 1999. – ISBN 3-8171-1572-5

- [Sung Joon Ahn und Recknagel 1999] SUNG JOON AHN, W. R. ; RECKNAGEL, M.: Circular coded landmark for optical 3D-measurement and robot vision. In: *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* Bd. 2, 1999, S. 1128–1133
- [Taylor und Kriegman 1999] TAYLOR, C. ; KRIEGMAN, D.: Vision-based motion planning and exploration algorithms for mobile robots. In: *Proc. of the Workshop on Algorithmic Foundation of Robotics*, 1999

## Versicherung über Selbstständigkeit

*Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §22(4) bzw.§24(4) ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.*

Hamburg, 8. Februar 2008 Matthias Wippich