



## DIPLOMARBEIT

# Radiometrische Kalibrierung von Distanzmesskameras

Ausgeführt an den Forschungsgruppen

**Photogrammetrie und Fernerkundung**

Department für Geodäsie und Geoinformation  
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Pfeifer**

und

**Dipl.-Ing. Wilfried Karel**

als betreuender Assistent

durch

**BSc Gregor Marx**

Anton-Baumgartner-Straße 125/4/19, 1230 Wien

Wien, Dezember 2013

---

Unterschrift Student

# Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die mich durch das Studium begleitet haben und mir bei der Erstellung dieser Diplomarbeit geholfen haben.

Bei Dipl.-Ing. Wilfried Karel möchte ich mich für die fachlich Betreuung und die langen E-Mails mit Erklärungen bedanken, die mir geholfen haben, dieses Thema besser zu verstehen. Univ.-Prof. Dr. Norbert Pfeifer danke ich für die Möglichkeit, dieses Thema bearbeitet haben zu dürfen, und für die interessanten Vorlesungen während des Studiums, die mein Interesse für die Photogrammetrie geweckt haben.

Bei Prof. Dr. Geert Verhoeven vom Ludwig Boltzmann Institut möchte ich mich bedanken, dass er die Spektrometermessungen, die ein grundlegender Teil dieser Arbeit waren, durchgeführt hat.

Bei meinen Eltern möchte ich mich bedanken, dass sie mich immer unterstützt haben und mir letztendlich auch dieses Studium ermöglicht haben.

Meiner Frau Viktoria danke ich, dass sie mich immer unterstützt und motiviert hat.

# Abstract

Range Imaging Cameras (RIM) are capable of measuring distance and the amplitude simultaneously in each pixel, using the time-of-flight (TOF) of an signal. This technology combines several advantages of classical photogrammetric and remote-sensing measurement techniques, but there are also limitations. One limitation is the poor precision of the distance measurement, which is today at cm-level. An important indicator for the precision of the distance measurement is the amplitude, which is calculated from the same data as the distance. When the amplitude is calibrated, it should be possible to determine the (directional) reflectivity of the object surface. The reflectivity on the other hand can be used, as an example, for segmentation of the object space or to recognize objects.

This master thesis is dealing with the calibration of the amplitude with the help of the RIM-Camera Swissranger SR-3000. To build a calibration field, a flat surface is needed with diffuse reflection. To achieve this, five boards of the material styrodur were used, which were covered with five different colors of chalk to get different reflectivities. To get the reflectivity with high accuracy, the different colors where measured with a spectroradiometer. A control point field was fixed around the boards to determine the orientation of the camera indirect. Then it was possible to get the distance between the camera and the boards with higher precision and accuracy than with the RIM-Camera, and also to identify the boards in the captured pictures. The different steps which were necessary to create a difference model are described. This model represents the deviation between measured and calculated amplitude. Then a calibration function is determined, which describes this difference. This calibration function consists of different terms, which can be dedicated to different effects. The validation of the calibration function is made visually with different plots, these plots show the influence of the different terms.

# Kurzfassung

Distanzkameras sind in der Lage, in jedem Bildpunkt (Pixel) simultan Distanz und Amplitude aufgrund der Laufzeit eines ausgesandten Signals zu bestimmen. Diese Technologie vereint einige Vorteile von klassischen Messverfahren aus der Photogrammetrie und der Fernerkundung (z.B. Laserscanning, Auswertung von Bildern). Eine Limitierung ist die Genauigkeit der Distanzmessung, die verglichen mit anderen Geodätischen Messverfahren im Nahbereich (Zehner-Meter-Bereich) relativ niedrig ist. Ein wichtiger Indikator für die Distanzmessgenauigkeit ist die Amplitude, sie wird aus denselben Messdaten abgeleitet, aus denen auch die Distanz errechnet wird. Weiters kann bei kalibrierten Amplituden, gemeinsam mit den Distanzbeobachtungen, die (richtungsabhängige) Reflektivität der Objektoberfläche bestimmt werden. Die Reflektivität wiederum kann verwendet werden, um den Objektraum zu segmentieren bzw. um Objekte zu erkennen.

Diese Arbeit beschreibt die Kalibrierung der Amplitude anhand der Distanzkamera Swissranger 3000. Es wurde nach Materialien gesucht, die sich als Kalibriertafeln eignen, d.h. plan sind und das Licht möglichst diffus reflektieren. Um die gewünschte diffuse Reflektivität zu erreichen wurde Kreidespray verwendet. Es wurde ein Kalibrierfeld erstellt, welches aus fünf Styrodurplatten bestand, die mit unterschiedlichen Farben besprüht wurden, um unterschiedliche Reflektivitätswerte zu erhalten. Um Referenzwerte hoher Genauigkeit zu erhalten, wurden die Reflektivitäten der einzelnen Tafeln mit einem Spektroradiometer gemessen. Mittels eines, rund um die Tafeln angebrachten, Festpunktfeldes wurde die Orientierung der Kamera indirekt bestimmt. Damit war es möglich, die Objektdistanzen mit hoher Qualität abzuleiten und die Positionen der Tafeln in den Bildern eindeutig zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Schritte beschrieben, die nötig sind, um ein Differenzmodell zwischen den Soll-Amplituden und den mit der Distanzkamera gemessenen Amplituden zu erstellen. Danach wurde eine Kalibrierfunktion bestimmt, die das Differenzmodell beschreibt. Die Funktion besteht aus mehreren Termen, die verschiedenen Effekten zugeordnet werden können. Die Validierung der Kalibrierfunktion erfolgt visuell mittels Grafiken, die den Einfluss der unterschiedlichen Kalibrierterme zeigen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung . . . . .	2
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Kalibrierung . . . . .	4
2.2	Reflexion . . . . .	5
2.2.1	Gerichtete und diffuse Reflexion . . . . .	5
2.3	Lambertscher Strahler . . . . .	6
2.4	Radargleichung . . . . .	7
2.5	Distanzmessverfahren . . . . .	9
2.5.1	Impulsmessverfahren . . . . .	9
2.5.2	Phasenvergleichsverfahren . . . . .	10
2.6	Modulationsverfahren . . . . .	11
2.7	CCD/CMOS - Bildsensoren . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Distanzkameras</b>	<b>13</b>
3.1	Komponenten einer Distanzkamera . . . . .	13
3.1.1	Beleuchtungseinheit . . . . .	13
3.1.2	Objektiv . . . . .	14
3.1.3	PMD (Photonic Mixing Device) . . . . .	15
3.1.4	Sonstige Komponenten . . . . .	18
3.2	Systematische Fehlereinflüsse der Distanzmessung . . . . .	18
3.2.1	Integrationszeit . . . . .	18
3.2.2	Temperatur . . . . .	20
3.2.3	Reflektivität . . . . .	21
3.2.4	Mehrweg und Scattering . . . . .	22
3.3	Vor und Nachteil von Distanzkameras . . . . .	22
3.4	Distanzkalibrierung . . . . .	24

<b>4 Messgeräte</b>	<b>25</b>
4.1 Swissranger 3000 . . . . .	25
4.2 SVC GER 1500 . . . . .	29
<b>5 Datenaufnahme und -aufbereitung</b>	<b>31</b>
5.1 Kalibrierfeld . . . . .	31
5.1.1 Tafel für die Kalibrierung . . . . .	31
5.1.2 Farbe . . . . .	34
5.1.3 Passpunktfeld . . . . .	35
5.2 Datenaufnahme . . . . .	37
5.2.1 Swissranger SR-3000 . . . . .	37
5.2.2 Spektrometer . . . . .	39
5.3 Datenaufbereitung . . . . .	40
5.3.1 Mittelung und Berechnung von Amplitude und Distanz . . . . .	42
5.3.2 Orientierung der Bilder . . . . .	43
5.3.3 Erstellung von Masken . . . . .	45
5.3.4 Berechnung nomineller Distanzen . . . . .	45
5.3.5 Berechnung von Soll-Amplituden . . . . .	46
<b>6 Kalibrierfunktion</b>	<b>48</b>
6.1 Differenz zwischen Modell und Messwerten . . . . .	48
6.2 Gesamtkalibrierung . . . . .	48
6.3 Kalibrierterme . . . . .	55
6.3.1 Einfluss der gemessenen Amplitude . . . . .	56
6.3.2 Einfluss des radialsymmetrischen Randlichtabfalls . . . . .	57
6.3.3 Einfluss der Integrationszeit auf die Amplitude . . . . .	58
6.3.4 Einfluss der Reflektivität auf die Amplitude . . . . .	59
6.3.5 Einfluss der Distanz auf die Amplitude . . . . .	60
6.4 Parameter . . . . .	63
<b>7 Ergebnis und Ausblick</b>	<b>64</b>
7.1 Ergebnis . . . . .	64
7.2 Schlussfolgerung und Ausblick . . . . .	67
<b>A Anhang</b>	<b>68</b>
A.1 Sensorabdeckung mit den verschiedenen Farben . . . . .	68
A.2 Einfluss einzelner Terme auf die Gesamtkalibrierung abhängig von der Sensor- position . . . . .	69
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>74</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>77</b>

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>78</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>79</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Unter den Begriff „Distanzkamera“ fallen jene Messsysteme, welche die Objektdistanzen in jedem Pixel, simultan für ein Bild und mittels Laufzeitverfahren, ermitteln. In Abb.1.1 ist das Grundprinzip einer TOF (Time of flight)-Kamera ersichtlich. Durch einen Sensor, der auf dem PMD (Photonic Mixing Device)-Prinzip (Kapitel 3.1.3) beruht und nur wenige  $\mu m$  groß ist, ist es möglich, Phasenwinkel mit ausreichend hoher Genauigkeit zu bestimmen und daraus Distanzen abzuleiten.

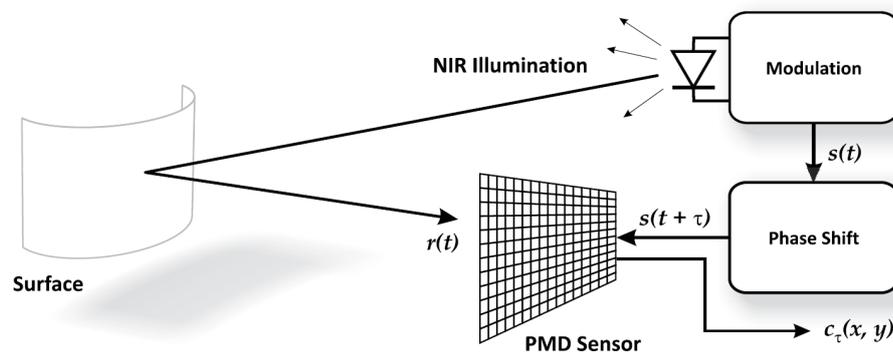


Abbildung 1.1: Messprinzip einer TOF-Kamera. Es wird ein amplitudenmoduliertes Lichtsignal ausgesendet. Dieses Signal wird am Objekt reflektiert und vom Sensor phasenverschoben empfangen. Aus der Phasenverschiebung kann die Distanz zum Objekt abgeleitet werden. [Lindner (2010)]

Unter Kalibrierung versteht man die Ermittlung der Abweichung der (mit einem Messgerät) gemessenen Größe gegenüber der wahren Größe, wobei die wahre Größe mit übergeordneter Genauigkeit bekannt sein muss. Radiometrie ist die Wissenschaft der Messung von elektromagnetischer Strahlung. Distanzmesskameras beobachten zusätzlich zum Phasenwinkel des reflektierten Signals auch dessen Amplitude, welche die Stärke der rückgestreuten Strahlung repräsentiert, d.h. radiometrische Kalibrierung ist hier die Kalibrierung der Amplitudenbeobachtungen einer Distanzkamera.

## 1.1 Zielsetzung

Distanzkameras werden inzwischen in verschiedensten Anwendungsbereichen wie Gestensteuerung, Robotik, Industrieanlagen und vielen anderen Gebieten erfolgreich eingesetzt. Um diese Technologie nun auch für die Geodäsie interessanter zu machen, muss die Genauigkeit der Distanzmessung, die zur Zeit im *cm*-Bereich liegt, gesteigert werden. Die Amplitude ist dabei ein wesentlicher Indikator für die Präzision der Distanzmessung. Eine weitere wichtige Anwendung ergibt sich bei kalibrierten Amplituden. Man kann mit ihnen, gemeinsam mit den Distanzbeobachtungen, die (richtungsabhängige) Reflektivität der Objektoberfläche bestimmen. Die Reflektivität wiederum kann z.B. verwendet werden, um den Objektraum zu segmentieren bzw. um Objekte zu erkennen.

Ziel dieser Arbeit ist es die Amplituden zu kalibrieren. Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Amplitude und damit auch auf die Distanzmessung, ist die Reflektivität der Oberfläche, die aufgenommen werden soll. Um diesen Einfluss beobachten zu können, wurden verschiedene Oberflächen gesucht, die möglichst diffus reflektieren. Um die Reflektivitäten dieser verschiedenen Farben möglichst genau zu bestimmen ist eine Spektrometermessung nötig. Mittels dieser und anderer Informationen kann ein Modell erstellt werden, dessen Parameter durch eine Ausgleichung bestimmt werden. Um die Datenaufbereitung für die Kalibrierung zu vereinfachen, wurden ebene Objektoberflächen aufgenommen. Dadurch können die Objektdistanzen und die Inzidenzwinkel leicht abgeleitet werden. Letztendlich soll eine Kalibrierfunktion gefunden werden, die die Differenzen zwischen Realität und Modell beschreibt.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist in mehrere Teile gegliedert.

### **Kapitel 1 - Einleitung**

Einleitung und Zielsetzung dieser Arbeit.

### **Kapitel 2 - Grundlagen**

Dieses Kapitel ist ein Grundlagenkapitel, in dem auf die verschiedenen Größen, Verfahren und Themen näher eingegangen wird, die in dieser Arbeit relevant sind. Ein wichtiger Teil sind hier die physikalischen Größen wie Reflexion, Radargleichung und Lambertscher Strahler, da sie ein Kernthema dieser Arbeit sind. Es wird aber auch auf Signallaufzeitmessverfahren zur Bestimmung von Distanzen und Modulationsverfahren eingegangen.

### **Kapitel 3 - Distanzkameras**

In diesem Kapitel geht es allgemein um Distanzkameras. Es wird näher auf die einzelnen relevanten Komponenten wie Beleuchtungseinheit, Objektiv und Sensor eingegangen und dabei auch der Messprozess im einzelnen Pixel beschrieben. Hierzu gehört auch, wie aus den rohen Messdaten die interessierenden Ausgabegrößen wie Distanz und Amplitude berechnet werden. Weiters werden noch verschiedene systematische Fehlereinflüsse beschrieben, die auf Distanzbeobachtungen, und damit sehr wahrscheinlich auch auf Amplitudenbeobachtungen von Distanzkameras wirken.

### **Kapitel 4 - Messgeräte**

Dieses Kapitel befasst sich mit den zwei verwendeten Messgeräten (Distanzkamera und Spektrometer), den technischen Daten der Geräte, ihrer Bedienung und ihren Einstellmöglichkeiten.

### **Kapitel 5 - Datenaufnahme und -aufbereitung**

Hier wird der praktische Teil der Arbeit beschrieben: was war die Ausgangssituation, was wurde im Vorfeld geplant (Kalibrierfeld, Passpunktfeld) und wie wurden die Daten aufgenommen. Die Berechnung wurde der Übersichtlichkeit halber auf mehrere Teilschritte aufgeteilt. Diese Einzelschritte wie Datenmittelung, Orientierung der Bilder und Modellerstellung werden erläutert.

### **Kapitel 6 - Kalibrierfunktion**

In diesem Teil der Arbeit wird die verwendete Kalibrierfunktion beschrieben. Die Gesamtfunktion setzt sich aus mehreren Einzelfunktionen zusammen, die bestimmten Effekten zugeordnet werden. Hier wird die Validierung durchgeführt, d.h. es wird visualisiert, wie sich die einzelnen Funktionen auf die Gesamtfunktion auswirken.

### **Kapitel 7 - Ergebnis und Ausblick**

Um die Qualität der Kalibrierung zu überprüfen, wurde ein Bild einer Testszene aufgenommen. An dieses Bild wird die Kalibrierung angebracht und verglichen, wie sich die Amplituden nach der Kalibrierung verändert haben.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Kalibrierung

Man kann zwei Arten der Kalibrierung unterscheiden:

- Komponentenkabrierung
- Systemkalibrierung

Bei der Komponentenkabrierung wird das Verhalten der einzelnen Kamerakomponenten, wie LED (Light-Emitting Diode), Sensor, Optik, usw. untersucht und aufgeschlüsselt, mit dem Ziel, das Gerät konstruktiv zu verbessern. Diese Art der Kalibrierung wird meist vom Hersteller durchgeführt, da das Gerät dafür im Allgemeinen zerlegt werden muss, um Beobachtungen für die einzelnen Komponenten zu erhalten und sie gezielt verbessern zu können. Nachteil hierbei ist, dass man zwar die untersuchten Komponenten gut kennt und kalibrieren kann, es aber immer noch verbleibende, nicht berücksichtigte Fehlerquellen des Gesamtsystems geben kann. Aus diesem Grund ist auch bei der Komponentenkabrierung eine anschließende Systemkalibrierung empfehlenswert.

Bei der Systemkalibrierung schaut man sich nicht die einzelnen Komponenten an, sondern das Gesamtsystem. Bei dieser Art der Kalibrierung muss an der Kamera nichts verändert werden. Ziel hierbei ist es, die Messdaten zu verbessern. Dazu vergleicht man Messdaten der Kamera mit Daten, die aus einem Modell stammen.

Die Differenz zwischen Realität und Modell kann mathematisch, z.B. mittels Polynomen, beschrieben werden. Je besser das Modell der Realität entspricht, desto besser ist die Qualität der Kalibrierung. Für Amplitudenmessungen von Distanzkameras kann das Modell aus der Radargleichung abgeleitet werden.

## 2.2 Reflexion

Wenn elektromagnetischer Strahlungsfluss  $\Phi_0$  auf eine Grenzfläche von zwei Medien *I* und *II* mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften trifft, dann kann  $\Phi_0$

- in das Medium *I* zurückgeworfen werden (Reflexion  $\Phi_r$ )
- in das Medium *II* eindringen (Absorption  $\Phi_a$ )
- das Medium *II* durchdringen (Transmission  $\Phi_t$ )

In Abb.2.1 ist der Strahlungsfluss grafisch dargestellt. Die Energiebilanz ist immer eine Kombination aus Reflexion, Absorption und Transmission ( $\Phi_0 = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t$ ).

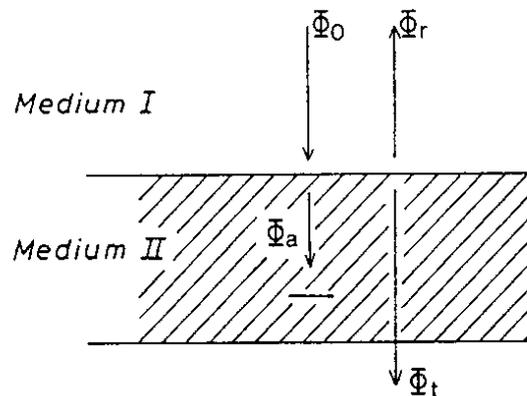


Abbildung 2.1: Strahlungsfluss an einer Grenzfläche von zwei Medien. [Wagner (2007)]

Die Definitionen von Reflexionsvermögen, Absorptionsvermögen und Transmissionsvermögen sind in den Gleichungen (2.1), (2.2) und (2.3) dargestellt [Wagner (2007)].

$$\text{Reflexionsvermögen} \quad \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} \quad (2.1)$$

$$\text{Absorptionsvermögen} \quad \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_0} \quad (2.2)$$

$$\text{Transmissionsvermögen} \quad \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_0} \quad (2.3)$$

### 2.2.1 Gerichtete und diffuse Reflexion

Je nach Richtungsverteilung der reflektierten Strahlung unterscheidet man zwischen gerichteter und diffuser Reflexion (Abb.2.2). Reflexionen an rauen Oberflächen sind diffus, an

glatten Oberflächen gerichtet. Ob eine Fläche glatt oder rau ist, ist allerdings abhängig von der Wellenlänge. Mittels des „Rayleigh-Kriteriums“ ist eine quantitative Charakterisierung der Rauigkeit möglich: Eine Oberfläche ist für Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$ , die unter dem Winkel  $\theta_e$  zwischen Flächennormaler und Strahlungsrichtung einfällt, glatt, wenn (2.4) gilt:

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_e} \quad (2.4)$$

mit:  $h$  = Standardabweichung der Oberflächenunebenheit

$\lambda$  = Wellenlänge

$\theta_e$  = Winkel zwischen Flächennormaler und Strahlungsrichtung

In Abb.2.2 ist rechts die Oberflächenunebenheit grafisch dargestellt.

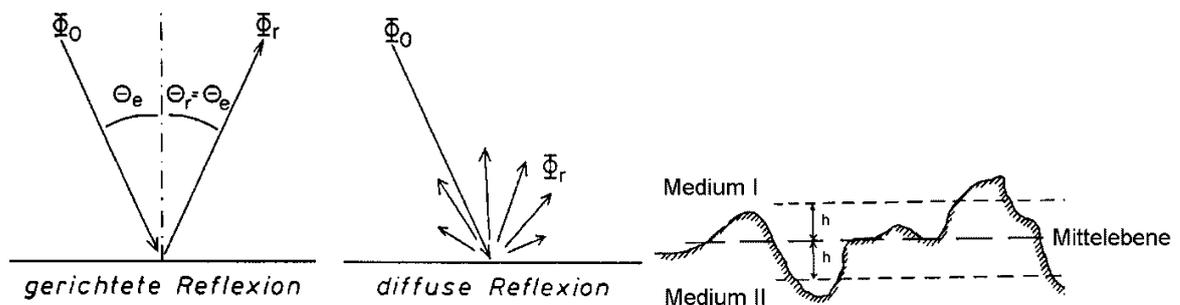


Abbildung 2.2: Gerichtetete und diffuse Reflexion, Oberflächenunebenheit.  $\Phi_0$  ist der Strahlungsfluss, der auf eine Grenzfläche zweier Medien trifft. *Links*: Bei der gerichteten Reflexion ist der Einfallswinkel  $\theta_e$  gleich dem Winkel  $\theta_r$  des reflektierten Strahlungsflusses  $\Phi_r$ . *Mitte*: Bei der diffusen Reflexion existiert kein solch ausgezeichneter Winkel, die Reflexion geht ungleichmäßig in alle Richtungen zurück in das Medium I. *Rechts*: Veranschaulichung der Oberflächenunebenheit mit  $h$  als Standardabweichung. [Wagner (2007)]

## 2.3 Lambertscher Strahler

Die Strahldichte  $L$  ist definiert durch (2.5).  $dF$  ist dabei ein (differentielles) Flächenelement und  $d\Omega$  ein (differentielles) Raumwinkelement (Grafik 2.3 links). Das Raumwinkelement schließt mit der Flächennormalen  $\vec{n}$  von  $dF$  den Winkel  $\theta$  ein. Der auf das Flächen- und Raumwinkelement bezogene (differentielle) Strahlungsfluss  $d^2\Phi$  ist die Strahldichte [Wagner (2007)].

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta \cdot dF \cdot d\Omega} \quad [Wm^2sr^{-1}] \quad (2.5)$$

Lambertscher Strahler (auch Lambertscher Streuer) wird eine Fläche genannt, die Strahlung mit richtungsunabhängiger Strahldichte  $L$  reflektiert, d.h. bei konstantem Flä-

chenelement  $dF$  und konstantem Raumwinkel  $d\omega$  ist der Strahlungsfluss proportional zu  $\cos(\theta)$  (Grafik 2.3 rechts). Die Strahldichte ist dann in alle Richtungen gleich, d.h. unabhängig vom Betrachtungswinkel erscheint die Fläche immer gleich hell. Für Aufnahmen mit einer Distanzkamera bedeutet das, dass wenn ein Objekt ein Lambert'scher Strahler ist, dann ist die beobachtete Amplitude unabhängig von der Neigung der Kamera relativ zur Flächennormalen immer gleich.

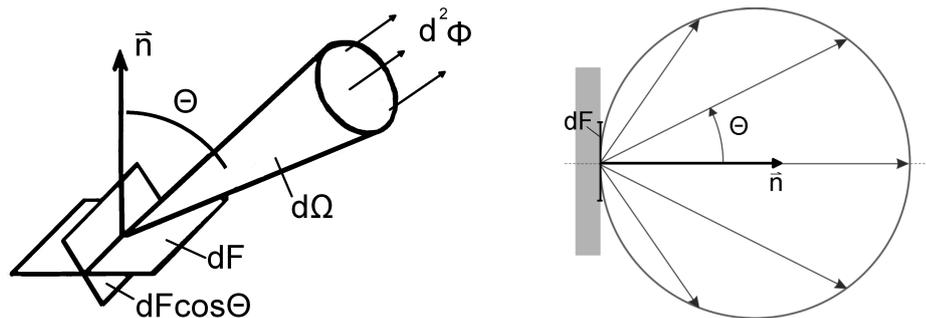


Abbildung 2.3: Strahldichte und Lambert'scher Strahler. *Links:* Größen der Strahldichte  $L$ . [Wagner (2007)] *Rechts:* Lambert'scher Strahler. Dargestellt ist hier die Winkelabhängigkeit des reflektierten Strahlungsflusses  $d^2\Phi$ . Die Längen der Vektoren repräsentieren die Stärke des reflektierten Strahlungsflusses in Richtung  $\theta$ .  $\theta$  ist der Winkel zwischen Flächennormaler  $\vec{n}$  und reflektiertem Strahlungsfluss. Die Einhüllende der Vektoren hat die Form eines Kreises, d.h. das Flächenelement erscheint aus allen Beobachtungsrichtungen gleich hell.

Spectralon ist ein Material aus Thermoplastik, das einem Lambert'schen Strahler am nächsten kommt. Je nach Materialmischung im Herstellungsprozess hat es eine Reflektivität bis  $> 99\%$  im sichtbaren Licht und im nahen Infrarot (NIR). Das Material ist daher ideal um es als Referenz für radiometrische Kalibrierungen von Messgeräten, die in diesem Teil des elektromagnetischen Spektrums arbeiten, zu verwenden. Andere Materialien, die sehr gut diffus streuen, sind z.B. mattes Papier, das im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts und des NIR rau ist, oder Milchglas, bei dem die diffuse Rückstreuung im inneren des Glases passiert.

## 2.4 Radargleichung

Wird ein ausgesendetes Signal reflektiert und von einem Empfänger registriert, dann gibt es eine Reihe von Größen, welche die empfangene Intensität beeinflussen. Diese Größen können mittels der Radargleichung erfasst werden. In Abb.2.4 sind diese Einflussgrößen dargestellt. Die Sende- und Empfangseinrichtung sind in dieser Abbildung der Übersichtlichkeit halber an unterschiedlichen Orten eingezeichnet, bei Distanzmesskameras befinden sie sich aber näherungsweise am selben Ort. Es wird von der Beleuchtungseinrichtung der Kamera, die vereinfacht als punktförmig angenommen werden kann, eine Trägerwelle mit einem bestimmten Öffnungswinkel  $\beta$  ausgesandt. Durch diesen Öffnungswinkel wird die ausgesandte

Leistung auf einen Raumkegel aufgeteilt. Die auf dem Objekt auftreffende Leistung ist je nach Öffnungswinkel auf einen mehr oder weniger großen Bereich verteilt. Die an einer Oberfläche reflektierte Trägerwelle wird wieder auf einen Raumkegel  $\Omega$  aufgeteilt, dessen Öffnungswinkel von der Oberflächenrauigkeit abhängt (gerichtete oder diffuse Reflexion). Daher kommt je nach Reflektivität des Objektes nur ein Bruchteil der abgestrahlten Leistung zum Sensor. Die Radargleichung lässt sich in Sensor- und Objektgrößen teilen. Formel (2.6) beschreibt die Einflussgrößen des Sensors, Formel (2.7) die Größen des Streuobjektes unter der Annahme eines punktförmigen Streuers. Diese Beziehung verdeutlicht, dass die Rückstreuereigenschaften eines Streukörpers von seiner Größe, seiner Reflektivität und dem Richtungsverhalten der Streuung abhängen [Wagner (2007)].

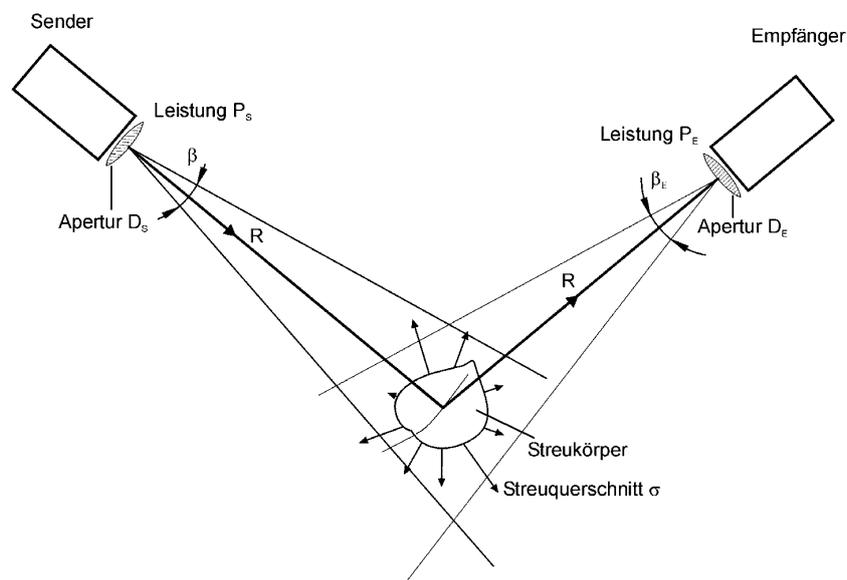


Abbildung 2.4: Größen der Radargleichung. [Wagner *et al.* (2003)]

$$P_E = \frac{P_S D_E^2}{4\pi R^4 \beta^2} \sigma \quad (2.6)$$

mit:  $P_E$  = Empfangene Leistung

$P_S$  = Gesendete Leistung

$D_E$  = Durchmesser der Empfangsapertur  $\hat{=}$  Öffnungsweite des Objektivs

$R$  = Distanz Kamera - Objekt

$\beta$  = Öffnungswinkel der Sendeeinrichtung

$\sigma$  = Rückstreuquerschnitt

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} dA \varrho \quad [m^2] \quad (2.7)$$

mit:  $\Omega$  = Raumwinkel der am Objekt reflektierten Leistung  
 $dA$  = Fläche des Streukörpers  
 $\varrho$  = Reflektivität

Aus dieser Formel lässt sich ableiten, dass bei flächenhaften Streuern die am Empfänger eintreffende Leistung, und damit auch die Amplitude des Nutzsignals, mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt [Jaakkola *et al.* (2008)]. Diese Information wird in weiterer Folge für die Modellierung verwendet.

## 2.5 Distanzmessverfahren

Wie bei vielen geodätischen Verfahren der Distanzmessung gibt es auch bei Distanzka-  
 meras zwei Distanzmessverfahren, die zum Einsatz kommen. Das sind zum einen das Im-  
 pulsmessverfahren, zum anderen das Phasenvergleichsverfahren. Bei beiden wird die Distanz  
 über die Laufzeit eines Signals bestimmt, beim ersten Verfahren direkt über eine Zeitmessein-  
 richtung, bei zweiten indirekt über die Phasenverschiebung.

### 2.5.1 Impulsmessverfahren

Beim Impulsmessverfahren wird ein Signal (Licht) emittiert, dessen Laufzeit, vom Ab-  
 strahlen über die Reflexion am Objekt bis zur Detektion am Sensor, direkt über Zeitmessung  
 ermittelt wird (Abb.2.5).

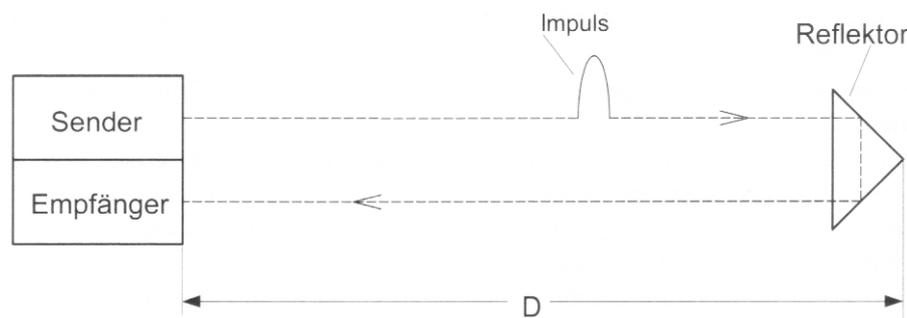


Abbildung 2.5: Impulsmessverfahren: Es wird ein Impuls ausgesendet, der die Messstrecke zwei Mal durchläuft und dessen Laufzeit gemessen wird. [Joeckel *et al.* (2008)]

Die Distanz kann nun über die gemessene Laufzeit mit folgender Formel errechnet werden:

$$D = \frac{c_0}{2n} * t \quad (2.8)$$

mit:  $D$  = Distanz

$c_0$  = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = 299 792 458 m/s

$n$  = Brechzahl des Mediums

$t$  = Signallaufzeit

Wenn man statt der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$  die Lichtgeschwindigkeit im Medium  $c = \frac{c_0}{n}$  einsetzt, erhält man für die Distanz

$$D = \frac{c * t}{2} \quad (2.9)$$

Die Genauigkeit dieses Verfahrens hängt hauptsächlich von der Genauigkeit der Zeitmess-einrichtung ab. Um in den  $\pm 1\text{-mm}$ -Bereich zu kommen, muss die Laufzeit auf  $0,007\text{ ns}$  genau bestimmt werden [Joeckel *et al.* (2008)].

## 2.5.2 Phasenvergleichsverfahren

Im Gegensatz zum Impulsmessverfahren, wo ein kurzer Impuls abgesendet wird, wird bei diesem Verfahren das Signal kontinuierlich ausgestrahlt (Grafik 2.6). Es wird einer Trägerwelle ein sinusförmiges Signal aufmoduliert, dessen Wellenlänge als Maßeinheit für die Streckenmessung dient.

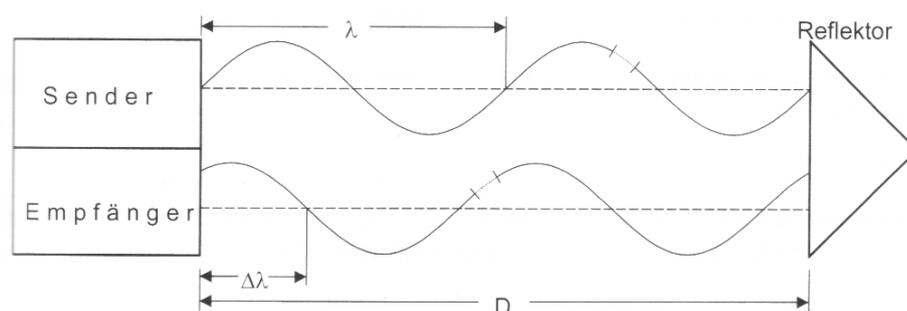


Abbildung 2.6: Phasenvergleichsverfahren: Es wird ein kontinuierliches Signal ausgesendet und das Phasenreststück  $\Delta\lambda$  bestimmt. [Joeckel *et al.* (2008)]

Eine fest vorgegebene Modulationsfrequenz  $f$  legt eine Wellenlänge  $\lambda$  fest (Formel (2.10)). Wird wegen der begrenzten Auflösung der Phasenwinkelmessung eine maximale Wellenlänge  $\lambda$  definiert (Eindeutigkeitsbereich), muss die Modulationsfrequenz  $f$  entsprechend gewählt werden.

$$\lambda * f = c \quad (2.10)$$

Die durchlaufene Strecke setzt sich aus einem Wellenreststück  $\Delta\lambda$  und dem Vielfachen  $N$  der Modulationswellenlänge  $\lambda$  zusammen:

$$2 * D = N * \lambda + \Delta\lambda \quad (2.11)$$

Eine Möglichkeit,  $N$  zu bestimmen, ist die Messung in zwei Teile zu zerlegen. Der erste Teil ist eine Grobmessung, bei der eine Wellenlänge gewählt wird, die mindestens der doppelten zu messenden Strecke ( $2 * D$ ) entspricht. Damit kann man die Mehrdeutigkeit  $N$  lösen. Der zweite Teil sind zumeist mehrere Feinmessungen (mindestens aber eine), wobei die Frequenz  $f$  schrittweise erhöht wird. Damit wird die Messgenauigkeit erhöht.

Falls der Sensor nicht in der Lage ist, die Frequenz  $f$  zu ändern und somit  $N$  zu bestimmen, beschränkt sich der Eindeutigkeitsbereich auf (2.12):

$$D = \frac{1}{2} * \frac{c}{f} \quad (2.12)$$

Das ist bei Distanzkameras der Fall [Joeckel *et al.* (2008)].

## 2.6 Modulationsverfahren

Um nun die Messung mittels der in Kapitel 2.5 erläuterten Messverfahren möglich zu machen, gibt es verschiedene Modulationsverfahren. Modulation ist ein Vorgang, bei dem eine Trägerwelle durch ein Nutzsignal verändert (moduliert) wird. Das Signal kann so übertragen werden, und durch den Demodulationsprozess wird das Nutzsignal am Ziel wieder von der Trägerwelle getrennt. Die wichtigsten Modulationsverfahren sind Frequenzmodulation, Phasenmodulation und Amplitudenmodulation. Es wird in dieser Arbeit aber nur auf die Letzte genauer eingegangen, da nur dieses Verfahren bei Distanzkameras zur Anwendung kommt.

Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des Trägersignals verändert. Es kann zwischen zwei Arten unterschieden werden:

- Pulsierende Modulation: Es werden kurze Lichtblitze erzeugt, zwischen denen längere Pausen liegen. Die Qualität des Signals hängt davon ab, wie schnell der Übergang von eingeschaltetem zu ausgeschaltetem Zustand gelingt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die höhere Augensicherheit, da die Retina zwischen den sehr kurzen Lichtblitzen abkühlen kann. Dadurch sind höhere Pulsamplituden möglich, was die Messdistanz erhöht.

Die höhere Pulsamplitude bringt auch Vorteile bei stärkerer Hintergrundbeleuchtung [Karel (2008b)].

- Kontinuierliche (Continuous wave-CW) Modulation: Das Messsignal wird kontinuierlich ausgesandt (sinusoidale Modulation). Die Amplitude, die der Trägerwelle aufmoduliert wird, variiert symmetrisch um einen mittleren Wert. Vorteil der CW- Modulation ist ihre geringe Anforderung an die Elektronik und bei Messfrequenzen bis zu 20-30MHz können statt Lasern Leuchtdioden (LED) verwendet werden. Das bringt einen großen Preisvorteil bei der Produktion [Karel (2008b)].

## 2.7 CCD/CMOS - Bildsensoren

Halbleitersensoren wie CCD (Charge-coupled Device) oder CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) arbeiten im Grunde alle nach dem gleichen Funktionsprinzip, dem inneren Photoeffekt. Durch einfallendes Licht (Photonenstrom) werden im Halbleiterkristall freie Elektronen erzeugt. Diese Elektronen (Ladungen) werden während der Integrations- bzw. Belichtungszeit in dem sogenannten Potenzialtopf gesammelt. Nach Ende der Integrationszeit wird die gesammelte Ladungsmenge in eine proportionale Spannung verstärkt, die mittels eines Analog-Digital-Wandlers in einen numerischen Wert umgesetzt werden kann. Einer der Hauptunterschiede zwischen CCD und CMOS ist die Art, wie die Ladungen der einzelnen Pixel ausgelesen werden. CCD-Sensoren haben nur einen Ladungsverstärker für den ganzen Sensor, zu dem die Ladungen der einzelnen Pixel mittels Transportregister verschoben werden müssen. CMOS-Sensoren dagegen haben für jedes Pixel einen Ladungsverstärker, der schon im Pixelelement die erzeugten Ladungen in Spannungen umwandeln kann. Deshalb werden CMOS-Sensoren auch Active Pixel Sensoren (APS) genannt. Auf CMOS-Sensoren können neben dem Ladungsverstärker auch noch andere Schaltungen untergebracht werden, was allerdings auf Kosten der lichtempfindlichen Fläche des Sensors geht [Demant *et al.* (2011)].

Verglichen mit der CMOS-Technik weist die CCD-Technik ein geringes Messrauschen und eine hohe Chipsensitivität auf, die CMOS-Struktur erlaubt das separate Ansprechen und Auslesen eines jeden Pixels, was zu einer geringeren Anfälligkeit für Blooming-Effekte (Überlauf von Photonen eines gesättigten Pixels in die benachbarten Pixel) führt.

# Kapitel 3

## Distanzkameras

In diesem Kapitel sollen die Vor- und Nachteile von Distanzkameras erläutert, die wichtigsten Komponenten näher beschrieben und auf Fehlereinflüsse eingegangen werden. Andere Bezeichnungen für Distanzkameras sind „RIM-Kameras“ (Range Imaging), da mittels der Distanzinformationen dreidimensionale Bilder erstellt werden können, oder „TOF-Kameras“ (Time of Flight) da die Distanzen über direkte oder indirekte Messung von Laufzeiten bestimmt werden.

### 3.1 Komponenten einer Distanzkamera

Distanzkameras bestehen aus mehreren Komponenten, die alle gewisse Fehler produzieren. In diesem Kapitel soll näher auf diese Komponenten eingegangen werden. Da RIM ein aktives Messverfahren ist, haben diese Kameras eine Beleuchtungseinrichtung um ein Signal abzustrahlen. Weiters besitzt sie eine Empfangseinrichtung die aus Objektiv, optischen Filter und Sensor besteht, um das ausgestrahlte Signal wieder zu empfangen. In Abb.3.1 ist ein Blockdiagramm einer Distanzkamera dargestellt.

#### 3.1.1 Beleuchtungseinheit

Wie in Kapitel 2.6 bereits erwähnt, werden die preislich günstigeren LED's verwendet um ein moduliertes Signal auszusenden. Obwohl sich der PMD-Mischprozess (Photonic Mixing Device) (Kap.3.1.3) im sichtbaren Licht bei  $600\text{ nm}$  deutlich effektiver gestalten würde [Schneider (2003)], werden meist Wellenlängen im optisch nicht sichtbaren Bereich des nahen Infrarot gewählt, da die Kameras in vielen Bereichen sonst nicht eingesetzt werden könnten. Die Beleuchtungseinrichtung sollte möglichst nahe um die Empfangseinrichtung angeordnet sein, um eine homogene Ausleuchtung der Szene zu gewährleisten und Abschattungen zu verhindern. Die hohe Anzahl an LED's (bei der SR-3000 sind es 55 Stück) ist nötig, da sich dadurch Inhomogenitäten einzelner LED's herausmitteln lassen und man ein beinahe

sinusoidales Signal erhält [Zachhuber (2011)].

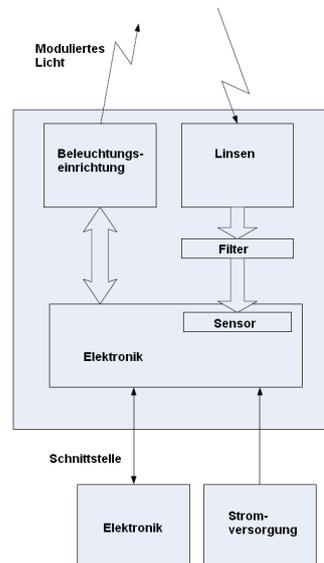


Abbildung 3.1: Blockdiagramm einer Distanzkamera. [nach Swisranger (2006)]

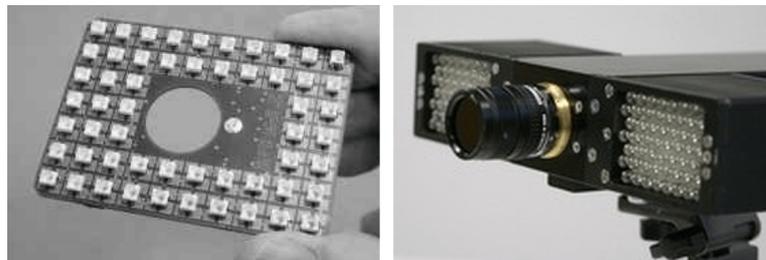


Abbildung 3.2: Beleuchtungseinrichtung von Distanzkameras. *Links*: Beleuchtungseinheit der SR-3000 im ausgebauten Zustand. [Oggier *et al.* (2005)] *Rechts*: PMD Vision 3k-S: bei dieser Kamera ist die Beleuchtungseinrichtung links und rechts der Kamera angebracht. [PMD-Vision (2013)]

### 3.1.2 Objektiv

Für Distanzkameras werden grundsätzlich dieselben Optiken verwendet, die auch in der herkömmlichen 2D-Photographie bzw. Videoaufzeichnung eingesetzt werden. Fehler der Optik wie Vignettierung, Verzeichnung und ähnliches wirken sich ebenso wie bei herkömmlichen Kameras aus. Einige Kameras haben auswechselbare Optiken, das ist von Vorteil wenn man das Standardobjektiv gegen ein hochwertigeres austauschen will, bzw. wenn man die Brennweite ändern möchte. Die Änderung der Brennweite wäre vor allem interessant, wenn man gleichzeitig die Beleuchtungseinrichtung gegen eine, dem der neuen Brennweite angepassten Abstrahlwinkel, ändern könnte.

Um Hintergrundlicht (eintreffendes Licht, das nicht von der eigenen Beleuchtungseinheit stammt und eine vorzeitige Sättigung eines Pixels bewirken könnte) möglichst zu unterdrücken, wird ein optischer Filter vor dem Sensor angebracht, der nur Wellenlängen im Bereich der Trägerwellenlänge durchlässt. Realisiert wird das mit einem Bandpassfilter, der um die zentrale Wellenlänge des Messsystemes einen definierten Bereich hat, in dem die Trägerwelle passieren kann.

### 3.1.3 PMD (Photonic Mixing Device)

Bildsensoren von Distanzkameras sind eine Kombination von CCD und CMOS-Bildsensoren, deren Funktionsweise bereits in Kapitel 2.7 erklärt wurde. Die Kombination von CMOS- und CCD-Technik wird auch „Lock-In Pixelstruktur“ genannt. Es ist anzunehmen, dass durch die Kombination beider Technologien die Vorteile ineinander vereint werden. CMOS ist nötig, da die Distanzmessung in jedem Pixel einzeln ausgeführt wird und dazu extra Schaltungen nötig sind. Aufgrund der geforderten Augensicherheit ist die Sendeenergie der Beleuchtungseinrichtung begrenzt. Weiters wird diese begrenzte Energie auf einen großen Raumwinkel aufgeteilt, um eine möglichst große Szene auszuleuchten. Dementsprechend kommt vom ausgesandten Licht nur noch sehr wenig zum Sensor zurück, da die Distanzkamera ein aktives System ist und die Leistung mit dem Quadrat der Objektdistanz abnimmt (Kapitel 2.4). Deshalb ist der CCD-Sensor mit seiner höheren Sensitivität nötig. Ohne diesen könnte das rückgestreute Signal aus höheren Distanzen nicht mehr detektiert werden.

Ein PMD ist ein Photodetektor und zugleich ein optoelektronischer Mischer. Es wird beim Einfall von amplitudenmoduliertem Licht der Photonenstrom mit einem elektrischen Gegentaktsignal (Referenzsignal der Sendeeinrichtung) gemischt. Ein Photomischdetektor besteht prinzipiell aus zwei symmetrisch aufgebauten Elektroden mit einem gemeinsamen Eingangsbereich, zwei Ausgängen und zwei Modulationselektroden. Die zwei Auslekathoden ( $n^+$ -Zone) sind mit einer positiven Spannung belegt (Grafik 3.3). Die beiden Photogate-Elektroden dienen als Modulationselektroden. An ihnen liegt eine Vorspannung  $U_0$  und eine Gegentakt-Modulationsspannung  $\pm U_{mod}$ . Wenn Photonen auf die beiden transparenten Photogates treffen, werden sie in Ladungsträger umgewandelt. Je nachdem, was für eine Polung ( $U_0 - U_{mod}$  oder  $U_0 + U_{mod}$ ) angelegt ist, wandern die Ladungsträger (Elektronen) nach links oder nach rechts zu den Auslesedioden. Die Polung ist gekoppelt mit der Beleuchtungseinrichtung und variiert mit der Modulationsfrequenz. Dieser Vorgang wird auch Ladungsschaukel genannt. Die Photonenströme werden üblicherweise durch Speicherkondensatoren über die Integrationszeit (entspricht in der Photographie der Belichtungszeit) aufsummiert, und dann zu den Spannungen  $U_A$  und  $U_B$  umgewandelt [Zhang (2003)].

In der Grafik 3.3 rechts ist der Mischprozess mittels der Ladungsschaukel dargestellt. Wenn das optische Signal (vom Objekt reflektiertes Signal) und das elektrische Signal (Referenzsignal der Beleuchtungseinrichtung) eine Phasenverschiebung von  $\varphi = 0$  haben, dann wandern die Elektronen nach rechts. Bei  $\varphi = \pi$  werden sie gleichmäßig auf beide Kanäle aufgeteilt und bei  $\varphi = 2\pi$  wandern sie nach links. Mit dem Mischprozess wird die Demodulation des Nutzsignals erreicht.

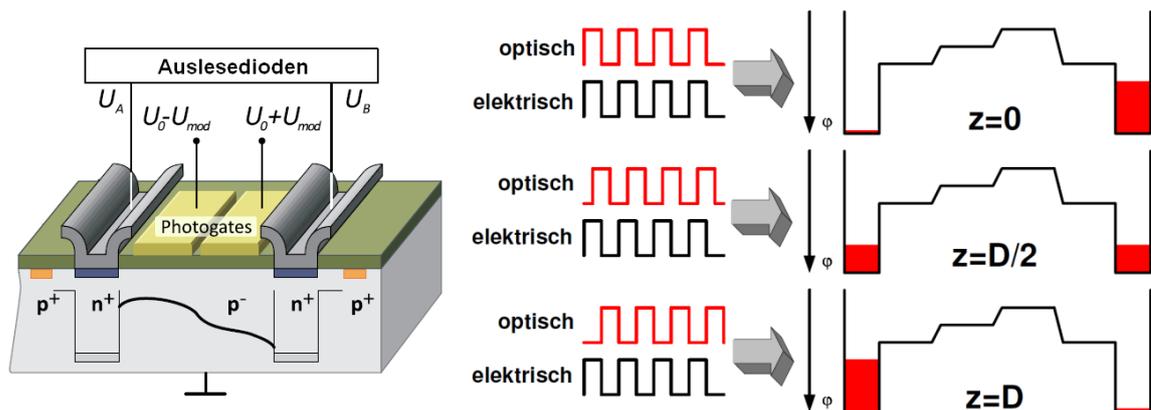


Abbildung 3.3: Links: Vereinfacht dargestelltes PMD-Pixel. [Lindner (2010)] Rechts: Mischprozess mittels Ladungsschaukel.  $D$  ist hier der Eindeutigkeitsbereich der Distanzmessung. [PMD-Vision (2013)]

Hintergrundlicht füllt, da es nicht moduliert ist, beide Auslesedioden gleichermaßen auf. Damit beeinflusst es den Erwartungswert der Distanzmessung zwar nicht, es erhöht aber die Varianz der Messung. Allerdings würden bei starker Hintergrundstrahlung (wie Sonnenlicht) die Pixel sehr schnell gesättigt sein. Sättigung tritt ein, wenn mindestens eines der beiden Ausleseregister voll ist und daher keine weiteren Ladungsträger mehr aufnehmen kann (siehe rote Balken in Abb.3.3 rechts). Mittels einer zusätzlichen Schaltung (SBI-Schaltung (Suppression of Background Illumination)), die in die Auslesebranche im PMD-Pixel integriert wird, kann das Hintergrundlicht, das durch den optischen Filter (Kapitel 3.1.2) kommt, unterdrückt werden. Es werden dann gleiche Anteile in den Auslesedioden kontinuierlich entfernt. Allerdings kann durch die SBI-Schaltung nicht mehr auf die Zahl der eingetroffenen Photonen, also auf die Strahlungsenergie, geschlossen werden. Weiters werden dadurch die Rauschanteile, die durch das Hintergrundlicht verursacht werden, nicht eliminiert [Schneider (2003)].

Nun soll das Arbeitsprinzip einer Messwerterfassung genauer erläutert werden. Es wird ein Nutzsignal  $s(t)$  einer Trägerwelle aufmoduliert und ausgesendet. Dieses Signal wird am Objekt reflektiert ( $r(t)$ ) und am Kamerasensor phasenverschoben empfangen (siehe auch Abb.1.1). Da es nicht möglich ist, Werte genau an den Stellen  $\tau_i$  (Grafik 3.4) zu messen, werden die Werte rund um die Stellen über den Integrationszeitraum  $\Delta t$  aufintegriert. Im PMD-Pixel wird die Kreuzkorrelation  $c(\tau_i)$  des eintreffenden optischen Signals mit dem um  $\tau$  verschobenen elektrischen Referenzsignal im Zeitfenster  $\Delta t$  durchgeführt [Lindner (2010)].

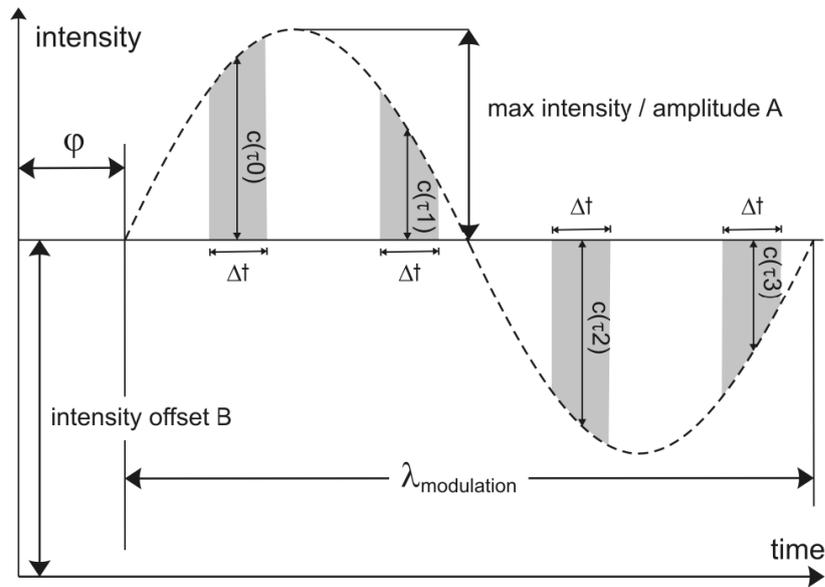


Abbildung 3.4: Prinzip der Phasenmessung. Das vom Sensor empfangene Signal wird an den Stellen  $c(\tau_i)$  über den Integrationszeitraum  $\Delta t$  abgetastet. Die  $c(\tau_i)$  stellen die Anzahl der Ladungsträger in einem „Potentialtopf“ bzw. die Spannungen an einer der Auslesedioden dar. Wie groß  $\Delta t$  ist, hängt von der Anzahl der Potentialtöpfe im Pixel ab. Das Signal ist gegenüber dem ausgesendeten Signal um  $\varphi$  phasenverschoben, woraus sich die Laufzeit ableiten lässt. Die Amplitude  $A$  ist, wegen der Reflexion am Objekt und der durchlaufenen Atmosphäre, abgeschwächt. Das Intensitäts-Offset  $B$  ergibt sich durch die Addition von Hintergrundstrahlung. [Kahlmann (2007)]

Mit den Intensitätswerten  $c(\tau_i)$  kann nun die Phasenverschiebung  $\varphi$  (3.1), die Amplitude  $A$  (3.2) und die Intensität  $B$  (3.3) (entspricht dem Grauwert) berechnet werden. Die Berechnung von  $B$  ist allerdings nicht mehr möglich, wenn die Kamera eine integrierte SBI-Schaltung hat, da dann nur noch Differenzen vorliegen.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{c(\tau_1) - c(\tau_3)}{c(\tau_0) - c(\tau_2)}\right) \quad (3.1)$$

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2} \quad (3.2)$$

$$B = \frac{1}{4} \sum_{i=0}^3 c(\tau_i) \quad (3.3)$$

Mittels der Phasenverschiebung  $\varphi$  kann auf die Objektdistanz rückgeschlossen werden:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \lambda_{mod} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \quad (3.4)$$

mit:  $\lambda_{mod}$  = Modulationswellenlänge

### 3.1.4 Sonstige Komponenten

Die Elektronik einer Distanzkamera hat die Aufgabe, die Sendeeinrichtung und den Sensor samt Auslesevorrichtung der Pixel zu steuern, die gemessenen Daten in Echtzeit in Distanzen und Amplituden umzurechnen und eine Datenverbindung, z.B. über USB (Universal Serial Bus), nach außen herzustellen. Da ein Teil des Signalrauschens von Wärme verursacht wird, muss die Kamera entsprechend gekühlt werden. Die Hauptwärmequelle ist die Beleuchtungseinrichtung, aber auch die Elektronik produziert Wärme. Die Kühlung kann mittels Temperatur-gesteuerten Lüftern erfolgen oder bei gekapselten Kameras mittels passiver Kühlung. Ebenso ist der Dunkelstrom eines Sensors temperaturabhängig und kann durch entsprechende Kühlung stark reduziert werden.

## 3.2 Systematische Fehlereinflüsse der Distanzmessung

In diesem Kapitel soll auf die Fehlereinflüsse, die bei einer Messung eine Rolle spielen, eingegangen werden. Zur Zeit gibt es in der Literatur keine Hinweise über systematische Fehlereinflüsse auf die Amplitudenmessung. Man kann davon ausgehen, dass die Distanz- und Amplitudenbeobachtungen zumindest teilweise die selben Fehlerquellen haben, da sie aus den selben Rohdaten abgeleitet werden. Daher werden hier die systematischen Fehlereinflüsse, die auf die Distanzmessung wirken, erläutert. Diese Fehlereinflüsse sollen mit der Kalibrierung letztendlich eliminiert oder zumindest stark reduziert werden. Tabelle 3.1 zeigt einige Fehlereinflüsse, die bei einer RIM-Kamera eine Rolle spielen und sich meist nicht oder nur schlecht voneinander trennen lassen. Weiters haben die Bauteile der Kameras Alterungserscheinungen, was eine neuerliche Kalibrierung von Zeit zu Zeit notwendig machen kann. Die Aufzählung soll zeigen wie komplex der Kalibrationsprozess ist [Lipkowski & Scherer (2012)].

### 3.2.1 Integrationszeit

Die Integrationszeit ist die Zeitspanne in der einfallende Photonen vom Sensor registriert werden. Ein systematischer Einfluss, der hier beachtet werden muss, ist die Änderung der Integrationszeit. In [Karel *et al.* (2010)] zeigt ein Experiment, dass mit einer SR-3000 durchgeführt wurde, diesen Effekt. Abb.3.5 zeigt die Antwortfunktion eines solchen Integrationszeit-

wechsels. Die Zeit, die benötigt wird, bis die Werte der Distanzmessung wieder stabil werden, hängt dabei von der Größe der Änderung ab. Bei einer Änderung der Integrationszeit von 90 *Einheiten* ändert sich die mittlere Distanz um ungefähr 6 cm, bei kleineren Änderungen ist die Distanzänderung auch entsprechend kleiner.

Bei einer Änderung der Integrationszeit sollte man, wenn möglich, eine Pause von 2 – 3 min. vor der nächsten Messung einlegen um diesen Effekt zu minimieren.

Fehlereinfluss	Ursache für den Fehler
Scattering	Interne Mehrwegeeffekte
Mehrweg	Externe Mehrwegeeffekte
Objektiv	Linsenfehler
Sättigung	Nicht unterdrücktes Hintergrundlicht / gerichtete Reflexion / zu lange Integrationszeit
Frequenzfehler	Skalierungsfehler wegen Frequenzinstabilität
Temperaturstabilität	Einfluss der Außentemperatur
Aufwärmeeffekte	Einfluss der Kamertemperatur
Langzeitstabilität	Frequenzänderung bei Alterung
Reflektivität	Distanz/Amplitudenänderung bei unterschiedlicher Reflektivität
Innere Orientierung	Instabile Befestigung des Sensors
Integrationszeit	Nicht optimal gewählt

Tabelle 3.1: Fehlereinflüsse

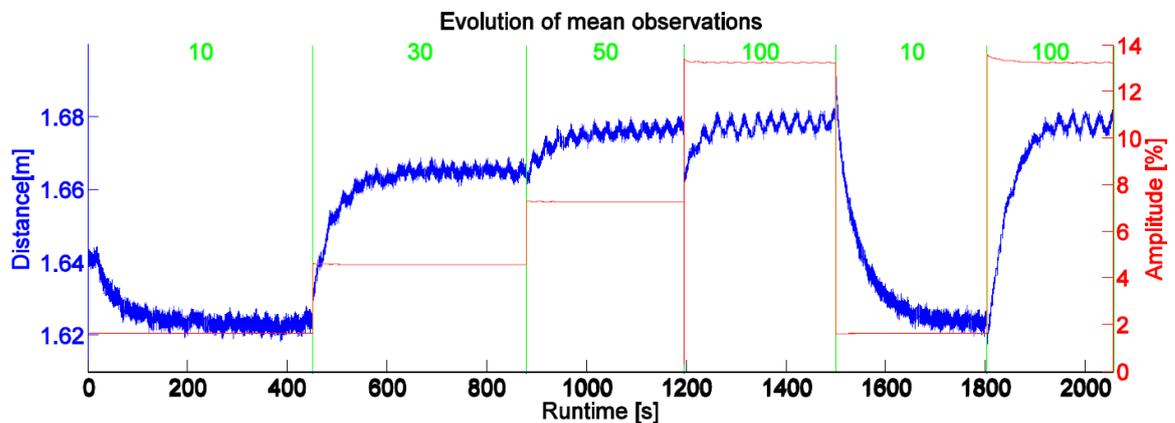


Abbildung 3.5: Einfluss eines Wechsels der Integrationszeit auf die Distanzmessung. *in Grün*: Integrationszeit. *in Blau*: Mittlere Distanz. *in Rot*: Amplitude. Hier ist ersichtlich, dass die Distanzmessung nach einem Integrationszeitwechsel 2-3 min braucht, bis sie sich stabilisiert. Die Amplituden verhalten sich genau entgegengesetzt den blauen Kurven, stabilisieren sich aber ebenfalls nach 2-3 min. [Karel et al. (2010)]

### 3.2.2 Temperatur

Temperaturänderungen beeinflussen die Messgenauigkeit von Distanzkameras.

- **Interne Temperatur (Aufwärmphase):** Wenn die Kamera aufgedreht wird, dann wird die Elektronik mit Strom versorgt und die elektronischen Bauteile produzieren Wärme. Speziell die Beleuchtungseinrichtung, die aus vielen LED's besteht, bewirkt eine große Temperaturänderung. Untersuchungen haben gezeigt, dass es in der Aufwärmphase einen fast linearen Trend zwischen Temperatur- und Entfernungsänderung gibt. Hier muss noch bei Kameras, die mittels Lüfter gekühlt werden, unterschieden werden zwischen den Phasen in denen der Lüfter läuft ("cool down") und in denen er nicht läuft ("warm up"). Ob der Lüfter läuft wird temperaturabhängig geregelt. In der „warm up“-Phase ergab sich für eine SR-3000 ein Anstieg von  $1.4 \text{ mm}/^\circ\text{C}$  und in der „cool down“-Phase ein Anstieg von  $2.1 \text{ mm}/^\circ\text{C}$  (Grafik 3.6 links). Rechts in der Grafik ist die Amplitude bei Temperaturänderung dargestellt. Sie zeigt ebenfalls einen fast linearen Trend, allerdings in die andere Richtung, und sie macht einen Sprung bei der Temperatur, bei der sich der Ventilator einschaltet [Zachhuber (2011)]. Die Zeit, die eine Kamera für die Aufwärmphase braucht, ist von Modell zu Modell unterschiedlich und muss experimentell ermittelt werden bzw. wird vom Hersteller der Kamera angegeben. Um genaue Messergebnisse zu erhalten sollten die Aufwärmphasen auf jeden Fall eingehalten werden.

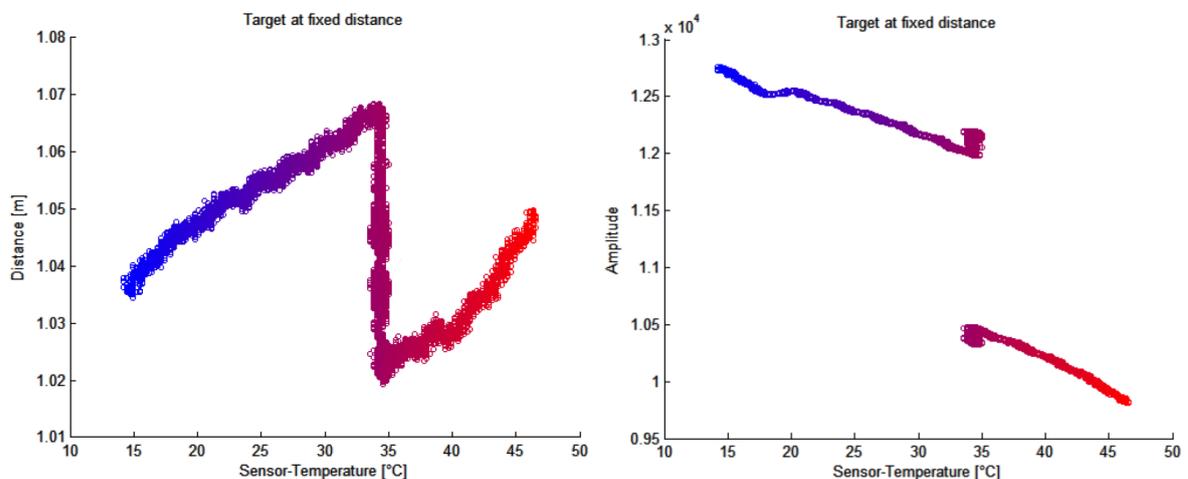


Abbildung 3.6: Einfluss der Sensortemperatur. *Links:* Sensortemperatur vs. Distanz: Fast linearer Anstieg der Distanz mit Anstieg der Temperatur. Der Sprung in der Mitte ist die Temperatur, bei der sich der Lüfter der SR-3000 einschaltet. *Rechts:* Sensortemperatur vs. Amplitude: Fast linearer Abfall der Amplitude mit zunehmender Temperatur. [nach Zachhuber (2011)]

- **Externe Temperatur:** Wenn die Aufwärmphase der Kamera abgeschlossen ist, ändert sich die Temperatur nicht mehr so stark. Experimente in [Zachhuber (2011)] haben für die SR-3000 ergeben, dass sich bei konstanter Umgebungstemperatur die Temperatur

in der Nähe des Sensors um maximal  $0,74^{\circ}\text{C}$  ändert. Dementsprechend klein sind auch die Auswirkungen der Temperaturänderung auf die Distanz- und Amplitudenänderung. Wenn die Kamera allerdings im Freien betrieben wird, wo die Variationen der Außentemperatur größer sind und die Kamera sich durch Sonneneinstrahlung aufheizen kann, sollten die Messdaten entsprechend der Temperaturänderung korrigiert werden.

### 3.2.3 Reflektivität

Wie schon in Kapitel 2.2.1 ausgeführt, kann man zwischen gerichteter und diffuser Reflexion unterscheiden. Gerichtete Reflexion ist bei Distanzkameras meist ein Problem, da es bei den betroffenen (und umliegenden) Pixeln zu Sättigungserscheinungen führt und es dort folglich nur falsche oder keine Messdaten gibt.

Mit abnehmender Reflektivität nehmen die Amplitude und die Genauigkeit der Distanzmessung ab. Ein Objekt das diffus, mit einer Reflektivität von 100% reflektiert, wäre der optimale Zustand für eine Distanzkamera. Dieser Zustand ist in der Realität aber praktisch nicht zu finden. Ein Material, das diese Bedingung beinahe erfüllt, ist Spectralon. Deshalb wird es oft als Referenz für Reflektivität verwendet. Die Reflektivität ist unter anderem von dem Material, der Farbe (bzw. Textur) des Objektes (wie später noch gezeigt wird (Kapitel 5.2.2)) und von dem Inzidenzwinkel, unter dem das Objektes aufgenommen wird, abhängig. In Abb.3.7 ist zu sehen, dass unterschiedliche Reflektivitäten zu unterschiedlichen Distanzmessungen führen.

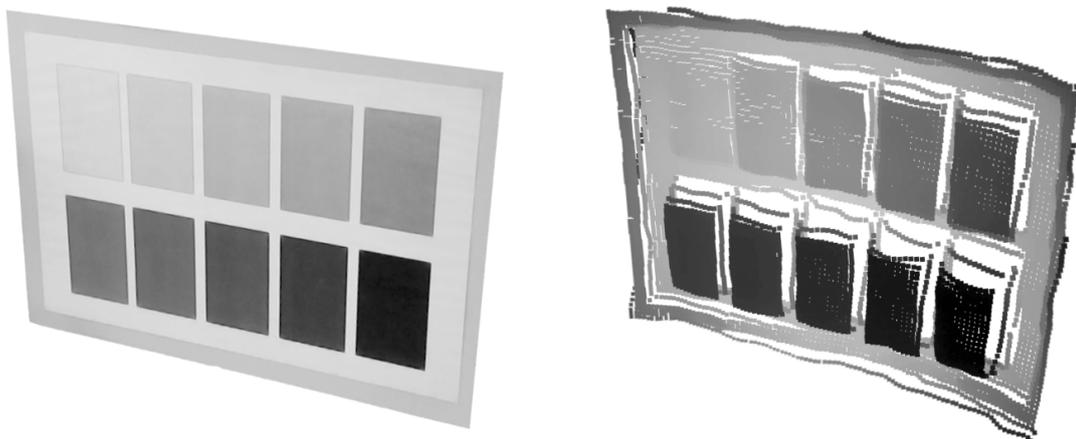


Abbildung 3.7: Einfluss der Textur auf die Distanzmessung. *Links*: Ebene Tafel mit unterschiedlichen Reflektivitäten. *Rechts*: Distanzmessung der einzelnen Reflektivitäten. [Lindner (2010)]

### 3.2.4 Mehrweg und Scattering

Bei einem Messvorgang läuft das vom Objekt reflektierte Signal durch die Optik und wird von dem jeweiligen Pixel, auf dem es auftrifft, registriert. Ein Teil des Signals wird jedoch von dem Sensor zurückgeworfen und über die Linsen oder den optischen Filter zu einem anderen Pixel reflektiert. Es wird daher die Distanz- und Amplitudenmessung in anderen Pixeln verfälscht. Dieser Effekt wird Scattering genannt (Grafik 3.8 rechts) und erzeugt eine Korrelation benachbarter Pixel.

Bei Mehrwegeffekte geht das ausgesendete Signal nicht den direkten Weg von der Kamera zum Objekt und wieder zurück, sondern wird an einem oder mehreren Objekten reflektiert, bevor es zurück zum Sensor gelangt. Ein Beispiel ist das Messen von Ecken. Die Situation ist in Grafik 3.8 links dargestellt. Es wird das Messsignal von der Wand A auf die Wand B geworfen bevor es zum Messsystem zurückkommt. Die Messung wird dadurch systematisch verfälscht. Solche Mehrwegeffekte können durch entsprechende Messanordnungen reduziert oder sogar eliminiert werden.

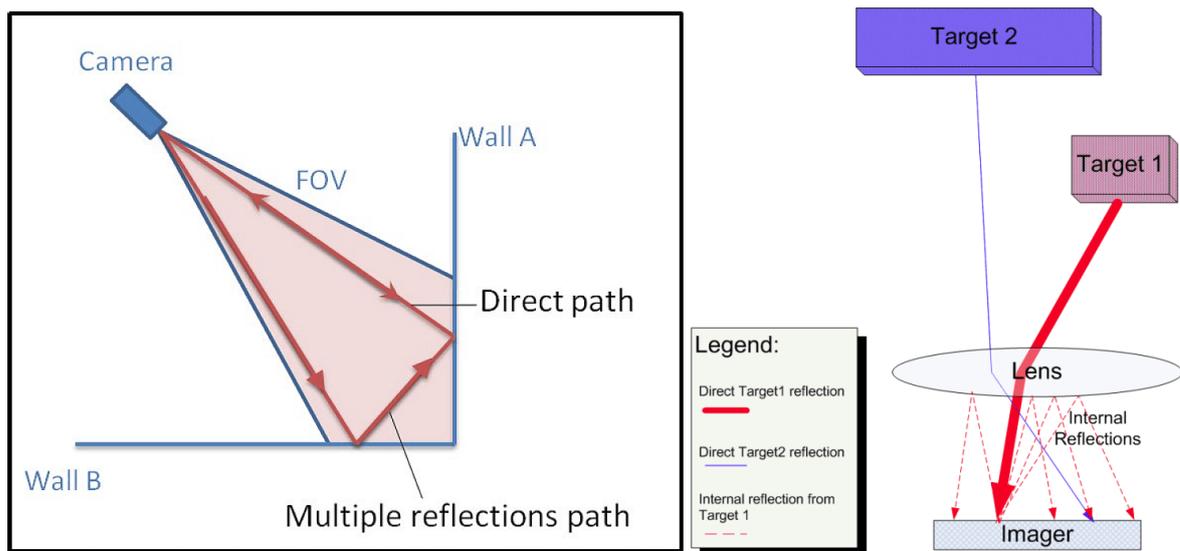


Abbildung 3.8: *Links*: Mehrwegeffekte. *Rechts*: Scattering. [Swissranger (2011)]

### 3.3 Vor und Nachteil von Distanzkameras

Distanzkameras sind ein relativ junges Messverfahren in der Photogrammetrie für die Erfassung von 3D-Koordinaten im Nahbereich. Klassische Messverfahren in der Photogrammetrie und Fernerkundung sind die Auswertung von Bildern und das Laserscanning. Bei der Bildauswertung wird das Messobjekt von zwei oder mehreren Blickrichtungen stereoskopisch aufgenommen, danach können Neupunkte mittels Vorwärtsschnitt bestimmt werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die absolute Orientierung bzw. die rela-

tive Orientierung der Photos zueinander bekannt ist. Eine weitere Voraussetzung ist eine bekannte innere Orientierung der Kamera. Diese Größen müssen zusätzlich zur Neupunktbestimmung ermittelt werden. Dazu gibt es verschiedenste Verfahren. Sie bedeuten aber einen zusätzlichen Aufwand. Weiters ist man für die Auswertung auf eine Textur der Oberfläche angewiesen (außer beim Lichtschnittverfahren, bei dem die Textur selbst erzeugt wird), um korrespondierende Punkte zu finden. Es ist zum Beispiel nicht möglich, eine schneebedeckte Oberfläche zu fotografieren und daraus die Geometrie dieser Fläche abzuleiten. Beim Laserscanning werden massenweise Punkte aufgenommen, das geschieht aber sequenziell. Das ist kein Problem, solange der Scanner sich nicht bewegt und auch das Messobjekt statisch ist. Falls der Scanner sich bewegt, zum Beispiel bei Aufnahmen aus einem Flugzeug, dann ist die Bestimmung der Orientierung nicht mehr über Verknüpfungsobjekte möglich, sondern muss durch andere geeignete Verfahren ermittelt werden (GNSS (Global Navigation Satellite System), IMU (Inertial Measurement Unit)). Die Messung von bewegten Objekten ist mit Laserscannern nicht möglich. Ein gravierender Nachteil eines Laserscanners ist, dass er bewegliche Komponenten besitzt, die das System sehr teuer und wartungsaufwändig machen. Da ein Scanner Objekte in unregelmäßigen Mustern abtastet, können diskrete Punkte am Objekt nicht direkt bestimmt werden, sondern müssen über Zusatzinformationen rekonstruiert werden (z.B. Eckpunkte als Schnitt dreier Ebenen, die in die Punktwolke eingepasst werden müssen).

Distanzkameras haben diesen klassischen Verfahren gegenüber einige Vorteile, aber auch Nachteile [Karel (2008b)].

Vorteile:

- Flächenhafte Erfassung zu einem gemeinsamen Zeitpunkt
- Keine Textur der Oberfläche nötig
- Nur ein Standpunkt nötig
- Aufnahme bewegter Objekte mit Messraten bis 100 Hz möglich
- Kompakte Abmessungen und keine beweglichen Komponenten

Nachteile

- Messungen nur im Nahbereich möglich
- (Noch) Niedrige Genauigkeit

### 3.4 Distanzkalibrierung

Es gibt in der Literatur verschiedene Ansätze Distanzkalibrierungen von PMD-Kameras durchzuführen. Einige von ihnen sollen hier näher erläutert werden.

In [Kahlmann *et al.* (2006)] besteht die Kalibrierung aus zwei Teilen. Zuerst wird eine photogrammetrische Kalibrierung durchgeführt, bei der die Parameter der inneren Orientierung ermittelt werden, danach werden die Distanzen kalibriert. Es wurde ein ebenes Testfeld mit einem Passpunktfeld verwendet, dessen Zielmarken aus 25 NIR-LED's bestand. Die nominellen Distanzen für die Distanzkalibrierung wurden mit einem Interferometer ermittelt. Bei der Datenaufnahme wurden zuerst die Integrationszeiten variiert, danach wurden Tafeln mit fünf unterschiedlichen Reflektivitäten verwendet. Da die Distanzkalibrierung nur für ein einzelnes Pixel durchgeführt wurde, wurde, um den ganzen Sensor abzudecken, eine Fixed-Pattern-Noise (FPN)-Matrix verwendet. Der Einfluss der Reflektivität wird als vernachlässigbar im Vergleich zu anderen Einflüssen angegeben. Der Einfluss der Integrationszeit wird mittels einer Look-Up-Tabelle beseitigt. Die Distanzgenauigkeit nach der Kalibrierung wird mit 10 *mm* angegeben.

In [Lindner & Kolb (2006)] wird die Kalibrierung ebenfalls auf eine photogrammetrische und eine Distanzkalibrierung aufgeteilt. Für die photogrammetrische Kalibrierung wurde ein ebenes Kalibrierfeld mit einem Schachbrettmuster verwendet, für die Distanzkalibrierung eine ebene, semi-reflektierende Tafel. Die Daten zeigen einen oszillierenden Fehler, der vor allem im Nahbereich sehr groß ist. Um diesen Fehler zu modellieren wurden B-Splines verwendet, deren Parameter in einer Ausgleichung bestimmt wurden. Die innere Orientierung stellte sich als stabil heraus, die Genauigkeit der Distanzmessung nach der Kalibrierung wird mit 10 *mm* und einer Standardabweichung von 3 *mm* angegeben.

In [Karel & Pfeifer (2009)] werden die Parameter für die photogrammetrische und die Distanzkalibrierung, anders als bei den zuvor beschriebenen Kalibrierungen, aus den selben Daten ermittelt. Die Kamera wird dabei freihändig geführt, die innere und die äußere Orientierung werden in einem Bündelblockausgleich ermittelt. Das Kalibrierfeld ist eine ebene Tafel, auf die ein Passpunktfeld, das aus runden, ebenen Zielmarken besteht, aufgeklebt ist. Mittels der äußeren Orientierung der Kamera und der Information der ebenen Kalibriertafel können nominelle Distanzen berechnet werden. Die Modellierung des Distanzfehlers erfolgt mittels einer Kalibrierfunktion, deren Terme die verschiedenen Fehlereinflüsse repräsentieren, die auf die Distanzmessung wirken. Es wird die Unabhängigkeit der ermittelten Parameter des Polynoms nachgewiesen. Tests ergaben eine Distanzgenauigkeit von 5 *mm*.

# Kapitel 4

## Messgeräte

### 4.1 Swissranger 3000

Die radiometrische Kalibrierung wurde an einer Swissranger 3000 der Firma MESA-Imaging [MESA-Imaging (2013)] durchgeführt. Wie schon in Kapitel 3.1 beschrieben, sind die wichtigsten Komponenten der Kamera Beleuchtungseinheit, Objektiv, Sensor und die Elektronik.



Abbildung 4.1: Verschiedene Ansichten der Swissranger 3000. *Links*: Beleuchtungseinheit und Optik. *Mitte*: Lüftungsschlitze für die Kühlung der Elektronik. *Rechts*: Rückseite der Kamera. Zu sehen sind die angeschlossenen Kabel für die Datenübertragung und die Energieversorgung.

Die Beleuchtungseinrichtung der SR-3000 besteht aus 55 LED's die rund um die Optik angebracht sind (Grafik 3.2). Das Maximum der abgestrahlten Wellenlänge liegt im nahen Infrarot bei  $850\text{ nm}$ . Die Abstrahlleistung ist wegen der Augensicherheit auf  $1\text{ W}$  begrenzt. Die Modulationsfrequenz kann auf 19, 20, 21 oder  $30\text{ MHz}$  eingestellt werden. Damit ergibt sich mit der Formel (2.12) der minimale Eindeutigkeitsbereich zu  $5\text{ m}$  und der maximale Eindeutigkeitsbereich zu  $7,9\text{ m}$ . In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten Größen zusammengefasst.

Parameter	Größe	Einheit	Voraussetzung
Anzahl LED's	55	–	
Modulationsfrequenz	19, 20, 21, 30	MHz	
Mittlere Abstrahlenergie während Integration	1	Watt	mit 20 MHz Modulationsfrequenz, bei Raumtemperatur
Wellenlänge mit größter Strahlungsleistung	850	nm	bei Raumtemperatur
FWHM	35	nm	bei Raumtemperatur
Abstrahlwinkel	±25	Grad	bei Raumtemperatur

Tabelle 4.1: Beleuchtungseinheit SR-3000

Das Objektiv der Kamera ist mittels Gewinde aufgeschraubt und damit auswechselbar. In Abb.4.2 sind das horizontale Sichtfeld der Kamera, das sich aus der Brennweite der Optik und der Sensorgröße ergibt in grün und der Abstrahlwinkel der Beleuchtungseinrichtung in rot im Grundriss dargestellt. Als Abstrahlwinkel ist bei LED's der Winkel definiert, bei dem die Intensität 50 % beträgt. Da bei der SR-3000 das Sichtfeld der Kamera und der Abstrahlwinkel sehr nahe beieinander liegen, fällt die Intensität am Rand auf fast 50 % ab. Ein weiterer Effekt der den Randlichtabfall beeinflusst, ist, dass die LED's nicht exakt gleichverteilt von 0°-25° abstrahlen. In Tab.4.2 stehen die wichtigsten Größen der Optik. Um den Einfluss von Hintergrundlicht zu minimieren ist ein optischer Filter verbaut, dessen Werte in Tab.4.3 zu finden sind.

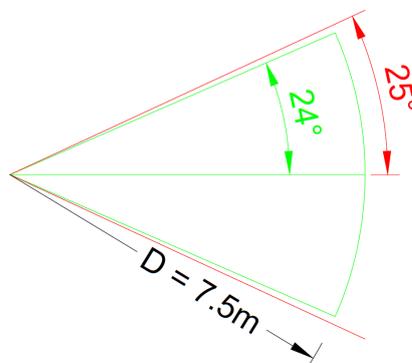


Abbildung 4.2: Horizontaler Abstrahlwinkel der Beleuchtungseinrichtung (rot) versus Sichtfeld (grün) der SR-3000.  $D$  ist der Eindeutigkeitsbereich bei einer Modulationsfrequenz von 20MHz.

Parameter	Größe	Einheit
Brennweite	8	mm
Durchmesser der Blende	5,7	mm
Befestigung Objektiv	M12x0,5	

Tabelle 4.2: Objektiv SR-3000

Parameter	Größe	Einheit
Zentrale Wellenlänge	870	nm
Halbwertsbreite (FWHM)	80	nm

Tabelle 4.3: Optischer Filter SR-3000

Der Sensor der Kamera ist ein CMOS/CCD-Sensor mit einer Auflösung von 176\*144 Pixel. Die niedrige Auflösung ist typisch für TOF-Kameras, da die einzelnen Pixel aufgrund der zusätzlichen Schaltungen, die für die Distanzmessung erforderlich sind, relativ groß sind. Die maximale Bildrate ist mit 29 Hz angegeben. Die Größen sind in Tab.4.4 zusammengefasst. Der Sensor der verwendeten Kamera hatte ein defektes Pixel in Zeile 144 und Spalte 176. Dieses wurde bei der nachfolgenden Auswertung nicht verwendet.

Parameter	Größe	Einheit
Pixelanzahl	176x144	–
Pixelgröße	40x40	µm
Standard-Demodulationsfrequenz	20	MHz
maximale Bildrate	29	Hz

Tabelle 4.4: Sensor SR-3000

Eine wichtige Einstellgröße bei Aufnahmen mit der Distanzkamera ist die Integrationszeit. Die Integrationszeit ist dann optimal, wenn die Zeit so gesetzt ist, dass die Amplitude möglichst groß wird, ohne dass Sättigung eintritt. Um die optimale Integrationszeit zu wählen muss man drei Aspekte beachten [Swissranger (2011)]:

1. geforderte Aufzeichnungsgeschwindigkeit
  - bewegte Objekte: kurze Integrationszeiten möglich (sonst Bewegungsunschärfe groß)
  - statische Objekte: lange Integrationszeiten möglich
  - mögliche Aufzeichnungszeit: abhängig von der Anwendung (z.B. Anlagenüberwachung)
2. geforderte Qualität der Messung
  - längere Integrationszeit reduziert das Rauschen und verbessert damit die Qualität
3. zu vermessendes Objekt
  - Objektreflektivität: Objekte mit geringer Reflektivität benötigen eine längere Integrationszeit als Objekte mit hoher Reflektivität.
  - Distanz Objekt-Kamera: Nahe Objekte benötigen eine kürzere Integrationszeit als weiter entfernte.

Ist die Integrationszeit zu lange gewählt, führt das zur Sättigung von Pixeln und damit zu (grob) falschen Messergebnissen. Da über mehrere Messperioden gemittelt werden muss, führt eine zu kurz gewählte Integrationsdauer zu Genauigkeitseinbußen. Wenn die Integrationszeit für jedes Pixel einzeln einstellbar wäre, könnte das die Genauigkeit der Messung erhöhen. Die Wahl der optimalen Integrationszeit ist schwierig und oft nur mittels Versuchen möglich.

Die Elektronik der Kamera besteht aus vier verschiedenen Leiterplatten:

- Beleuchtungseinheit
- Sensorplatine
- Platine für die Bildprozessierung
- Kommunikationsinterface

Die Elektronik wird mittels eines temperaturgesteuerten Ventilators gekühlt. Die Stromversorgung der Kamera erfolgt über ein Netzteil, der Betrieb ist mittels entsprechendem Akku möglich. Da die Kamera keinen internen Speicher hat, ist für die Datenaufzeichnung ein Computer notwendig. Die Verbindung der Kamera mit dem Computer erfolgt über eine USB-Schnittstelle (Abb.4.1 rechts).

Zeichnet man die Messdaten mit der Standardsoftware der SR-3000 auf, dann ist an den ausgegebenen Daten schon eine Herstellerkalibrierung angebracht. Da allerdings keine Kalibrierung perfekt ist und eine an die ausgegebenen Daten bereits angebrachte Kalibrierung die zugrundeliegenden Effekte verschleiert, wurden Rohdaten ohne Herstellerkalibrierung aufgezeichnet, d.h. die Intensitätswerte  $c(\tau_0)$ - $c(\tau_3)$  aus den Formeln (3.1) bis (3.3). Das war mit einer auf dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung entwickelten Software Namens „RIMcapture“ möglich, die direkt mit dem Kameratreiber kommuniziert. Aus einer Messreihe ging hervor, dass direkt ausgelesene Amplituden um den Faktor  $2 * \sqrt{2}$  größer sind als die aus Rohdaten abgeleiteten. Ein weiterer Grund für die Verwendung von RIMcapture war, dass mit der Herstellersoftware keine längeren Bildsequenzen gespeichert werden konnten, was für die Kalibrierung aber notwendig war.

## 4.2 SVC GER 1500

Das „GER 1500“ ist ein portables Spektroradiometer der Firma Spectra Vista Corporation (SVC), dessen Messbereich vom sichtbaren Licht bis ins nahe Infrarot reicht. Das Gerät verfügt über einen internen Prozessor, einen Speicher und einen Akku und kann damit ohne Computer betrieben werden. Es kann aber auch über eine Datenschnittstelle direkt von einem Computer aus gesteuert werden, was zum Vorteil hat, dass man die Messergebnisse sofort kontrollieren kann. Als Datenschnittstelle stehen zwei serielle Schnittstellen und eine Bluetooth-Schnittstelle (Datenfunk über kurze Distanzen) zur Verfügung. Um das Gerät präzise auf den Messpunkt ausrichten zu können, ist ein Laserpointer in den Strahlengang integriert, der bei Bedarf eingeschaltet werden kann. Um die Messgenauigkeit zu steigern besteht jede Messung aus mindestens 16 Einzelmessungen. In Tabelle 4.5 sind die wichtigsten Daten des Gerätes zusammengefasst.



Abbildung 4.3: Spektroradiometer „GER 1500“ der Firma SVC. *Links*: Optik des Radiometers (im Vordergrund). *Rechts*: Bedienfeld und serielle Schnittstelle des Gerätes.

<b>Messbereich</b>	350-1050 nm
<b>Spektrale Kanäle</b>	512
<b>Integrationszeit</b>	5 ms und mehr
<b>Sichtfeld</b>	4°
<b>Reproduzierbarkeit von <math>\lambda</math></b>	$\pm 0,1$ nm
<b>Dunkelstromkorrektur</b>	automatisch
<b>Temperaturbereich für Betrieb</b>	-10°C bis +50°C

Tabelle 4.5: Spezifikationen des SVC GER 1500. [SpectraVista (2012)]

Eine Messung mit dem Radiometer liefert die Reflektivität der gemessenen Oberfläche der verschiedenen Wellenlängen des Messbereichs relativ zu einer Referenzmessung. Die Referenzmessung wird normalerweise auf Spectralon (Abb.4.4) durchgeführt. Die Anzahl der

spektralen Kanäle ist die Anzahl der verschiedenen Wellenlängen, die bei der Auslösung einer Messung gemessen werden. Es ist entweder Tageslicht oder eine externe Beleuchtung nötig, um die Messung durchführen zu können. Falls eine Lichtquelle verwendet wird, sollte sie über den Messzeitraum möglichst stabil sein. Wenn die Beleuchtungsstärke und die Stabilität der Lichtquelle unbekannt sind, muss jede Messung mit einer Referenzmessung auf Spectralon kalibriert werden. Über das Objektiv (Abb.4.3 links) wird das aus einem engen Raumwinkel eintreffende Licht auf einen Sensor projiziert, der es, getrennt nach Wellenlänge, über einen kurzen Zeitraum integriert.



Abbildung 4.4: Kalibrierung des Spektrometers vor jeder Messung mit einer Referenzmessung auf Spectralon.

## Kapitel 5

# Datenaufnahme und -aufbereitung

In dieser Arbeit wird eine radiometrische Kalibrierung einer Distanzmesskamera beschrieben. Es werden daher die Amplituden kalibriert, im Gegensatz zu einer geometrischen Kalibrierung, bei der die Distanzen kalibriert werden. Die Amplitude einer Distanzmessung mit einer Distanzkamera ist ein wichtiger Indikator für die Qualität der Messung. Sie wird weiters verwendet, um ein Graustufenbild zu erzeugen. Für die Kalibrierung gab es verschiedene Anforderungen. Da nominelle Distanzen in jedem Pixel berechnet werden müssen, wurde eine möglichst große und ebene Fläche gesucht. Bei einer solchen Ebene ist es dann möglich, die relative Orientierung der Kamera in den Kamerastandpunkten zu dieser Ebene über ein Passpunktfeld zu bestimmen und danach den Sehstrahl eines jeden Pixels mit der Ebene zu verschneiden. Die Aufnahmen sollten in verschiedenen Distanzen durchgeführt werden, da die Amplitude mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Weiters sollte der ganze Sensor in jeder Distanz abgedeckt werden, um damit den Lichtabfall zum Rand hin beobachten und kalibrieren zu können. Die Oberfläche der Ebene sollte unterschiedlich stark reflektieren, und zwar möglichst nahe einem Lambert'schen Strahler. Das sollte durch verschiedene Farben realisiert werden die möglichst diffus reflektieren. Da die Reflektivität nicht aus den Messungen einer nicht kalibrierten Distanzkamera abgeleitet werden kann, muss sie anders bestimmt werden. Das geschieht über Messungen mit einem Spektrometer, das Beobachtungen hoher Qualität liefert.

### 5.1 Kalibrierfeld

#### 5.1.1 Tafel für die Kalibrierung

Um die Kalibrierung der Kamera optimal durchführen zu können, wurde eine große, möglichst ebene Fläche gesucht. Die erste Möglichkeit, die in Betracht gezogen wurde, war die weiße Projektionstafel, die schon für eine geometrische Kalibrierung in [Karel (2008a)] verwendet wurde. Da sich nach einem Versuch allerdings herausstellt hat, dass sich selbst eine wasserlösliche Kreidefarbe nicht rückstandslos von dieser Tafel entfernen ließ, wurde nach

einer anderen Möglichkeit gesucht. Folgende Möglichkeiten wurden in Betracht gezogen:

- Aluplatte: Eine Firma bewirbt Platten, die absolut plan (keine Einschlüsse) und Pulverbeschichtet (Beschichtungsverfahren mit Pulverlack) sind, mit Größen bis  $3\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ . Wenn man Einschlüsse in Kauf nimmt bekommt man Größen bis  $4\text{ m} \times 2\text{ m}$ . Nachteil dieser Platten sind allerdings das große Gewicht und die damit verbundene schlechte Transportfähigkeit, der relativ hohe Preis und die Befestigung der Platte. Die Pulverbeschichtung hat den Vorteil, dass das Alu nicht mehr gerichtet reflektiert und daher nicht mit Farbe behandelt werden muss. Falls man das Kalibrierfeld permanent betreiben möchte, ist das eine Alternative, die man in Betracht ziehen kann.
- Siebdruckplatte: Sie sind erhältlich in der Größe  $2,5\text{ m} \times 1,25\text{ m}$ . Eine Seite der Platte ist glatt und aufgrund des Herstellungsverfahrens sehr eben. Nachteil ist das hohe Gewicht.
- Bauplatte, Ausbauplatte, Feuerschutzplatte: Hier gibt es Größen bis  $2\text{ m} \times 1,25\text{ m}$  im Baumarkt zu kaufen. Diese Platten werden meist aus Gips hergestellt, der in eine Form gegossen wird. Die Oberfläche ist dadurch zwar eben, aber aufgrund der Struktur von Gips gibt es oft Einschlüsse. Die Oberfläche ist mit Papier oder Karton überzogen, was diese Einschlüsse unsichtbar macht. Falls man die Platten aber mit Farbe besprüht, werden diese Unebenheiten durch die Feuchte wieder sichtbar. Vorteil der Papier- oder Kartonoberfläche ist die diffuse Reflexion.
- Styrodur: Hier gibt es Größen bis  $1,25\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ . Der Vorteil von Styrodur ist die sehr ebene Oberfläche und dass sich die Platte durch das Verhältnis aus geringem Eigengewicht und Steifheit praktisch nicht verbiegt, egal in welcher Lage man sie montiert. Der Nachteil ist, dass man die Oberfläche schon mit einem leichten Fingerdruck deformieren kann. Falls man sich also für dieses Material entscheidet, muss man beim Transport und bei der weiteren Behandlung sehr vorsichtig sein, um die Platte nicht zu beschädigen.
- Glasscheiben: Vorteil von Glasscheiben ist die Planarität, die Größe (auf der TU Wien gibt es  $3\text{ m} \times 4\text{ m}$  große Scheiben) und dass man Farben, die aufgetragen wurden um diffuse Streuung zu erhalten, einfach und rückstandsfrei entfernen kann. Des Weiteren muss man bei Scheiben, die nach außen zeigen, auf Temperaturschwankungen achten. Dass ist besonders relevant, wenn die Aufnahmedauer mehrere Stunden beträgt.

Abb.5.1 zeigt vier der hier beschriebenen Plattenarten.

Die Entscheidung ist letztendlich auf die Styrodurplatten gefallen, da sie einige wesentliche Vorteile haben:

- Durch das geringe Gewicht und die Größe sind sie sehr gut zu transportieren.
- Nach der Messung sind die Platten leicht zu entsorgen.



Abbildung 5.1: Mögliche Flächen für eine Kalibrierung. *Links oben:* Oberfläche von Styrodur. *Rechts oben:* Oberfläche einer Siebdruckplatte. *Links unten:* Feuerschutzplatte. *Rechts unten:* eine 3 m x 4 m große Glasscheibe auf der TU Wien.

- Sie sind leicht zu befestigen (doppelseitiges Klebeband).
- Sie sind zwar nicht so groß wie ursprünglich für die Messung in dieser Arbeit geplant, das bringt aber Vorteile in Bezug auf das Passpunktfeld. Bei einer großen Platte hätte man die Passpunkte direkt auf die Platte kleben müssen, was bei der Auswertung störend gewesen wäre.
- In Bezug auf die Farbe: Hätte man eine einzelne, große Platte genommen, dann hätte man sie nach jeder Messung mit einer anderen Farbe besprühen müssen um die unterschiedlichen Reflektivitäten zu erhalten. Danach hätte man einige Stunden warten müssen (je nach verwendeter Farbe) bis die Farbe komplett durchgetrocknet wäre bevor man weiter messen hätte können. Im Fall der kleineren Platten wurden alle Platten mit den unterschiedlichen Farben besprüht, nach der Trocknungszeit wurden alle Platten befestigt und gleichzeitig aufgenommen.

Styrodur hat aber auch ein paar Nachteile:

- Hauptnachteil der kleinen Platten war, dass viel mehr Aufstellungen nötig waren um den Sensor mit jeder Farbe und in jeder Distanz vollständig abzudecken.
- Wie oben schon erwähnt ist die Oberfläche sehr empfindlich. Man musste also beim Färben und Anbringen an der Wand sehr vorsichtig sein.

### 5.1.2 Farbe

Da anfangs geplant wurde, eine weiße Projektionstafel mit Farbe zu bestreichen, wurde eine abwaschbare Farbe gesucht. Die weit wichtigere Anforderung an die Farbe jedoch war, dass sie diffus reflektieren muss, um ein möglichst gutes (einfach modellierbares) Rückstreuverhalten (das dem eines Lambert'schen Reflektors möglichst nahe kommt) für das ausgesendete Signal zu erhalten. Da es aufgrund dieser zwei Forderungen nicht sehr viele Optionen gibt, ist die Entscheidung auf Kreidespray gefallen, der normalerweise für kurzzeitige Bodenmarkierungen verwendet wird. Andere Optionen wären abwaschbarer Graffiti-Spray oder Haar-Color-Spray gewesen, die aber waren teurer als der Kreidespray. Falls die Farbe nicht abwaschbar sein muss, gibt es noch andere Farben die hierfür geeignet wären. Allerdings sollte man Farben vorziehen die sich sprühen lassen um eine möglichst homogene Oberfläche zu bekommen.

Bevor die endgültigen Farben ausgewählt wurden, wurde mit verschiedenen Farben Probemessungen durchgeführt. Diese Probemessungen waren nötig, da die Reflektivität im NIR ganz anders sein kann als im Bereich des sichtbaren Lichts. In Abb.5.2 ist das Ergebnis einer Testmessung mit rotem und schwarzem Kreidespray dargestellt. Im skalierten Amplitudenbild erkennt man sofort, dass die rote Farbe und die weiße Projektionstafel fast die gleiche Reflektivität (in der von der SR-3000 verwendeten Wellenlänge, dem NIR) haben und man sie im Amplitudenbild fast gar nicht von voneinander unterscheiden kann. Bei der schwarzen Farbe hingegen sieht man den Unterschied in der Reflektivität ganz deutlich, weshalb sie auch bei der Hauptmessung verwendet wurde.

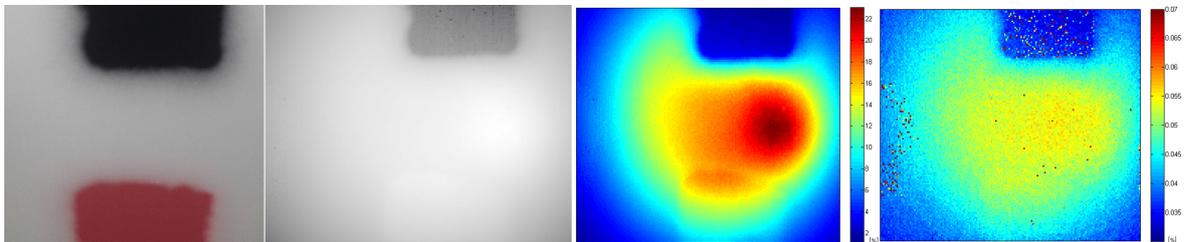


Abbildung 5.2: Testmessung mit rotem und schwarzem Kreidespray. Von links nach rechts: Farbfoto, logarithmisch skaliertes Amplitudenbild, linear skaliertes Amplitudenbild, Standardabweichung der Amplitude. Im Amplitudenbild sieht man, dass sich die rote Farbe vom weißen Hintergrund im NIR, in dem die Kamera arbeitet, fast nicht unterscheidet. Weiters ist im linear skalierten Amplitudenbild deutlich der Abfall der Amplitude zum Rand hin zu sehen.

Bei einer weiteren Testmessung wurden die Farben auf Styrodurplatten gesprüht und aufgenommen bzw. die Reflektivität einer Platte ohne Farbe getestet. In der Abb.5.3 sieht man im Amplitudenbild, dass die mittlere Platte, die ohne Farbe ist, gerichtet reflektiert (spiegelt).

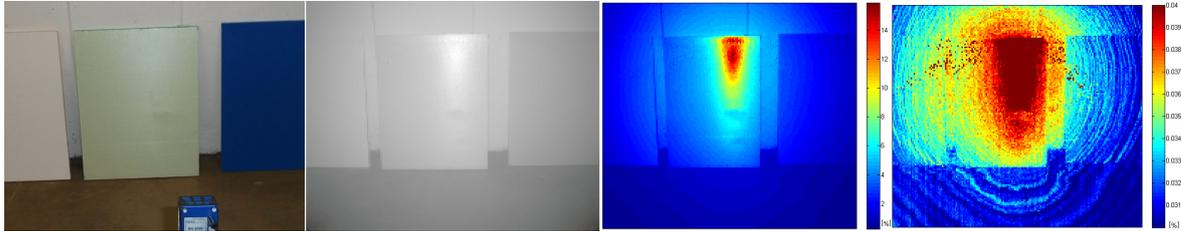


Abbildung 5.3: Zweite Testmessung mit weißer Farbe, ohne Farbe und blauer Farbe. Von links nach rechts: Farbfoto, logarithmisch skaliertes Amplitudenbild, linear skaliertes Amplitudenbild, Standardabweichung der Amplitude.

Aufgrund der zwei Testmessungen wurden letztendlich die Farben schwarz, grün, blau, lila und weiß ausgewählt. In Abb.5.4 ist das endgültige Kalibrierfeld zu sehen, das aus fünf Styrodurplatten besteht, die mit unterschiedlichen Kreidefarben besprüht sind. Die Platten wurden mit doppelseitigem Klebeband auf der grünen Tafel befestigt.



Abbildung 5.4: Endgültiges Kalibrierfeld: Fünf Styrodurtafeln, die mit unterschiedlichen Farben besprüht sind. Rund um die Platten ist das bereits angebrachte Passpunktfeld zu sehen. Um einen guten Kontrast der Passpunkte auf dem jeweiligen Hintergrund zu erhalten, wurden weiße und schwarze Passpunkte verwendet.

### 5.1.3 Passpunktfeld

Rund um die Platten wurde ein Passpunktfeld für die indirekte Orientierung der Bilder erstellt. Dafür wurden zwei unterschiedliche Passpunktgrößen verwendet, um die Passpunkte in den nahen (ca.1,6 m Entfernung) und den weiter entfernten (ca.5,5 m Entfernung) Bildern gut zu erkennen, und so deren Position präzise bestimmen zu können. Falls die Passpunkte in den Bildern zu groß oder zu klein erscheinen, funktioniert die automatische Detektion

der Passpunkte und das Einpassen von Ellipsen für die Orientierung der Bilder nicht mehr so gut. Auf das Einpassen von Ellipsen wird in einem nachfolgenden Kapitel näher eingegangen. Experimente haben gezeigt, dass sehr große Zielmarken die Genauigkeit der Punktmessung in Bildern nicht verbessern [Ahn *et al.* (1999)]. Für die Berechnung des Durchmessers wurden die nächste und die am weitesten entfernte Distanz der möglichen Aufstellungspunkte für die Aufnahmen der Platten genommen und daraus der Durchmesser so berechnet, dass die Zielmarken in den Bildern mit mindestens drei Pixeln Breite abgebildet werden. Die Durchmesser ergaben sich damit zu 5,5 cm und zu 11,2 cm. Das Passpunktfeld wurde in ORIENT/Orpheus [Kager *et al.* (2002)] mittels zwangsfreier Ausgleichung bestimmt. Die Eingangsgrößen für die Ausgleichung waren mehrere, mit einer kalibrierten Spiegelreflexkamera aufgenommene Fotos von dem Feld, die aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen wurden, und Sperrmaße, die mit einem Maßband gemessen wurden (Grafik 5.5). Für die zwangsfreie Lagerung wurden sechs Zielpunktkoordinaten als konstant vorgegeben (die räumliche Ähnlichkeitstransformation hat sieben Freiheitsgrade, minus dem Maßstab, der durch die Sperrmaße bestimmt wurde). Das rechtshändige Objektkoordinatensystem hat den Ursprung links unterhalb der Zielmarke 31 in der Wandebene, die X-Achse läuft parallel zu der unteren Tafelkante, die Y-Achse parallel zur linken Tafelkante und die Z-Achse schaut in Richtung Kamera (Abb.5.10). Damit konnten die unbekanntenen Zentrumskoordinaten der Zielmarken bestimmt werden.

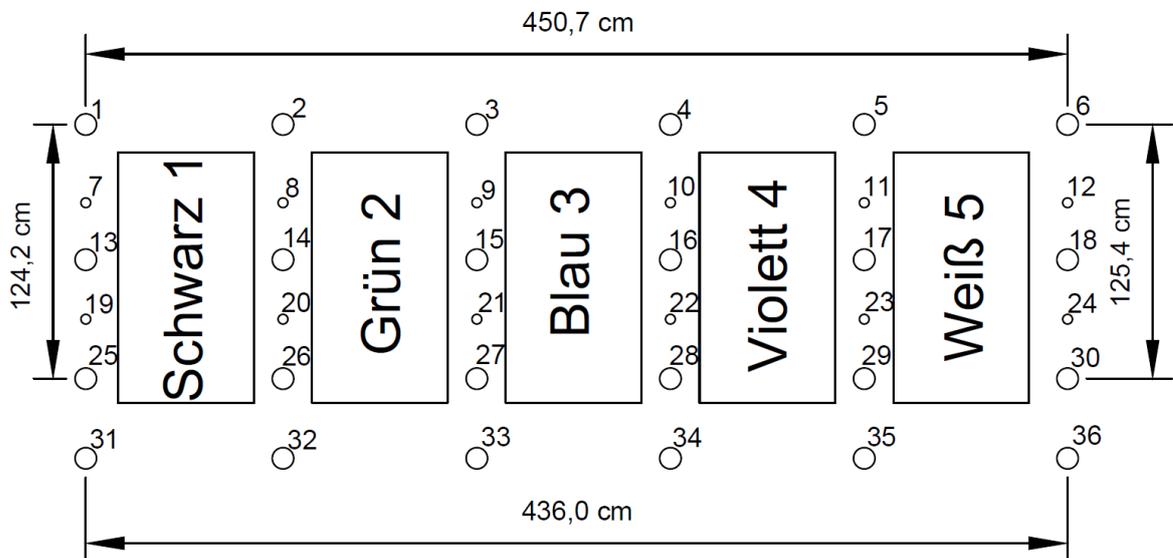


Abbildung 5.5: Passpunktfeld rund um die Styrodurplatten und die verwendeten Sperrmaße für die Ausgleichung.

## 5.2 Datenaufnahme

### 5.2.1 Swissranger SR-3000

Für die Datenaufnahme wurde die Kamera auf einem Stativ befestigt. Um die richtige Integrationszeit zu wählen wurde entsprechend Kapitel 4.1 vorgegangen. Die Aufnahmedauer (Zeitspanne in der Bilder aufgezeichnet werden) wurde entsprechend der Integrationszeit (Zeitspanne in der ein Einzelbild aufgenommen wird) und der Aufnahmedistanz gewählt, so dass man ca. 300-500 Einzelbilder jedes Standpunktes erhielt, um die Einzelbilder anschließend mitteln zu können. Wie schon in Kapitel 4.1 erläutert, wurden Rohdaten aufgezeichnet um eine mögliche Herstellerkalibrierung zu umgehen. Die Aufnahmekonfiguration der insgesamt 100 Standpunkte ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Standpunkte	Integrationszeit	Aufnahmedauer	Anzahl Bilder	Normalabstand
1-10	150 x 200 $\mu s$	1 min	343	$d < 2 m$
11-44	255 x 200 $\mu s$	1 min 30 sec	319	$2 m < d < 3,5 m$
45-76	255 x 200 $\mu s$	2 min	425	$3,5 m < d < 4,5 m$
77-100	255 x 200 $\mu s$	2 min	425	$4,5 m < d < 7,5 m$

Tabelle 5.1: Aufnahmekonfiguration der einzelnen Standpunkte

Die Aufstellungspunkte für die Aufnahme der Bilder wurden so gewählt, dass der Kamerasensor mit jeder Farbe in jeder Entfernung möglichst komplett abgedeckt wurde und in jedem Bild möglichst viele Passpunkte zu sehen waren. Dafür wurden die Bilder bei den Aufnahmen 1-10 jeweils mit  $0^\circ$  und  $90^\circ$  Drehung um die optische Achse aufgenommen. Ab der Aufnahme 11 war es nötig, die Kamera mehrfach um die Stehachse des Statives zu schwenken, und es wurden Bilder mit einer Drehung von  $0^\circ$  und  $180^\circ$  um die optische Achse aufgenommen. Als Beispiel sei die Aufnahme in drei Metern Entfernung genannt: hier gab es drei Aufstellungspunkte und es wurden 34 (gemittelte) Bilder aufgenommen. Davon wurde eine Hälfte mit einer Drehung von  $0^\circ$  und die andere Hälfte mit einer Drehung von  $180^\circ$  um die optische Achse aufgenommen. Die Kamera musste daher 5-6 mal um die Stehachse des Statives geschwenkt werden. In Abb.5.6 ist die Situation noch einmal veranschaulicht. In Abb.5.7 sind die Standpunkte in einem Grundriss eingezeichnet.

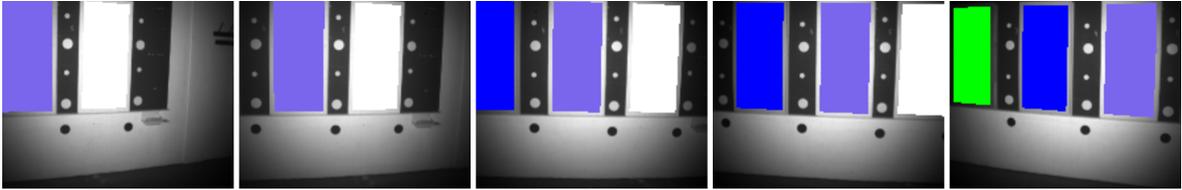


Abbildung 5.6: Schwenken der Kamera um die Stehachse des Statives. Anhand der lila Tafel ist ersichtlich, wie die Kamera geschwenkt wurde, um möglichst den kompletten Sensor mit der Farbe dieser Tafel abzudecken. Bei weiteren Aufnahmen wurde die Kamera um 180° um die optische Achse gedreht und der Vorgang wiederholt. Damit war der untere Teil des Sensors ebenfalls mit dieser Farbe abgedeckt.

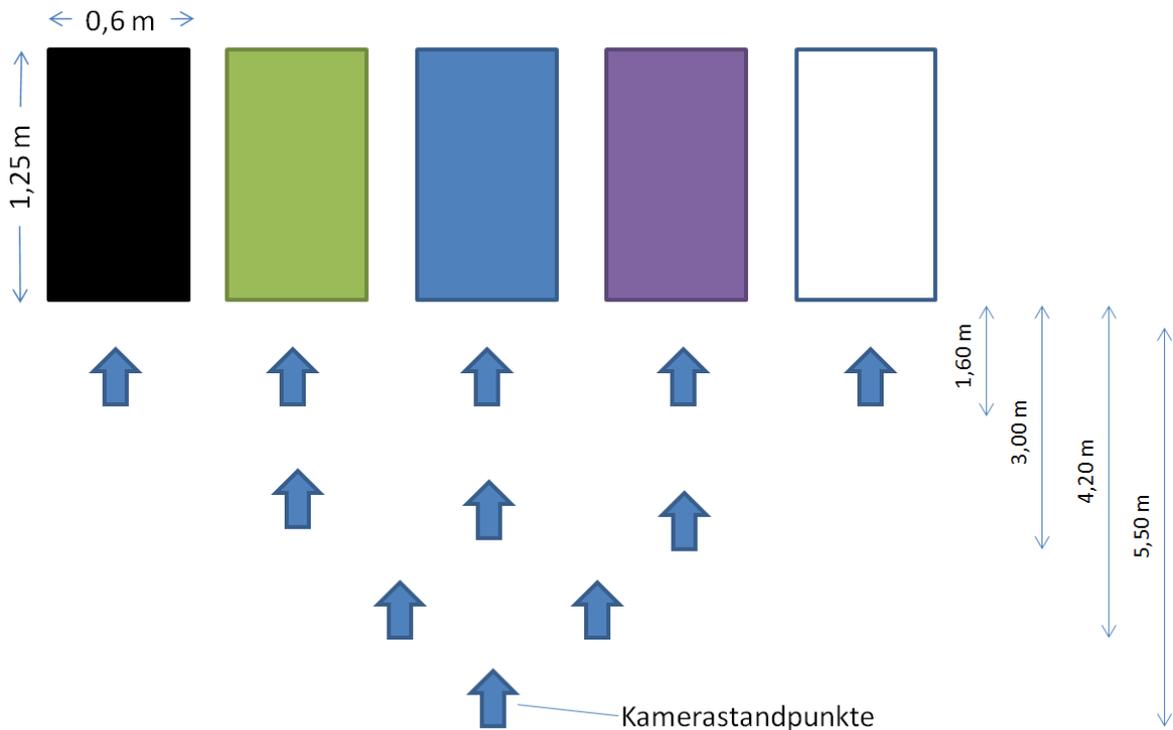


Abbildung 5.7: Aufnahmestandpunkte im Grundriss. Die Pfeile deuten den jeweiligen Aufstellungsort an.

### 5.2.2 Spektrometer

Um Referenzwerte für die Reflektivität der Tafeln zu erhalten, wurden die Reflektivitäten der verschiedenen Farben mit einem Spektrometer (Kapitel 4.2) gemessen. Um auch den Inzidenzwinkel zwischen den Flächennormalen der Tafeln und der Blickrichtung der Kamera zu berücksichtigen, wurde das Spektrometer in 5°-Schritten von 0°- 25° geschwenkt (Abb.5.8). Allerdings haben die Messungen gezeigt, dass die Winkelabhängigkeit kleiner ist als der Aufstellungsfehler, der bei Wiederholungsmessungen gemacht wird.

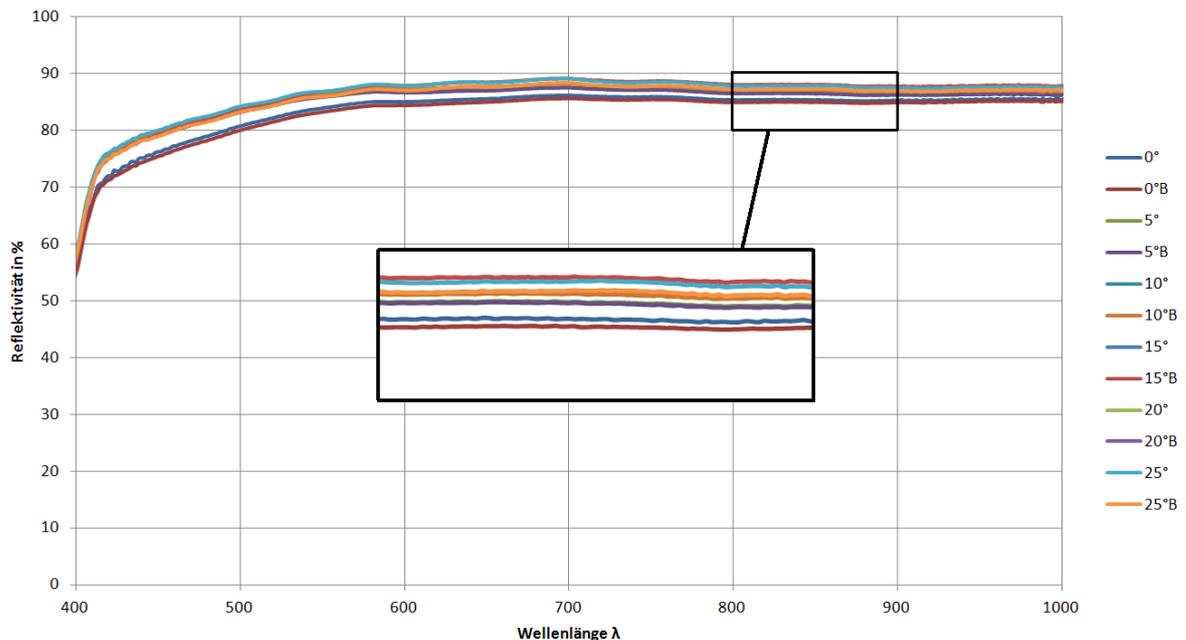


Abbildung 5.8: Reflektivität der weißen Tafel bei Änderung des Inzidenzwinkels von 0° bis 25°. Die Reflektivität jedes Winkels wurde zwei Mal an demselben Objektpunkt gemessen. Die zweite Messung ist mit „B“ gekennzeichnet. Die Vergrößerung zeigt den Wellenlängenbereich von 800 nm-900 nm. Die Winkelabhängigkeit variiert hier offensichtlich im Bereich von einigen Prozent. Es ist allerdings nicht klar erkennbar, ob der Effekt tatsächlich von den unterschiedlichen Winkeln, von Farbinhomogenitäten oder von anderen Einflüssen stammt.

Da keine signifikante Abweichung von einem Lambert'schen Strahler festgestellt werden konnte, wurde auf die Bestimmung einer Richtungsabhängigkeit der Reflektivität verzichtet und nur die Reflektivität für den Einfallswinkel 0° bestimmt. Der letztlich verwendete Wert ist ein arithmetischer Mittelwert aus vier Messungen an unterschiedlichen Stellen am Objekt. Jede dieser vier Messungen ist ein Mittelwert aus mindestens 16 geräteinternen Messungen. In der Grafik 5.9 ist die Reflektivitätskurve für die Farbe lila dargestellt. Hier sieht man, wie stark sich die Reflektivität mit der Wellenlänge ändert. Selbst bei Messung derselben Farbe bei 0° variiert die Reflektivität im Bereich von einigen Prozent. In Tabelle 5.2 sind die letztendlich verwendeten, gemittelten Reflektivitäten für die verschiedenen Farben aufgelistet. Es wurde eine Wellenlänge von 860 nm ausgewählt, da sie in der Nähe des Zentrums des optischen Filters und der Beleuchtung der SR-3000 liegt (Tabelle 4.1 und 4.3).

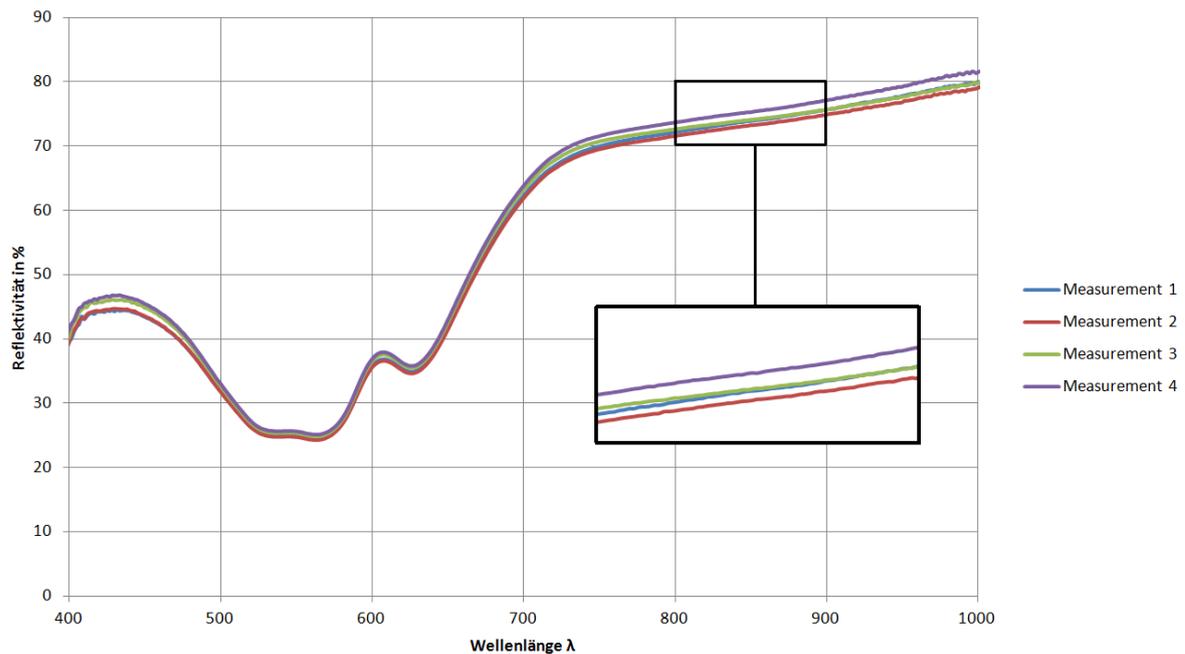


Abbildung 5.9: Vier Messungen der Reflektivität der lilafarbenen Tafel bei  $0^\circ$  Einfallswinkel. Die Vergrößerung zeigt den Wellenlängenbereich von  $800 \text{ nm}$ - $900 \text{ nm}$ , in dem auch der SR-3000 arbeitet. Hier sieht man, dass die Reflektivität bei Messung derselben Farbe im Bereich von einigen Prozent variiert.

Farbe	Wellenlänge $\lambda$	Reflektivität $\rho$
Schwarz	$860 \text{ nm}$	0,0267
Grün	$860 \text{ nm}$	0,3030
Blau	$860 \text{ nm}$	0,5648
Lila	$860 \text{ nm}$	0,7442
Weiß	$860 \text{ nm}$	0,8664

Tabelle 5.2: Verwendete Reflektivitäten

### 5.3 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung wurde mit Matlab [Matlab® (2013)] durchgeführt. Der Übersichtlichkeit halber wurde die Gesamtaufgabe in mehrere Teilschritte zerlegt. Der Vorteil dieser Vorgehensweise war, dass die Zwischenergebnisse einfacher auf deren Richtigkeit geprüft werden konnten.

Die innere Orientierung einer Kamera besteht aus der Position des Hauptpunktes  $x_0, y_0$  und der Kammerkonstante  $c_K$  ( $\hat{=}$  Brennweite). Weiters kann sie um zusätzliche Parameter erweitert werden. In dieser Kalibrierung wurde als zusätzlicher Parameter eine polynomiale radiale Verzeichnung 3. Grades verwendet [Kager *et al.* (2002)]. Die Werte sind in Formel (5.1) angeführt. In Abb.5.10 links ist die Lage des Sensorkoordinatensystems dargestellt. Die

innere Orientierung wurde für diese Kalibrierung als konstant angenommen.

$$IRP : \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ c_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 84.43 \\ -54.72 \\ 201.53 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

mit:  $IRP$  = Innere Orientierung  
 $x_0, y_0$  = Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes [in *Pixel*]  
 $c_K$  = Kamerakonstante [in *Pixel*]

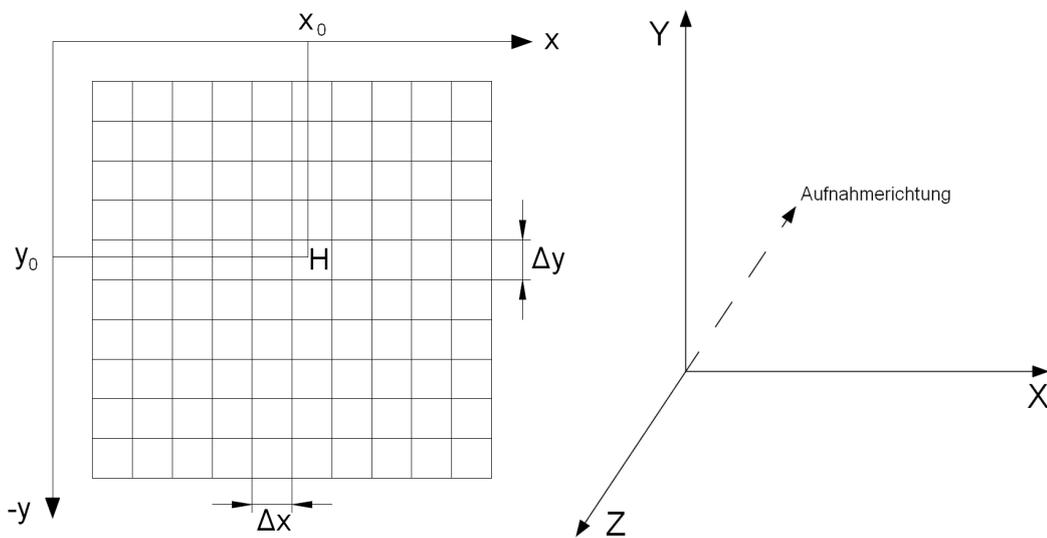


Abbildung 5.10: Verwendete Koordinatensysteme. *Links*: Sensorkoordinatensystem.  $-y$  entspricht den Zeilen,  $x$  entspricht den Spalten,  $H$  ist der Bildhauptpunkt an der Position  $x_0, y_0$ .  $\Delta x$  und  $\Delta y$  ist die Pixelgröße (beim SR-3000:  $40 \mu m$ ). *Rechts*: Objektkoordinatensystem. Die Kalibriertafeln liegen in der  $XY$ -Ebene, die Kamera schaut bei den Aufnahmen in Richtung  $-Z$ .

In Formel (5.2) und Formel (5.3) ist die Parametrisierung der äußeren Orientierung zu sehen. Formel (5.2) ist eine Translation vom Ursprung des Objektkoordinatensystems zum Projektionszentrum der Kamera, Formel (5.3) beschreibt die Verdrehung der Kamera relativ zum Objektkoordinatensystem. Das  $\omega\phi\kappa$ -System für die Parametrisierung der Verdrehung wurde verwendet, da die Bilder nahezu im Normalfall aufgenommen wurden. Es gibt auch andere Parametrisierungen der Rotationsmatrix, die in [Kraus *et al.* (1996)] erläutert werden. Das Objektkoordinatensystem, in dem die äußere Orientierung berechnet wurde, ist in Abb.5.10 rechts dargestellt.

$$ERP = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \dots in [m] \quad (5.2)$$

$$R_{\omega,\varphi,\kappa} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

### 5.3.1 Mittelung und Berechnung von Amplitude und Distanz

Wie in Kapitel 4.1 ausgeführt, wurden Rohdaten ( $\tau_0$ - $\tau_3$ ) aufgezeichnet. Aus diesen wurden mittels der Formel (3.1) die Phasenverschiebungen und in der Folge die Distanzen mit der Formel (3.4) berechnet, mittels Formel (3.2) die Amplituden (in %, 100 % entsprechen dem Wertebereich, den die Kamera aufzeichnen kann). Wenn der Fall eintritt, dass der gemittelte Phasenwinkel sehr nahe bei Null oder  $2\pi$  liegt, wurde eine Distanz gemessen, die größer als der Eindeutigkeitsbereich der verwendeten Modulationsfrequenz war. In diesem Fall wurde der Eindeutigkeitsbereich dazu addiert. Anschließend wurden aus den pro Standpunkt aufgenommenen Bildern das arithmetische Mittel berechnet, um zufällige Fehler zu minimieren. Des Weiteren wurden die Varianzen von den Distanz- und Amplitudenmessungen berechnet. In Abb.5.11 ist das Ergebnis dieses Schrittes zu sehen.

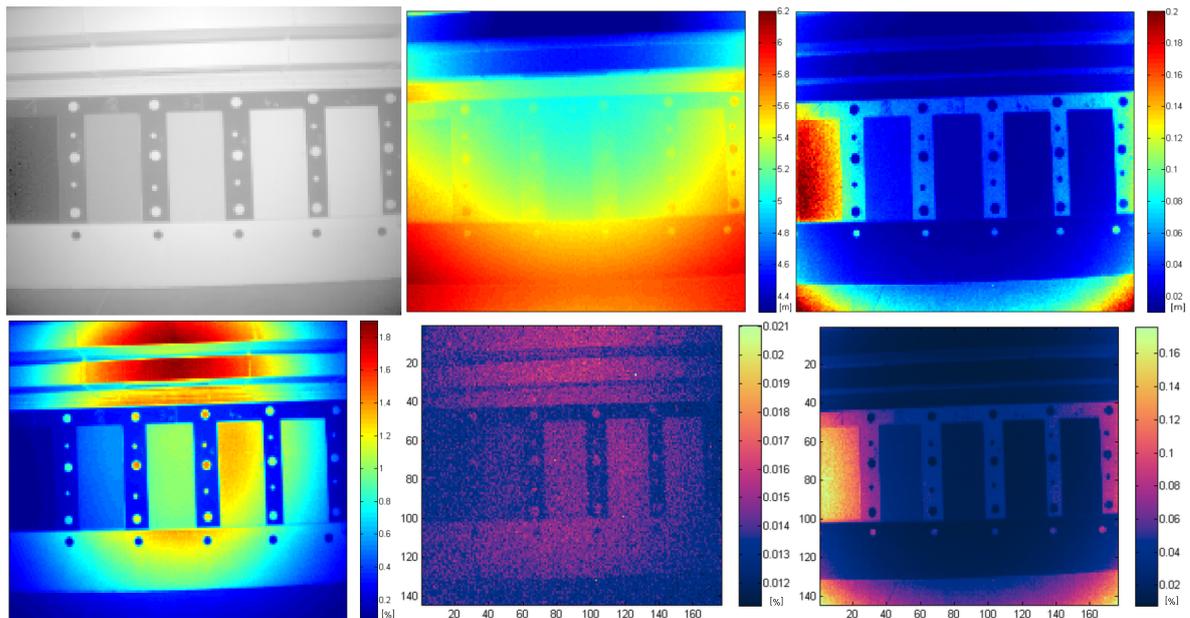


Abbildung 5.11: Ergebnis des Mittelungsprozesses des Bildes Nr. 82. *Obere Reihe (von links nach rechts):* Grauwertbild, Distanzbild, Standardabweichung der Distanzmessung. *Untere Reihe (von links nach rechts):* Linear skaliertes Amplitudenbild, Standardabweichung der Amplitude, Standardabweichung der Amplitude im Verhältnis zur Amplitude. Die mittleren Bilder und die Standardabweichungen wurden aus mehreren hundert Bildern ermittelt.

### 5.3.2 Orientierung der Bilder

Die Orientierung beschreibt die Ausrichtung der Kamera relativ zu dem Passpunktfeld. Die drei unabhängigen Parameter, die die Rotation der Kameradrehung definieren (Parametrisierung der Rotationsmatrix), werden über eine Rotationsmatrix mit neun Elementen dargestellt (Formel (5.3)). Wie man die tatsächlichen Winkeln aus der Rotationsmatrix extrahiert wird in [Kraus *et al.* (1996)] beschrieben. Die Position der Kamera im Raum wird durch einen Translations-Vektor angegeben, der die Verschiebung der Kamera relativ zum Ursprung des Objektkoordinatensystems beschreibt (Formel (5.2)).

Die Orientierung der Bilder besteht aus zwei Teilschritten

- Vororientierung
- Feinorientierung

Da die Passpunkte nicht codiert sind, muss die erste Zuordnung manuell erfolgen (Vororientierung). Um die Vororientierung zu berechnen, wurde der räumliche Rückwärtsschnitt nach Müller/Killian [Müller (1925)] und [Killian (1955)] verwendet. Dafür wurden in jedem Bild vier Passpunkte ausgewählt, die eine konvexe Hülle bilden sollten. Vier Passpunkte sind einer mehr als nötig, die überschüssige Information wird verwendet, um eine eindeutige Lösung zu erhalten, das ursprünglich nichtlineare Problem zu linearisieren, die Genauigkeit zu steigern und eine Fehlerkontrolle zu haben [Kraus *et al.* (1996)].

Für die Feinorientierung wurden mittels der im vorherigen Schritt ermittelten äußeren Orientierung die restlichen Passpunkte gesucht, die im Bild sichtbar waren. Dafür wurden alle Passpunkte, deren Koordinaten nach der Vorgehensweise von Kapitel 5.1.3 ermittelt wurden, mittels der Formeln (5.4) in die Bildebene projiziert. Danach wurden jene ausgewählt, die auch tatsächlich innerhalb der Sensorfläche lagen. Damit erhält man Näherungskoordinaten für die Positionen der restlichen Passpunkte. Mit der Information der bekannten Zielmarkengrößen wird nun die Umgebung rund um den Näherungswert mittels des Förstner-Operators [Kraus (2004)] abgesucht. Wird eine Zielmarke gefunden, dann wird eine Ellipse eingepasst, da ein Kreis im Objektraum auf der Bildebene als Ellipse abgebildet wird (wenn Kreis- und Bildebene nicht parallel sind, was im allgemeinen der Fall ist). Wichtig ist dabei der Kontrastunterschied zwischen Zielmarke und Hintergrund auf dem sie aufgeklebt ist. Falls dieser zu klein ist, können die Zielmarken nicht zuverlässig detektiert werden. Das ist der Grund für die weißen Zielmarken auf der grünen Tafel und der schwarzen auf der weißen Wand (siehe Abb.5.4). Weiters können in den Zielmarken, die zu nahe am Bildrand liegen, keine Ellipsen eingepasst werden, da für die Suche ein Suchfenster definiert werden muss, das größer als die Zielmarke ist. In Abb.5.12 sind links eingepasste Ellipsen zu sehen, rechts die in einem Bild gefundenen Zielmarken.

$$\begin{aligned}
 x &= x_0 - c_K \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\
 y &= y_0 - c_K \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

mit:  $x, y$  = Bildkoordinaten

$x_0, y_0$  = Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes

$c_K$  = Kamerakonstante

$r_{ij}$  = Elemente der Rotationsmatrix

$X_0, Y_0, Z_0$  = Objektkoordinaten des Projektionszentrums

$X, Y, Z$  = Objektkoordinaten

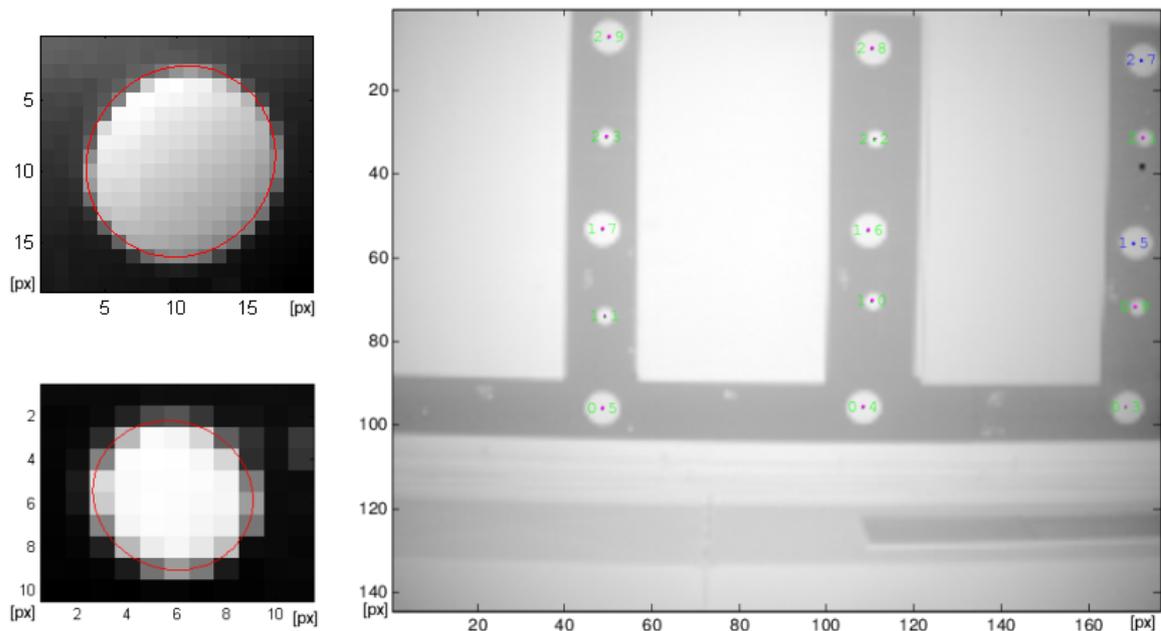


Abbildung 5.12: Feinorientierung. *Links*: Eingepasste Ellipsen in einem Zielpunkt, oben in 1,6 m Entfernung und unten in 3 m Entfernung. *Rechts*: Das Ergebnis der automatischen Zielpunktfindung. Die Punkte in Grün wurden Problemlos erkannt, die Punkte in Blau konnten nicht detektiert werden, da sie zu nahe am Bildrand liegen. Sie nehmen daher nicht an der Ausgleichung teil.

Mit allen Zielpunkten, die einwandfrei erkannt werden konnten, wird die Feinorientierung in einer robusten Ausgleichung bestimmt.

### 5.3.3 Erstellung von Masken

Um die mit Farbe besprühten Tafeln, d.h. die relevanten Bereiche für die Kalibrierung, aus den Bildern zu extrahieren, wurden Masken erstellt. Dafür wurden die Eckpunkte der Tafeln benötigt, welche bei der Bestimmung des Passpunktfeldes mitberechnet wurden. Dazu wurden die Eckpunkte in einem Foto beobachtet und im Objektraum mit einer Ebene geschnitten, die parallel zur XY-Ebene des Objekt-Koordinatensystems liegt (Abb.5.10 rechts), und die Z-Achse um die Dicke der Platten (die hinreichend genau bekannt ist) versetzt schneidet (GESTALT [Kraus *et al.* (1996)]). Die so berechneten Koordinaten wurden anschließend bei jeder Platte um 4 cm nach innen versetzt (d.h. die effektive Größe der Platte wurde verringert) um Mischpixel (Pixel, die sich aus Reflexionswerten unterschiedlicher Objekte zusammensetzen) aus der Farbe der Tafel und der Farbe des Hintergrundes zu vermeiden, da diese die Kalibration beeinträchtigen könnten. Mit Hilfe der im vorherigen Schritt berechneten Feinorientierung wurden die Objektpunkte in den Bildraum projiziert, Polygone erstellt und die entsprechenden Farben zugewiesen. In Grafik 5.13 ist das Ergebnis dieses Schrittes anhand des Bildes Nr. 82 dargestellt.

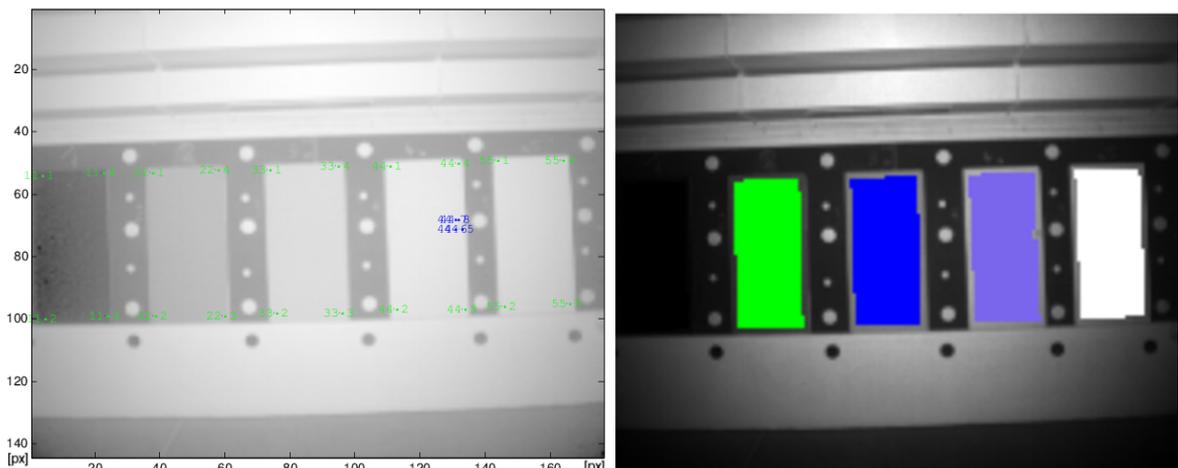


Abbildung 5.13: Erstellung der Farbmasken. *Links*: Man sieht die in den Bildraum projizierten Eckpunkte (um 4 cm nach innen verschoben) der Tafeln in grün. In Blau sind die Eckpunkte eines Bereiches gekennzeichnet der nicht an der Kalibrierung teilnehmen soll, da die Tafel in diesem Bereich beschädigt war. *Rechts*: Es sind die farbig maskierten Tafeln zu sehen.

### 5.3.4 Berechnung nomineller Distanzen

Um das Modell für die Kalibrierung erstellen zu können, ist es unter anderem nötig, die Distanzen der Tafeln sehr genau zu kennen. Mittels der zuvor bestimmten Feinorientierung konnten nun nominelle Distanzen berechnet werden. Das war nötig, da durch die Aufzeichnung von Rohdaten die Herstellerkalibrierung umgangen wurde, und so unkalibrierte Distanzen vorlagen, die im Zehner-cm-Bereich nicht stimmen. Selbst kalibrierte Distanzmessungen der Distanzkamera wären für das Modell der Kalibrierung schlechter geeignet. Die Messun-

gen wären kalibriert zwar genauer, aber dennoch verrauscht und damit zu unpräzise. Für die Berechnung wurden die Sehstrahlen der einzelnen Pixeln mit den Ebenen der Kalibriertafeln verschnitten. Um die Ebenen der Tafeln festzulegen, wurden die Zielmarken rund um die jeweiligen Tafeln (plus einem Offset der Tafeldicke) verwendet. Im Gegensatz zu der Erstellung der Masken, bei denen für alle Tafeln nur eine einzige Ebenen verwendet wurde, wurden in diesem Schritt fünf unterschiedliche Ebenen verwendet um die nominellen Distanzen möglichst genau berechnen zu können. In Abb.5.14 sind die berechneten Distanzen des Bildes Nr. 82 zu sehen.

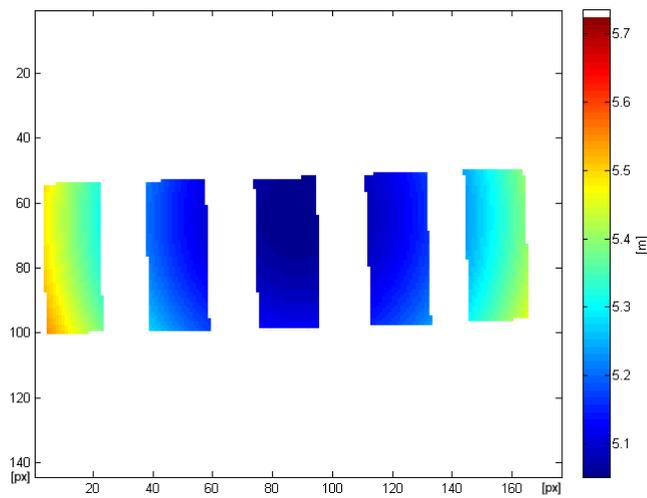


Abbildung 5.14: Berechnete Distanzen des Bildes Nr. 82. Es wurden nur Distanzen für die maskierten Bereiche berechnet. Außerhalb der Masken werden die die Distanzen gleich null gesetzt.

### 5.3.5 Berechnung von Soll-Amplituden

Für die Berechnung von Soll-Amplituden wurde die Farbe Blau in 1,6 m Entfernung als Referenz gesetzt. Dieser Wert kann frei gewählt werden, es ist allerdings vorteilhaft, eine geringe Distanz zu wählen da die Amplitude mit  $\frac{1}{d^2}$  abnimmt. Für diesen Wert  $A_{ref}$  wurde aus den Pixeln rund um den Hauptpunkt der Mittelwert berechnet. Danach wurde  $A_{ref}$  normalisiert auf Objektdistanz= 1 m, Integrationszeit=0 ( $\hat{=}$  kleinstmögliche Integrationszeit der Kamera, siehe unten)) und Reflektivität=100 %. Um den Einfluss der Integrationszeit zu eliminieren, wurde die Referenz-Amplitude mit dem Term  $\frac{1}{t+1}$  korrigiert. Mit dieser Formel bezieht man alle Amplituden auf dieselbe Integrationszeit, um sie vergleichbar zu machen. Die Integrationszeit entspricht dann 200  $\mu s$ , was der kleinstmögliche Wert der SR-3000 ist. Mittels der Formel (5.5) wurden die Soll-Amplituden berechnet (= Modell der Kalibrierung). Diese Soll-Amplituden sind von dem Einfluss der Reflektivität näherungsweise befreit (näherungsweise, da durch die Inhomogenität der aufgesprühten Farbe die Reflektivität um einige Prozent streut (Kapitel 5.2.2)).

$$A_{soll} = A_{ref} * \varrho * \frac{1}{d^2} * (t + 1) \quad (5.5)$$

mit:  $A_{soll}$  ... Soll-Amplitude [%]  
 $A_{ref}$  ... Referenzamplitude [%]  
 $\varrho$  ... mit Spektrometer ermittelte Reflektivität [0..1]  
 $d$  ... Nominelle Distanz [m]  
 $t$  ... verwendete Integrationszeit

# Kapitel 6

## Kalibrierfunktion

### 6.1 Differenz zwischen Modell und Messwerten

Die Kalibrierfunktion, die nun gesucht wird, soll die Differenz zwischen Soll-Amplituden (Modell) und gemessenen Amplituden beschreiben. Diese Amplitudendifferenz wurde berechnet, indem die Soll-Amplituden von den gemessenen Amplituden abgezogen wurden. Die Amplitudendifferenzen sind in der Mitte des Sensors größer und nehmen zum Sensorrand hin ab. In Abb.6.1 sind diese Differenzen abhängig von der Sensorposition grafisch dargestellt. Um die Differenz besser zu veranschaulichen, wird sie in mehreren verschiedenen Ansichten dargestellt.

### 6.2 Gesamtkalibrierung

Die Kalibrierfunktion setzt sich aus mehreren Kalibriertermen zusammen, die alle bestimmte Fehler beschreiben, von denen angenommen wird dass sie einen Einfluss auf diese Amplitudendifferenz haben. Es soll zunächst das Ergebnis der gesamten Kalibrierfunktion veranschaulicht werden, im (Kapitel 6.3) soll danach auf den Einfluss der einzelnen Kalibrierterme genauer eingegangen werden. Nach Anbringung der mittels der Kalibrierfunktion berechneten Werte an die gemessene Amplitude sollten die Amplitudendifferenzen null (bzw. möglichst klein) werden.

Um Parameter für die Funktionen zu schätzen, wurde ein vermittelnder Ausgleich (auch Gauß-Markov-Modell genannt) gerechnet. Der Formelsatz dafür ist z.B. in [Kraus (2004)] zu finden. Als Beobachtungen fließen in die Ausgleichung alle berechneten Amplitudendifferenzen der Kalibriertafeln ein. Die Anzahl der Amplituden-Beobachtungen, die pro Pixel vorhanden sind, sind in Abb.6.2 dargestellt. Die Anzahl der Amplituden-Beobachtungen sortiert nach Farben befinden sich im Anhang A.1. Die Parameter der Ausgleichung sind die gesuchten Koeffizienten der Kalibrierfunktion. Die Startwerte der Koeffizienten für die Ausgleichung wurden geschätzt, indem die Kalibrierfunktion geplottet und optisch mit den Werten des Dif-

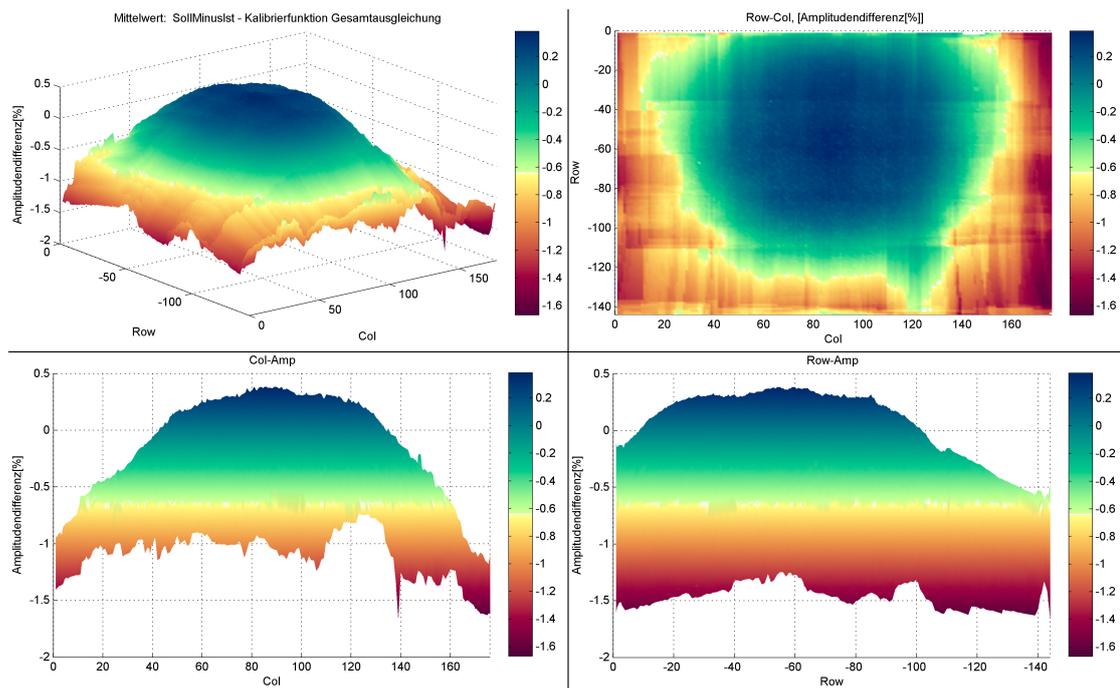


Abbildung 6.1: Mittelwert der Amplitudendifferenz zwischen Modell und gemessenen Amplituden. *Links oben:* Hier ist eine 3D-Ansicht der Differenz zwischen dem Modell, das mittels der Formel (5.5) berechnet wurde, und den gemessenen Amplituden, abhängig von der Sensorposition. *Alle anderen Ansichten:* Zeigen die Risse der 3D-Ansicht, um die Extremwerte besser erkennen zu können. Der Mittelwert wurde aus allen Beobachtungen ( $\sim 0.6 Mio.$ ) berechnet. In der Draufsicht rechts oben erkennt man, dass die Amplitudenresiduen radialsymmetrisch um den Bildhauptpunkt liegen.

ferenzmodells verglichen wurden. Die Qualität der geschätzten Parameter der Ausgleichung ist in den Pixeln, in denen viele Beobachtungen vorhanden sind, besser.

Um die Qualität der Kalibrierfunktion beurteilen zu können, wurde die Amplitudendifferenz abhängig von den verschiedenen Einflussgrößen vor und nach der Ausgleichung geplottet und optisch verglichen (Abb.6.3: Amplitudendifferenz vs. Distanz, Abb.6.4: Amplitudendifferenz vs. Inzidenzwinkel, Abb.6.5: Amplitudendifferenz vs. Reflektivität, Abb.6.6: Amplitudendifferenz vs. Sensorposition, Abb.6.7: Amplitudendifferenz vs. Integrationszeit, Abb.6.8: Amplitudendifferenz vs. beobachtete Amplituden). In den nachfolgenden Grafiken ist ersichtlich, dass die minimalen und die maximalen Amplitudendifferenzen vor der Ausgleichung einen Bereich von  $-5,1\%$  bis  $+0,9\%$  abdecken. Nach der Ausgleichung verkleinern sich diese Differenzen auf  $-2,7\%$  bis  $+1,2\%$ , ein Großteil der Amplitudendifferenzen liegt dabei nach der Ausgleichung in einem Bereich zwischen  $-1,0\%$  und  $+0,8\%$  (Abb.6.9). Vergleicht man das Differenzmodell (Abb.6.1) mit dem Ergebnis der Kalibration (Abb.6.10) so sieht man, dass die Amplituden näherungsweise in einer Ebene zu liegen kommen und der Randlichtabfall stark reduziert ist. Eine 3D-Ansicht des Mittelwertes der kalibrierten Amplitudendifferenz samt Rissen, abhängig von der Sensorposition, ist in Abb.6.10 dargestellt.

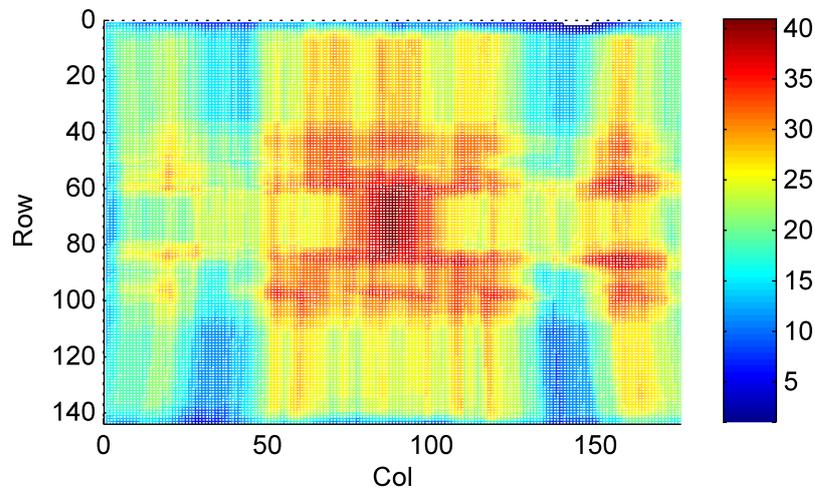


Abbildung 6.2: Anzahl der Beobachtungen pro Pixel, die in die Ausgleichung eingeflossen sind.

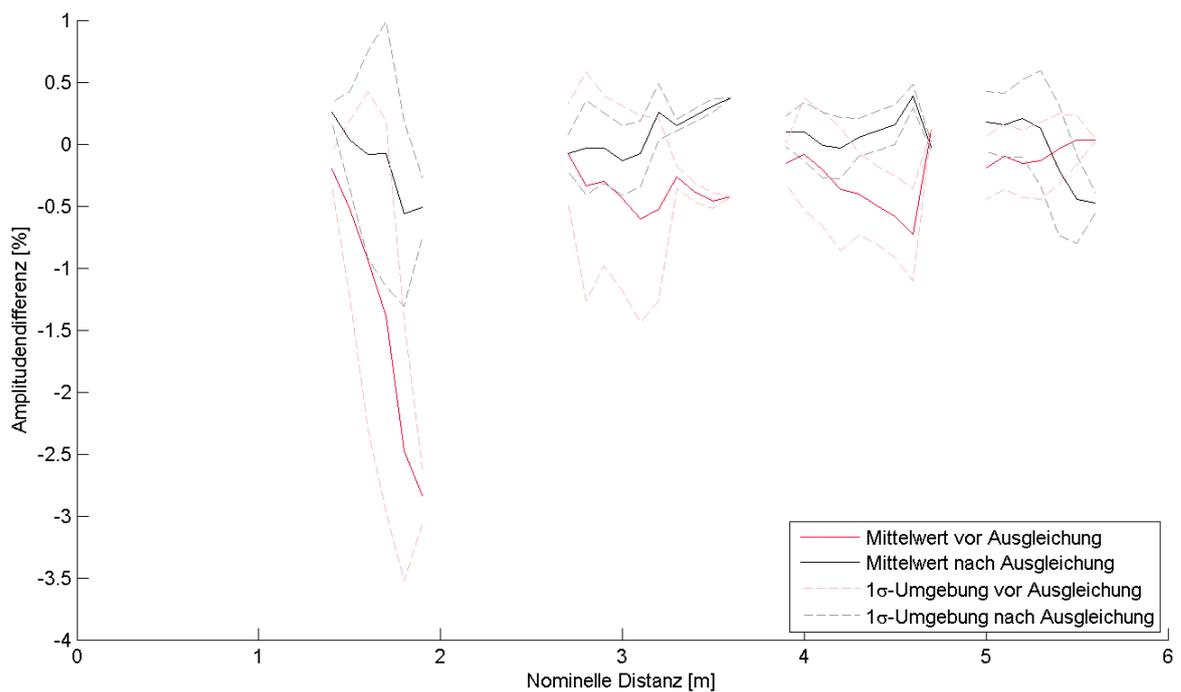


Abbildung 6.3: Amplitudendifferenzen vs. Distanz. Die rote Kurve zeigt die Amplitudendifferenzen vor der Kalibrierung, die schwarze die Amplitudendifferenzen nach der Kalibrierung. Die strichlierten Linien zeigen die  $1\sigma$ -Umgebung (1-fache Standardabweichung) vor und nach der Kalibrierung. Vor allem die Amplitudendifferenzen in der kürzesten Distanz haben sich stark verkleinert, aber auch bei den anderen Distanzen kommen die Amplitudendifferenzen nach der Kalibrierung besser um null herum zu Liegen.

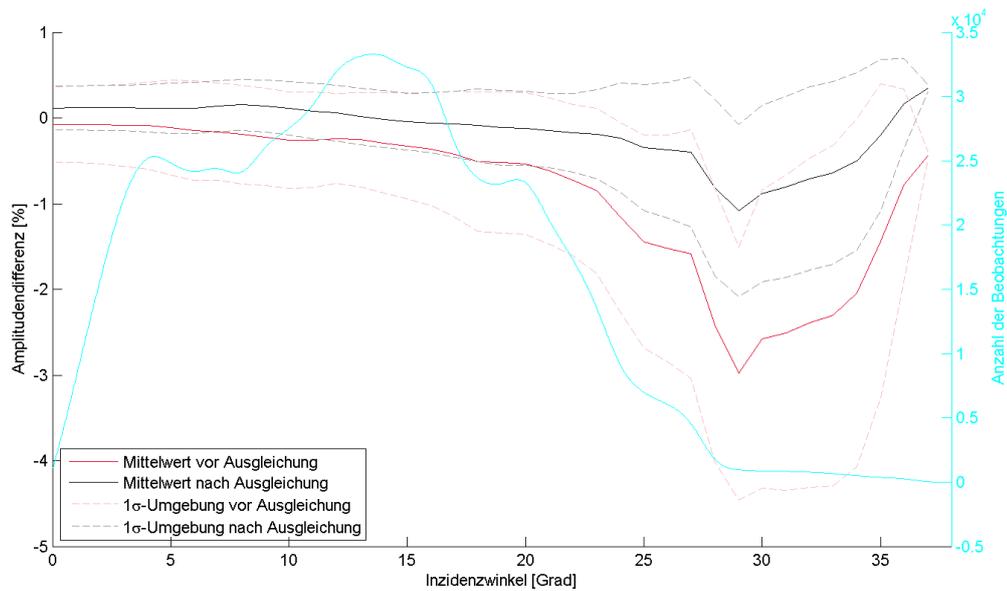


Abbildung 6.4: Amplitudendifferenzen vs. Inzidenzwinkel. Die rote Kurve zeigt die Amplitudendifferenzen vor der Kalibrierung, die schwarze die Amplitudendifferenzen nach der Kalibrierung. In Türkis ist die Anzahl der Beobachtungen abhängig vom Inzidenzwinkel geplottet. In den Bereichen mit vielen Beobachtungen ist die Qualität der Kalibrierung höher. Ab einem Inzidenzwinkel von  $\sim 28^\circ$  gibt es nur sehr wenige Beobachtungen, ab hier sind die Abweichungen von null deutlich größer. Aufgrund der Ergebnisse der Spektrometermessung (Kapitel 5.2.2) wurde hier eigentlich kein Einfluss erwartet.

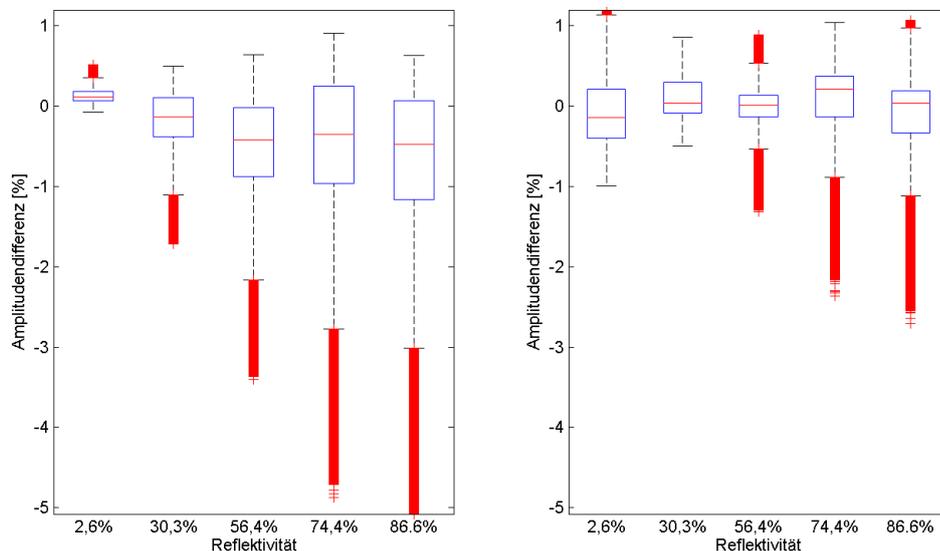


Abbildung 6.5: Amplitudendifferenzen vs. Reflektivität. *Links*: Boxplot der Amplitudendifferenzen vor der Kalibrierung. *Rechts*: Boxplot der Amplitudendifferenzen nach der Kalibrierung. Der rote horizontale Strich ist der Median der jeweiligen Reflektivität, die blaue Box repräsentiert den Interquartilsabstand (Daten zwischen unteren  $Q_{0.25}$  und oberen  $Q_{0.75}$  Quartil), d.h. 50 % der Daten liegen darin. Die Antennen (Whisker) zeigen die Daten, die innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes liegen. Die roten Punkte sind Daten die außerhalb liegen.

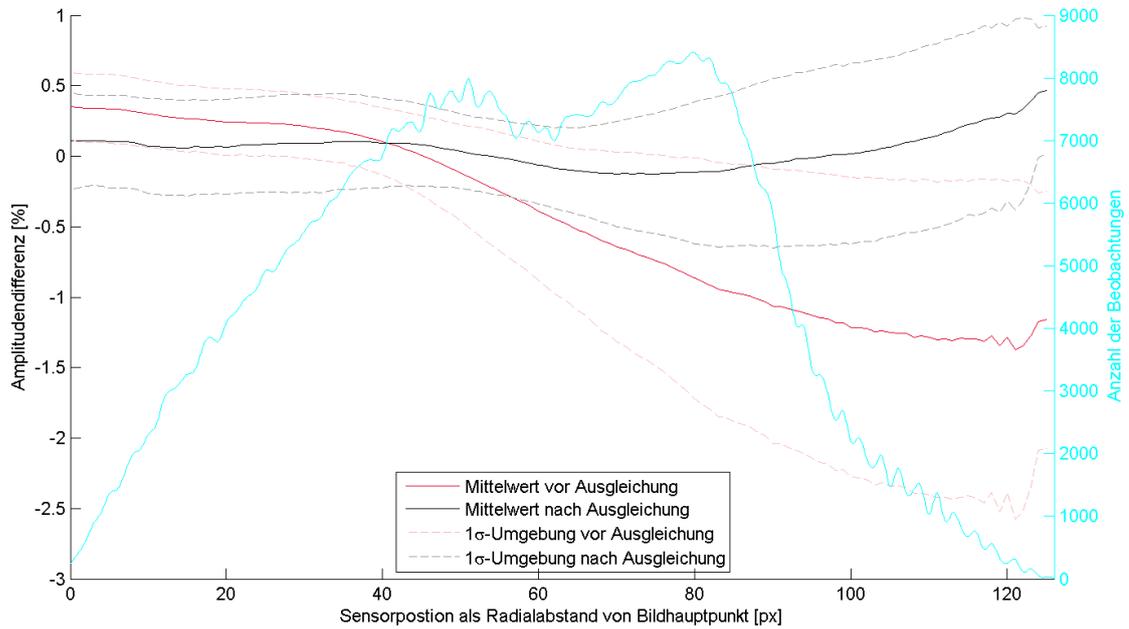


Abbildung 6.6: Amplitudendifferenzen vs. Sensorposition (radialsymmetrischer Abstand von Bildhauptpunkt). Die rote Kurve zeigt die Amplitudendifferenzen vor der Kalibrierung, die schwarze die Amplitudendifferenzen nach der Kalibrierung. Es ist zu sehen, dass die Amplitudendifferenz vor der Kalibrierung zum Sensorrand hin größer wird, was sich nach der Kalibrierung stark verbessert hat.

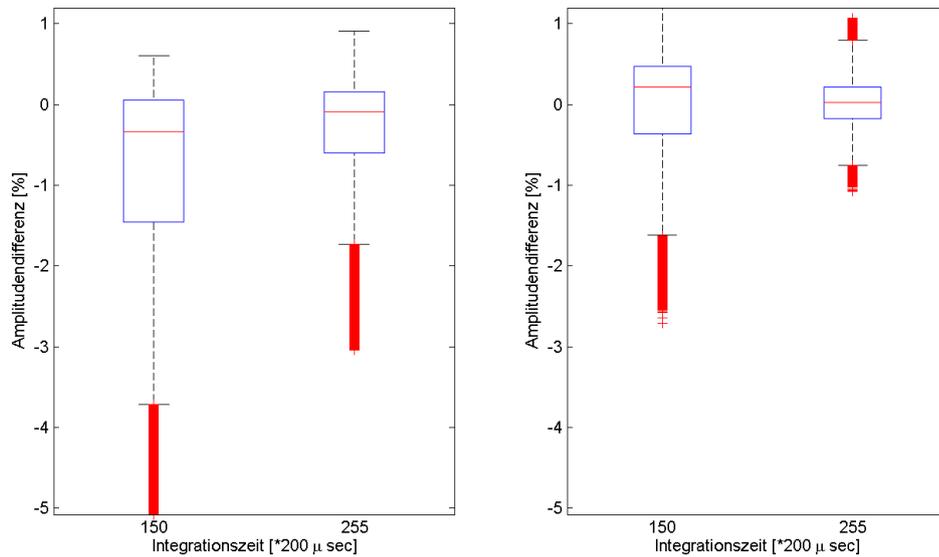


Abbildung 6.7: Amplitudendifferenzen vs. Integrationszeit. *Links*: Amplitudendifferenzen vor der Kalibrierung. *Rechts*: Amplitudendifferenzen nach der Kalibrierung. Die Amplitudendifferenzen kommen nach der Kalibrierung besser um null herum zu Liegen als vor der Kalibrierung.

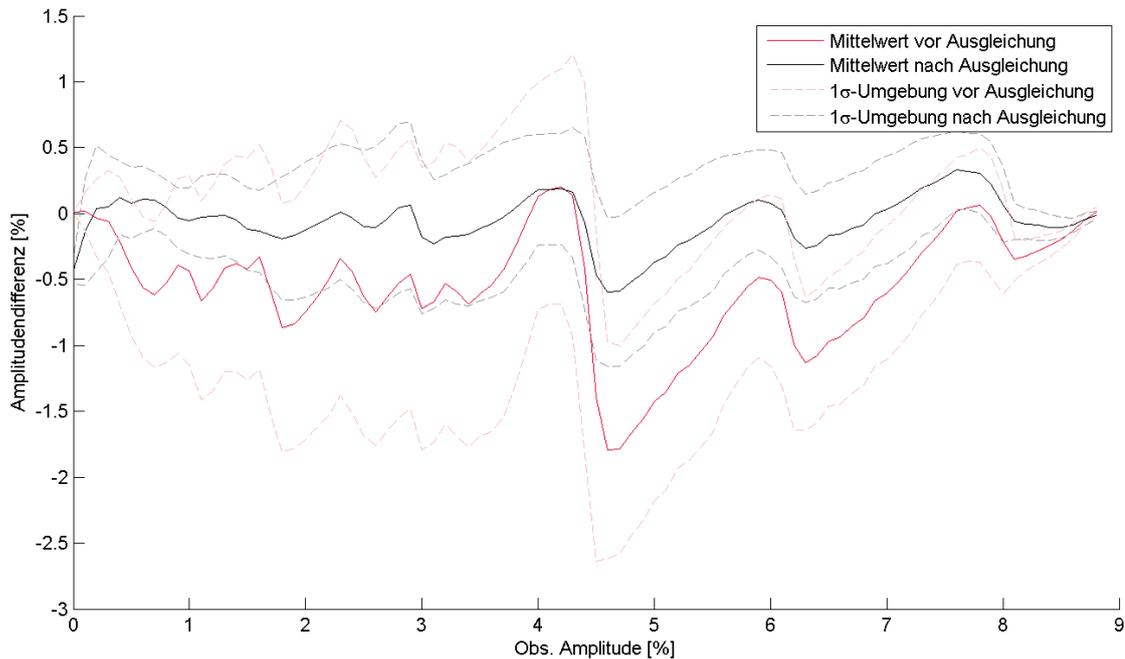


Abbildung 6.8: Amplitudendifferenzen vs. beobachtete Amplituden. Die rote Kurve zeigt die Amplitudendifferenzen vor der Kalibrierung, die schwarze die Amplitudendifferenzen nach der Kalibrierung. Auch hier ist zu sehen, dass die Mittelwerte nach der Kalibrierung besser rund um null zu Liegen kommen. Die maximalen beobachteten Amplituden von  $\sim 9\%$  kommen daher, dass für die Berechnung der Wertebereich verwendet wurde, den die Kamera maximal aufzeichnen kann (Kapitel 5.3.1). Auffällig sind die Schwingungen, die hier zu sehen sind. Dem Grund nachzugehen hätte aber den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

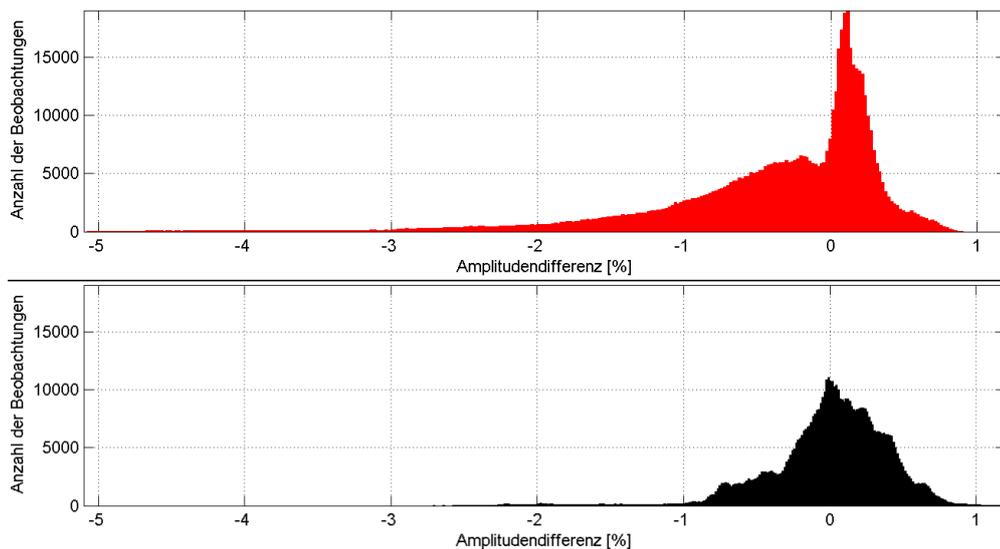


Abbildung 6.9: Anzahl der Beobachtungen pro Amplitudendifferenz. *Oben:* Vor der Ausglei-chung. *Unten:* Nach der Ausglei-chung. Nach der Ausglei-chung verkleinert sich der Bereich der Amplitudendifferenzen. Ein Großteil der Amplitudendifferenzen kommt in einen Bereich zwischen  $-0,3\%$  und  $+0,6\%$  zu Liegen.

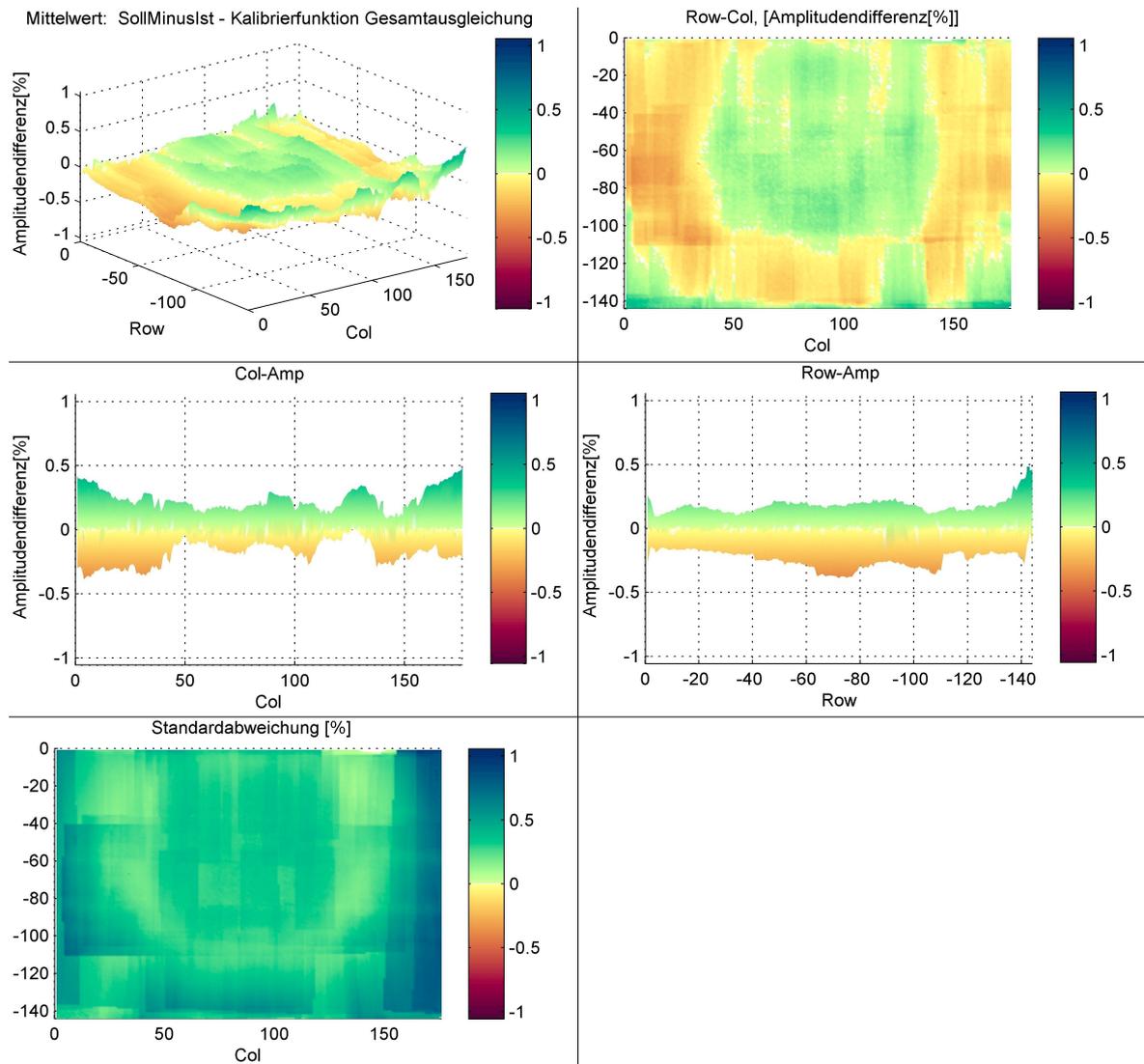


Abbildung 6.10: Mittelwert der Amplitudenresiduen a posteriori abhängig von der Sensorposition. Im Mittel kommen die Amplitudendifferenzen in einem Bereich von ca.  $-0,4\%$  bis  $+0,4\%$  zu liegen. *Oben Links*: 3D-Ansicht des Mittelwertes der kalibrierten Amplituden. *Oben Rechts*: Draufsicht. *Mitte*: Seitenrisse. *Unten Links*: Standardabweichung.

### 6.3 Kalibrierterme

Der Einfluss der einzelnen Terme der Kalibrierfunktion (6.1) zur gesamten Kalibrierfunktion wurde mittels Plots visuell validiert. Dafür wurden die Amplitudendifferenzen abhängig von den verschiedenen Einflussgrößen geplottet, wobei aus der gesamten Kalibrierfunktion (6.1) der zu untersuchende Term weggelassen wurde. Dadurch zeigt sich die Auswirkung genau dieses Terms auf die Gesamtkalibrierung. Weiters wurde der Graph des aktuellen Terms dazu geplottet. Wenn die Differenz zwischen Term und Daten einen gewissen Grenzwert überschritt, wurde er durch andere Terme ersetzt, bis er sich besser an die Daten anpasste. Weiters wurden Grafiken erstellt, in denen die kalibrierten Amplituden abhängig von der Sensorposition geplottet wurden. Dem wurde die kalibrierte Amplitude ohne den jeweiligen Einfluss, der visualisiert werden sollte, gegenübergestellt. Diese Grafiken befinden sich im Anhang A.2.

$$f_{Kalibration} = f_{Amp} + f_{Radsym} + f_{IntZeit} + f_{Dist} + f_{Frequ} + f_{Refl} \quad (6.1)$$

mit:  $f_{Kalibration}$  = gesamte Kalibrierfunktion  
 $f_{Amp}$  = Einfluss der gemessenen Amplitude  
 $f_{Radsym}$  = Einfluss des Lichtabfalls zum Rand hin  
 $f_{IntZeit}$  = Einfluss der Integrationszeit  
 $f_{Dist}$  = Einfluss der Distanz  
 $f_{Frequ}$  = periodischer Einfluss der Frequenz  
 $f_{Refl}$  = Einfluss der Reflektivität

Der Term  $f_{Refl}$  hat den Nachteil, dass für seine Anwendung Wissen über den Objektraum nötig ist, das im Allgemeinen nicht verfügbar ist. Dass der Parameter dieses Terms nicht null ist, lässt aber darauf schließen, dass es Restfehler von der Spektrometermessung gibt, die z.B. von der Inhomogenität der Farbe kommen könnte.

### 6.3.1 Einfluss der gemessenen Amplitude

Der Kalibrierterm (6.2) verwendet die beobachtete Amplitude für die Kalibrierung. Die erste Annahme des Terms mit  $f_{Amp} = \frac{a_{30}}{amp}$  stellte sich als zu ungenau heraus und wurde deshalb mit  $a_{31} * amp^2$  erweitert. Der Einfluss dieses Terms ist in Abb.6.11 dargestellt.

$$f_{Amp} = \frac{a_{30}}{amp} + a_{31} * amp^2 \quad (6.2)$$

mit:  $f_{Amp}$  = Term der Kalibrierfunktion (6.1)

$a_{30}, a_{31}$  = Koeffizienten

$amp$  = beobachtete Amplitude

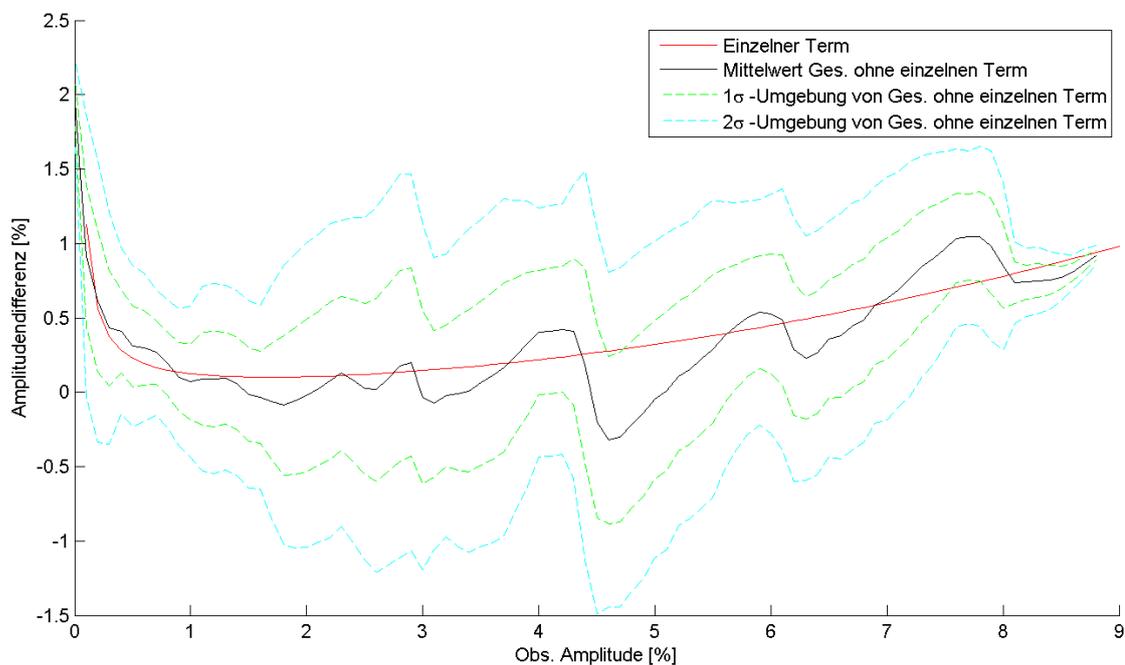


Abbildung 6.11: Korrekturterm: Einfluss der gemessenen Amplitude. *Schwarz*: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss des Korrekturterms  $f_{Amp}$ . *Rot*: Graph des Korrekturterms  $f_{Amp}$ . Die strichlierten Linien zeigen die  $1\sigma$  und die  $2\sigma$ -Umgebung. Aufgrund der Abbildung ist zu vermuten, dass die Amplitude verrauscht ist. Daher passt sich der Term der Kalibrierfunktion nur näherungsweise an die Daten an. Da sich der Graph des Terms aber fast durchgehend innerhalb der  $1\sigma$ -Umgebung der Daten befindet (jedenfalls aber in der  $2\sigma$ -Umgebung) ist die Abweichung nicht signifikant.

### 6.3.2 Einfluss des radialsymmetrischen Randlichtabfalls

Der Randlichtabfall von Objektiven wird in der Photogrammetrie üblicherweise mit dem  $\cos^4 \tau$ -Gesetz modelliert [Kraus (2004)]. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben fällt bei RIM-Kameras aber auch die Intensität der LED's zum Rand hin ab, d.h. der Randlichtabfall ist hier eine Mischung von zwei Effekten. Dieser Einfluss soll mit dem Term (6.3) abhängig von der Sensorposition korrigiert werden. Höhere Grade des Polynoms wurden ebenfalls getestet, brachten aber keine Verbesserung des Ergebnisses. Der Einfluss dieses Terms ist in Abb.6.12 dargestellt.

$$f_{Radsym} = a_1 * r^2 \quad (6.3)$$

mit:  $f_{Radsym}$  = Term der Kalibrierfunktion (6.1)

$a_1$  = Koeffizient

$r$  = radialer Abstand zwischen Bildhauptpunkt und Pixelposition

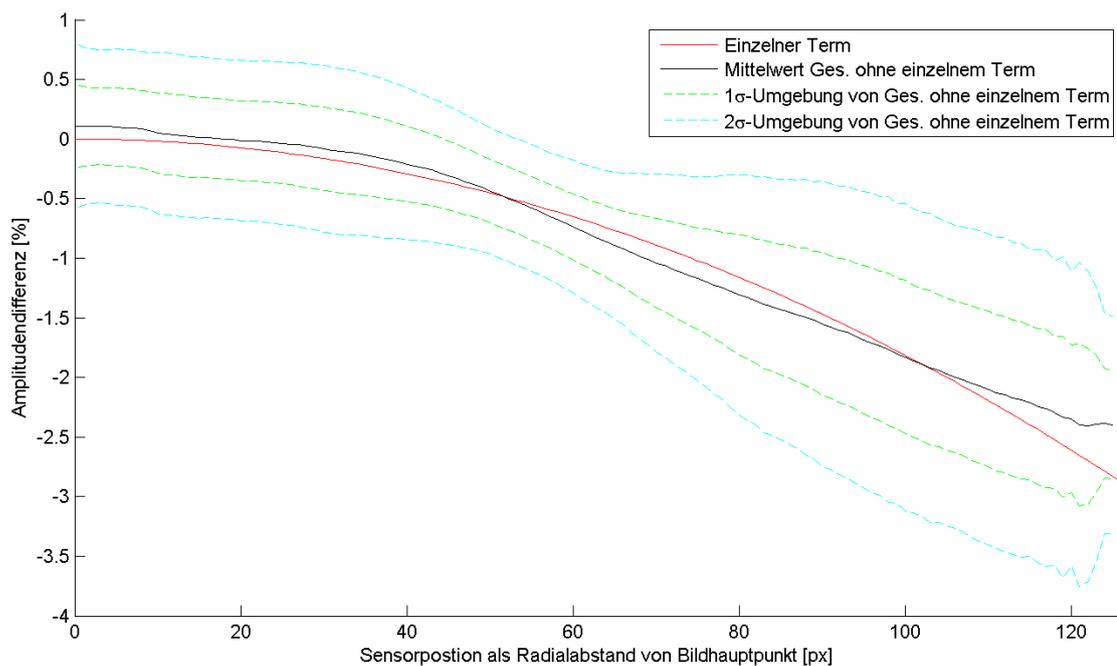


Abbildung 6.12: Korrekturterm: radialsymmetrischer Randlichtabfall der Amplitude. Schwarz: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss des Korrekturterms  $f_{Radsym}$ . Rot: Graph des Korrekturterms  $f_{Radsym}$ . Es ist zu sehen, dass dieser Term einen sehr starken Einfluss auf die Gesamtkalibrierung hat. Der Term nähert sich sehr gut an die Daten an und befindet sich durchgehend innerhalb der 1 $\sigma$ -Umgebung.

### 6.3.3 Einfluss der Integrationszeit auf die Amplitude

Die verwendeten Integrationszeiten waren  $150 \times 200 \mu\text{s}$  und  $255 \times 200 \mu\text{s}$ . Entsprechend dieser Integrationszeiten ergaben sich Verschiebungen der Amplituden. Wie man in Abb.6.13 sieht, ist der Einfluss dieses Kalibrierterms sehr klein. Dieser Einfluss wird mit dem linearen Term (6.4) kalibriert.

$$f_{IntZeit} = pnTime * IntZeit \quad (6.4)$$

mit:  $f_{IntZeit}$  = Term der Kalibrierfunktion (6.1)

$pnTime$  = Koeffizienten

$IntZeit$  = verwendete Integrationszeit

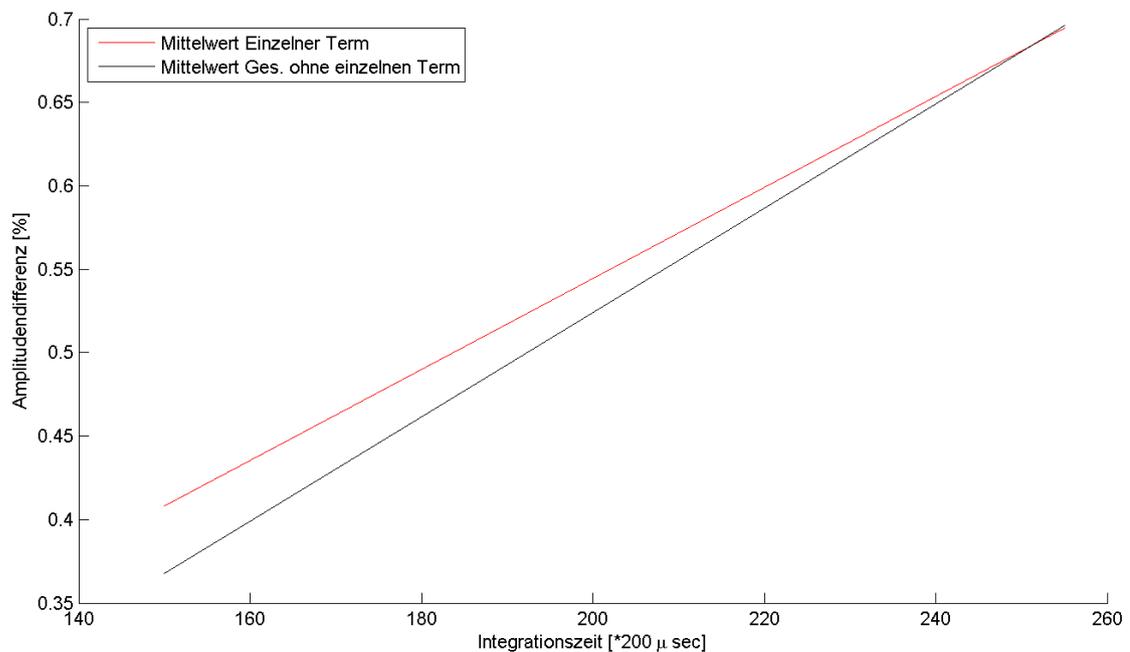


Abbildung 6.13: Korrekturterm: Einfluss der Integrationszeit. *Schwarz*: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss des Korrekturterms  $f_{IntZeit}$ . *Rot*: Graph des Korrekturterms  $f_{IntZeit}$ . Dieser Term hat nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Gesamtkalibrierung.

### 6.3.4 Einfluss der Reflektivität auf die Amplitude

Die verwendete Reflektivität wurde aus mehreren Spektrometermessungen gemittelt. Als Wellenlänge  $\lambda$  wurde jene verwendet, die der Messwellenlänge der SR-3000 am nächsten kommt. Um den Fehler dieser Annahmen zu korrigieren, wurde der Kalibrierterm (6.5) verwendet. Es wurde auch versucht, für jede der fünf unterschiedlichen Reflektivitäten einen eigenen Koeffizienten anzusetzen, der Term (6.5) brachte aber bessere Ergebnisse. Der Einfluss dieses linearen Kalibrierterms ist in Abb.6.14 zu sehen.

$$f_{Ref1} = r_6 * refl \quad (6.5)$$

mit:  $f_{Ref1}$  = Term der Kalibrierfunktion (6.1)

$r_1$  = Koeffizient

$refl$  = Reflektivität

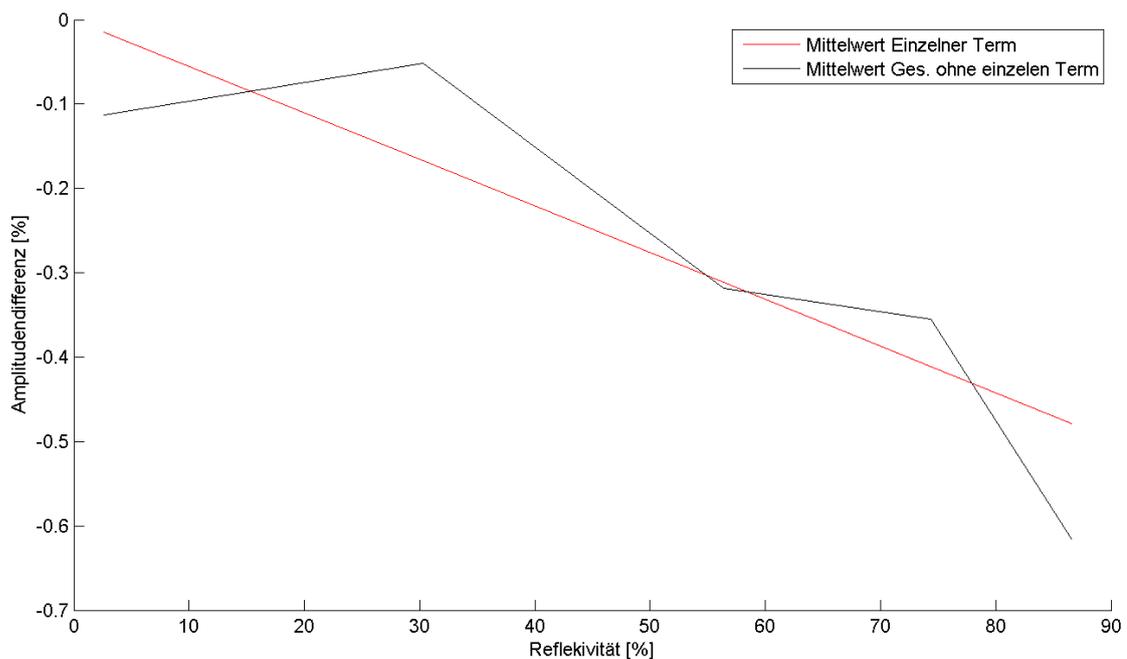


Abbildung 6.14: Korrekturterm: Einfluss der Reflektivität auf die Amplitude. *Schwarz*: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss des Korrekturterms  $f_{Ref1}$ . *Rot*: Graph des Korrekturterms  $f_{Ref1}$ .

### 6.3.5 Einfluss der Distanz auf die Amplitude

Der Distanzeinfluss auf die Amplitude wurde mit zwei unterschiedlichen Termen kalibriert. Der erste Term verwendet die nominellen Distanzen. Für die Erstellung des Modells wurde die Information verwendet, dass die Amplitude mit  $\frac{1}{d^2}$  abnimmt. Da hier aber noch andere Einflüsse wirken, die nicht modelliert wurden, werden diese Einflüsse mittels des Kalibrierterms (6.6) kalibriert. Der Einfluss ist in Abb.6.15 zu sehen.

$$f_{Dist} = \frac{d_1}{dist^2} \quad (6.6)$$

mit:  $f_{Dist}$  = Term der Kalibrierfunktion (6.1)

$d_1$  = Koeffizient

$dist$  = nominelle Distanz

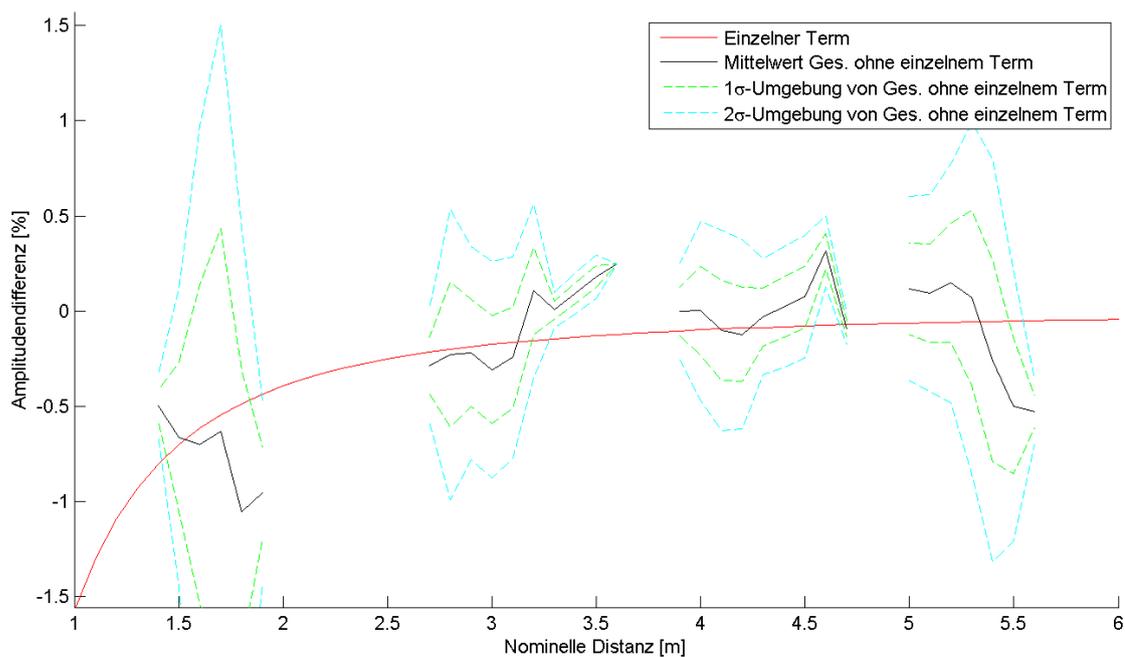


Abbildung 6.15: Korrekturterm: Einfluss der Distanz auf die Amplitude. *Schwarz*: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss des Korrekturterms  $f_{Dist}$ . *Rot*: Graph des Korrekturterms  $f_{Dist}$ . Dieser Term passt sich ebenfalls nur bedingt gut an die Daten an.

Der zweite Term (6.7) ist ein periodischer Einfluss der Distanz auf die Amplitudenbeobachtungen und wurde in Anlehnung an [Karel & Pfeifer (2009)] ausgewählt. In [Karel & Pfeifer (2009)] werden zwei  $d$ -Koeffizienten verwendet, hier nur einer, da bei Verwendung von zwei Koeffizienten die Korrelation der beiden bei fast 100% lag. Der Parameter  $Ux$  wurde mitgeschätzt, da die eingestellte Frequenz der Kamera nicht exakt stimmt. Der Einfluss ist in Abb.6.16 zu sehen.

$$f_{Frequ} = d_5 * \sin\left(\frac{\pi * Ux * dist}{U}\right) + d_5 * \cos\left(\frac{\pi * Ux * dist}{U}\right) \quad (6.7)$$

mit:  $f_{Frequ}$  = Term der Kalibrierfunktion (6.1)

$d_5, Ux$  = Koeffizienten

$dist$  = nominelle Distanz

$U$  = Eindeutigkeitsbereich, berechnet mit Formel (2.12)

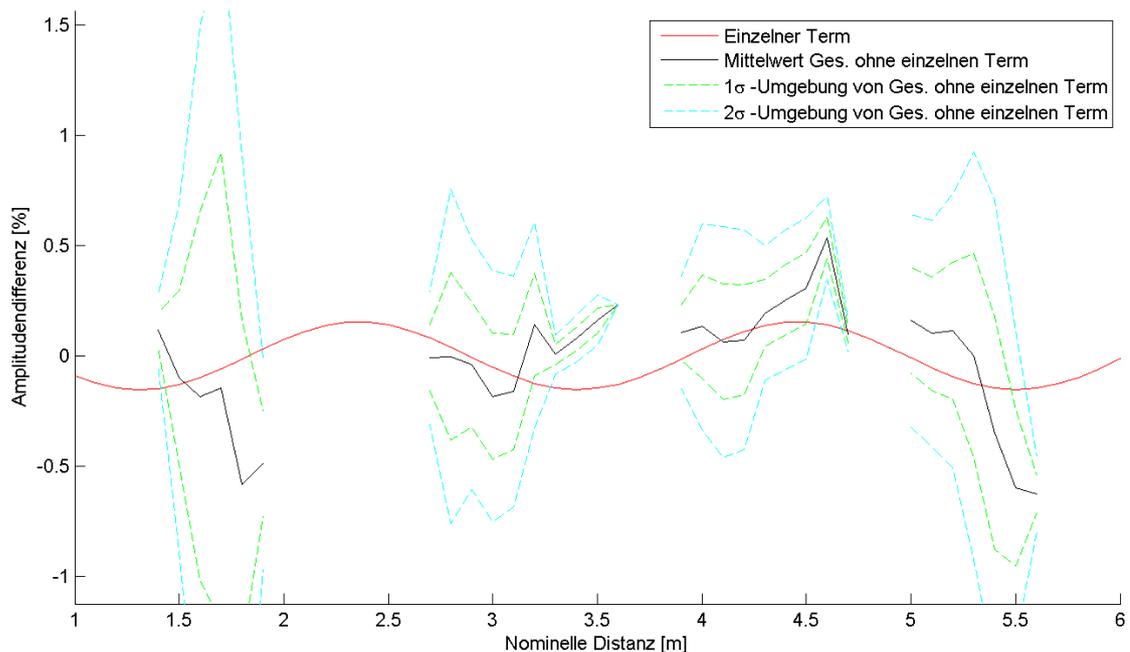


Abbildung 6.16: Korrekturterm: Periodischer Einfluss der Frequenz auf die Amplitude. Schwarz: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss des Korrekturterms  $f_{Frequ}$ . Rot: Graph des Korrekturterms  $f_{Frequ}$ .

Abb.6.17 zeigt den Einfluss der beiden distanzabhängigen Terme zusammen.

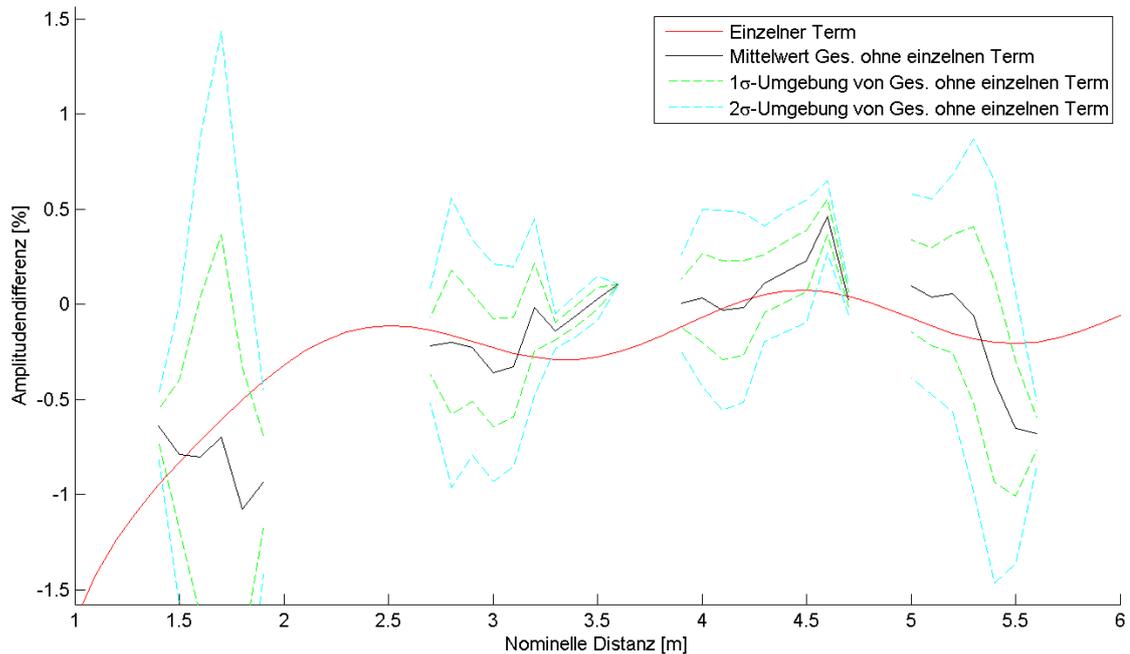


Abbildung 6.17: Korrekturterm: Einfluss der Distanz und periodischer Einfluss der Frequenz auf die Amplitude. *Schwarz*: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss der Korrekturterme  $f_{Dist} + f_{Frequ}$ . *Rot*: Graph der Korrekturterme  $f_{Dist} + f_{Frequ}$ . Wenn man beide distanzabhängigen Terme plottet, nähern sie sich besser den Daten an, liegen aber trotzdem teilweise außerhalb der  $2\sigma$ -Umgebung. Da die Daten verrauscht sind, ist es hier schwierig, Terme zu finden, die sich an die Daten überall gut anpassen.

## 6.4 Parameter

Die Tabelle 6.1 zeigt die (symmetrische) Korrelationsmatrix der Parameterschätzung aus allen Beobachtungen ( $\sim 0.6 Mio.$ ). Die höchste Korrelation mit  $-0.82$  haben die Parameter  $pnTime$  und  $r_6$ , da beide Verschiebungen der Amplituden bewirken (aber aufgrund unterschiedlicher Einflüsse). Trotz der teilweise hohen Korrelationen verbessern die einzelnen Kalibrierterme dennoch das Gesamtergebnis.

<b>Rxx</b>	$a_{30}$	$a_{31}$	$a_1$	$pnTime$	$d_1$	$d_5$	$Ux$	$r_6$
$a_{30}$	1	•	•	•	•	•	•	•
$a_{31}$	-0.34	1	•	•	•	•	•	•
$a_1$	-0.63	+0.44	1	•	•	•	•	•
$pnTime$	-0.76	+0.40	+0.26	1	•	•	•	•
$d_1$	+0.33	-0.55	-0.34	-0.46	1	•	•	•
$d_5$	+0.37	-0.09	-0.25	-0.36	+0.61	1	•	•
$Ux$	-0.30	+0.10	+0.16	+0.37	-0.49	-0.76	1	•
$r_6$	+0.77	-0.57	-0.60	-0.82	+0.31	+0.21	-0.18	1

Tabelle 6.1: Korrelationsmatrix der Parameterschätzung

Die Tabelle 6.2 zeigt die in der Ausgleichung geschätzten Parameter, deren Standardabweichung und die aus Formel (6.8) berechneten normierten Parameter der Kalibrierfunktion.

$$e_n = \frac{|p_n|}{s_n} \quad (6.8)$$

mit:  $e_n$  = normierter Parameter

$p_n$  = geschätzter Parameter

$s_n$  = Standardabweichung des Parameters

<b>Parameter</b>	$p_n$	$s_n$	$e_n$
$a_{30}$	0.112563	0.000425	265.1
$a_{31}$	0.011948	0.000077	155.4
$a_1$	-0.000181	0.000001	778.4
$pnTime$	0.002720	0.000008	329.5
$d_1$	-1.571826	0.006274	250.5
$d_5$	0.108861	0.001220	89.2
$Ux$	7.148068	0.003722	1920.6
$r_6$	-0.551950	0.003310	166.8

Tabelle 6.2: Geschätzte Parameterwerte  $p_n$ , deren Standardabweichung  $s_n$  und die normierten Parameter  $e_n$  der Kalibrierfunktion.

# Kapitel 7

## Ergebnis und Ausblick

### 7.1 Ergebnis

Um das Ergebnis der Kalibrierung zu veranschaulichen wurde ein Karton, der vor einer weißen Wand auf einem mit weißem Papier ausgelegten Tisch steht, aufgenommen (siehe Abb.7.1). Die Reflektivität wurde mit 75 % angenommen. Das Amplitudenbild ist vor und nach der Kalibrierung mit den Standardabweichungen der verschiedenen Ebenen in Abb.7.2 zu sehen. Abb.7.3 zeigt eine 3D-Ansicht vor und nach der Kalibrierung.



Abbildung 7.1: Das Foto der Testszene zeigt einen Karton vor einer weißen Wand. Im Vordergrund ist die SR-3000 zu sehen, mit der die Testszene aufgenommen wurde. Die Aufnahme wurde gemacht, um die Kalibrierung zu veranschaulichen. Die verwendeten Materialien (Karton, Wand, mit weißem Papier ausgelegter Tisch) wurden ausgewählt, da sie diffus streuen. Der Karton steht näherungsweise parallel zur Wand, die Kamera schaut mit einem Winkel von  $\sim 20^\circ$  auf die Wand und den Karton. Die Wand hatte Unebenheiten, die hier schwer zu erkennen sind, im unkalibrierten Amplitudenbild (Abb.7.2 links) aber als vertikale Streifen zu sehen sind.

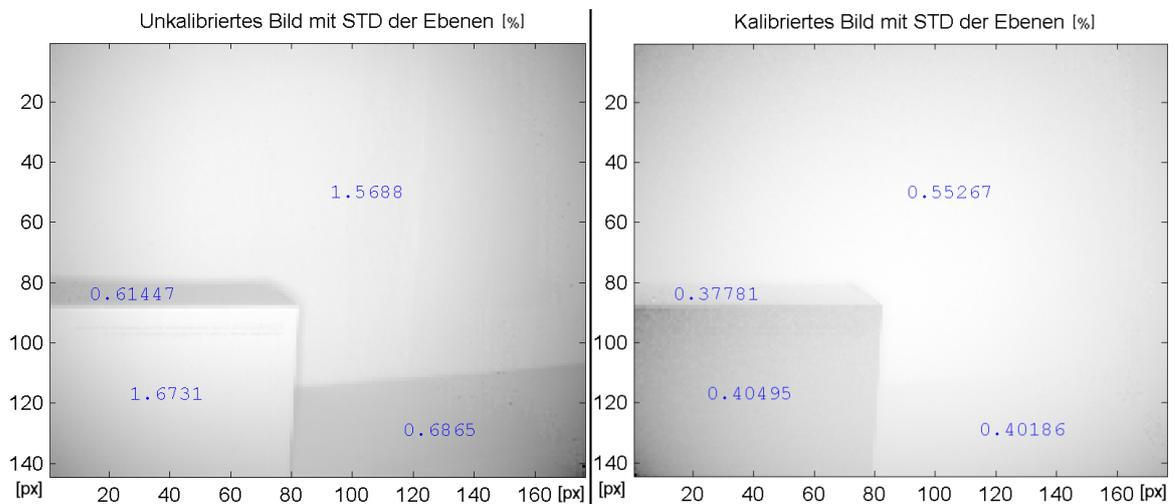


Abbildung 7.2: Amplitudenbild der Testszene vor und nach der Kalibrierung. Die Standardabweichungen der Flächen in % sind in Blau eingetragen. *Links*: unkalibriertes Amplitudenbild, aus Rohdaten abgeleitet. Der Randlichtabfall ist hier deutlich zu sehen. Die vertikalen Streifen, die zu sehen sind, kommen von Unebenheiten in der Wand. *Rechts*: Amplitudenbild nach der Kalibrierung. Die Standardabweichungen der vier Flächen (Karton Vorderseite, Karton Oberseite, Tisch, Wand) haben sich nach der Kalibrierung stark verkleinert. Am Karton links unten im Bild ist zu sehen, dass der Randlichtabfall kleiner wurde, da die Fläche nun homogener erscheint. Der Tisch und die Wand haben nach der Kalibrierung eine viel ähnliche Amplitude, was realistischer ist, da beide Flächen weiß sind und diffus streuen.

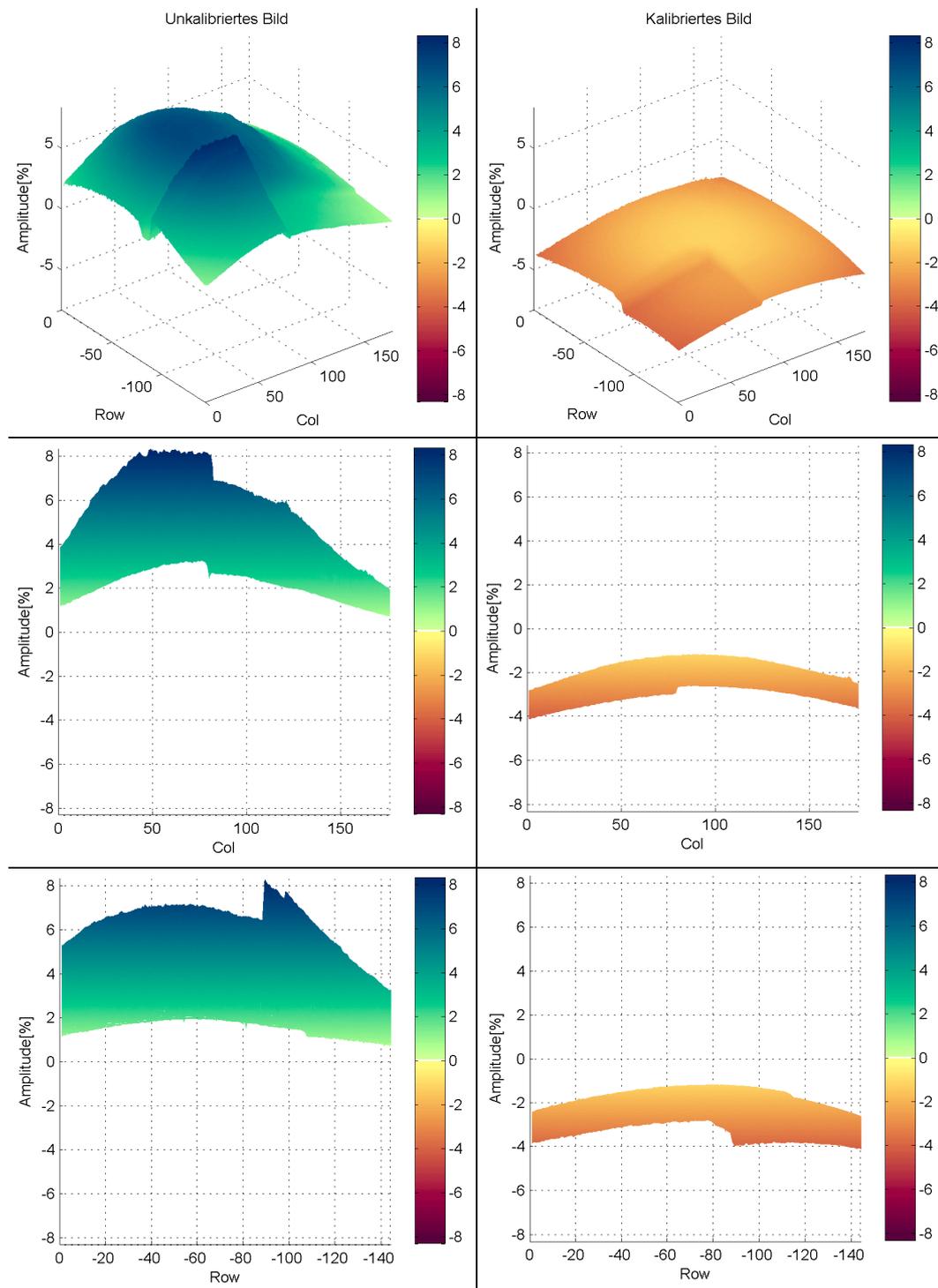


Abbildung 7.3: 3D-Ansicht der Amplitude vor und nach der Kalibrierung. *Linke Spalte:* Amplituden von der Kalibrierung. Hier ist der Randlichtabfall noch einmal sehr gut veranschaulicht. *Rechte Spalte:* Amplituden nach der Kalibrierung. Die starke Abnahme der Amplitude zum Rand hin hat sich deutlich verbessert, ist aber dennoch vorhanden. In den zwei oberen Bildern sind die Amplituden der aufgenommenen Box links vorne deutlich zu sehen. Die Verschiebung, die nach der Kalibrierung zu sehen ist, resultiert aus der freien Wahl der Referenz.

## 7.2 Schlussfolgerung und Ausblick

Um die Amplitude der SR-3000 zu kalibrieren wurde ein Kalibrierfeld bestehend aus fünf Styrodurplatten mit unterschiedlichen Farben aufgebaut. Die fünf verschiedenen Farben waren nötig, um verschiedene Reflektivitäten zu erhalten. Um die Reflektivität mit übergeordneter Genauigkeit zu erhalten, wurde sie mittels eines Spektrometers gemessen. Die Distanzen zwischen der Kamera und den Platten wurden mit übergeordneter Genauigkeit aus einem Passpunktfeld abgeleitet, das rund um die Tafeln angebracht war. Mittels dieser Informationen und der Integrationszeit wurde ein Modell erstellt, mittels dem die Soll- und Ist-Amplituden verglichen werden konnten, anhand derer die Kalibrierung durchgeführt wurde. Für die Erstellung der Kalibrierfunktion wurden verschiedene Einflussgrößen wie Distanz, gemessene Amplitude, Reflektivität und Integrationszeit verwendet. Es hat sich gezeigt, dass einige der verwendeten Fehlereinflüsse nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Gesamtkalibrierung haben, aber dennoch das Ergebnis verbessern. Mittels der Aufnahme einer Testszene, an der die Kalibrierung angebracht wurde, wurde verifiziert, dass die Kalibrierung erfolgreich war. Erkennbar ist dies daran, dass Flächen gleicher Reflektivität (in der Testszene der Karton bzw. der Tisch und die Wand) homogener dargestellt werden, da der Abfall der Amplitude zum Sensorrand hin verkleinert wird.

Um das Kalibrierungsergebnis weiter zu verbessern, könnte man das Modell, das für die Kalibrierung verwendet wird, verfeinern. Das wäre möglich, indem man weitere Größen der Radargleichung, wie z.B. die genaue Sendeleistung der Kamera, feststellt. Nimmt man eine Ebene mit unterschiedlichen Reflektivitäten auf, so sollte es nach der Kalibrierung möglich sein, die unterschiedlichen Reflektivitäten eindeutig zu unterscheiden und somit den Objektraum zu segmentieren. Danach sollte es möglich sein Werte für die unterschiedlichen Reflektivitäten der zuvor segmentierten Regionen zu schätzen, indem man den Parameter der Reflektivität für jede Region einzeln ansetzt und variiert, bis alle Regionen in einer Ebene zu liegen kommen. Wie gut das funktioniert wird aber von der Differenz der Reflektivitäten abhängen, es wird vor allem bei großen Unterschieden gut funktionieren.

# Anhang A

## Anhang

### A.1 Sensorabdeckung mit den verschiedenen Farben

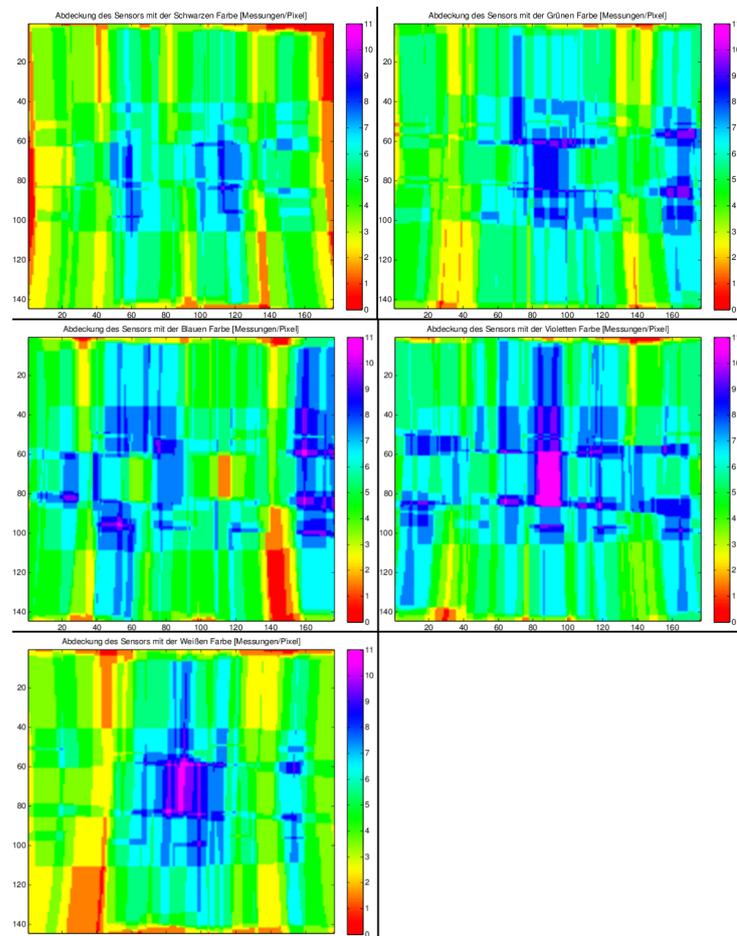


Abbildung A.1: Abdeckung des Sensors mit den einzelnen Farben der Kalibriertafeln. *Oben links*: Schwarze Farbe. *Oben rechts*: Grüne Farbe. *Mitte links*: Blaue Farbe. *Mitte rechts*: Violette Farbe. *Unten links*: Weiße Farbe.

## A.2 Einfluss einzelner Terme auf die Gesamtkalibrierung abhängig von der Sensorposition

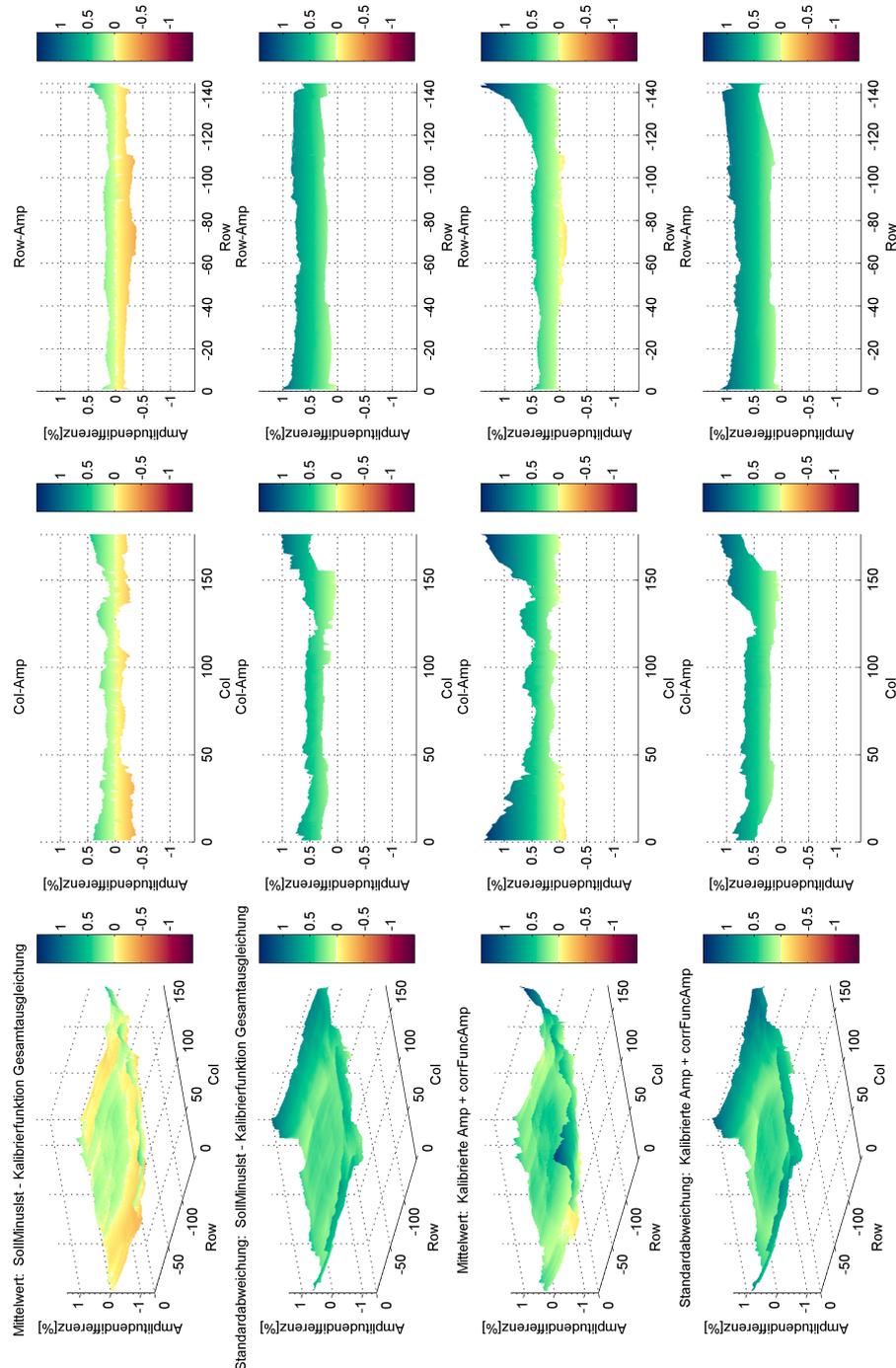


Abbildung A.2: Korrekturterm: Einfluss der gemessenen Amplitude. 1. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude. 2. Reihe: Standardabweichung der 1. Reihe. 3. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss der gemessenen Amplitude. 4. Reihe: Standardabweichung der 3. Reihe.

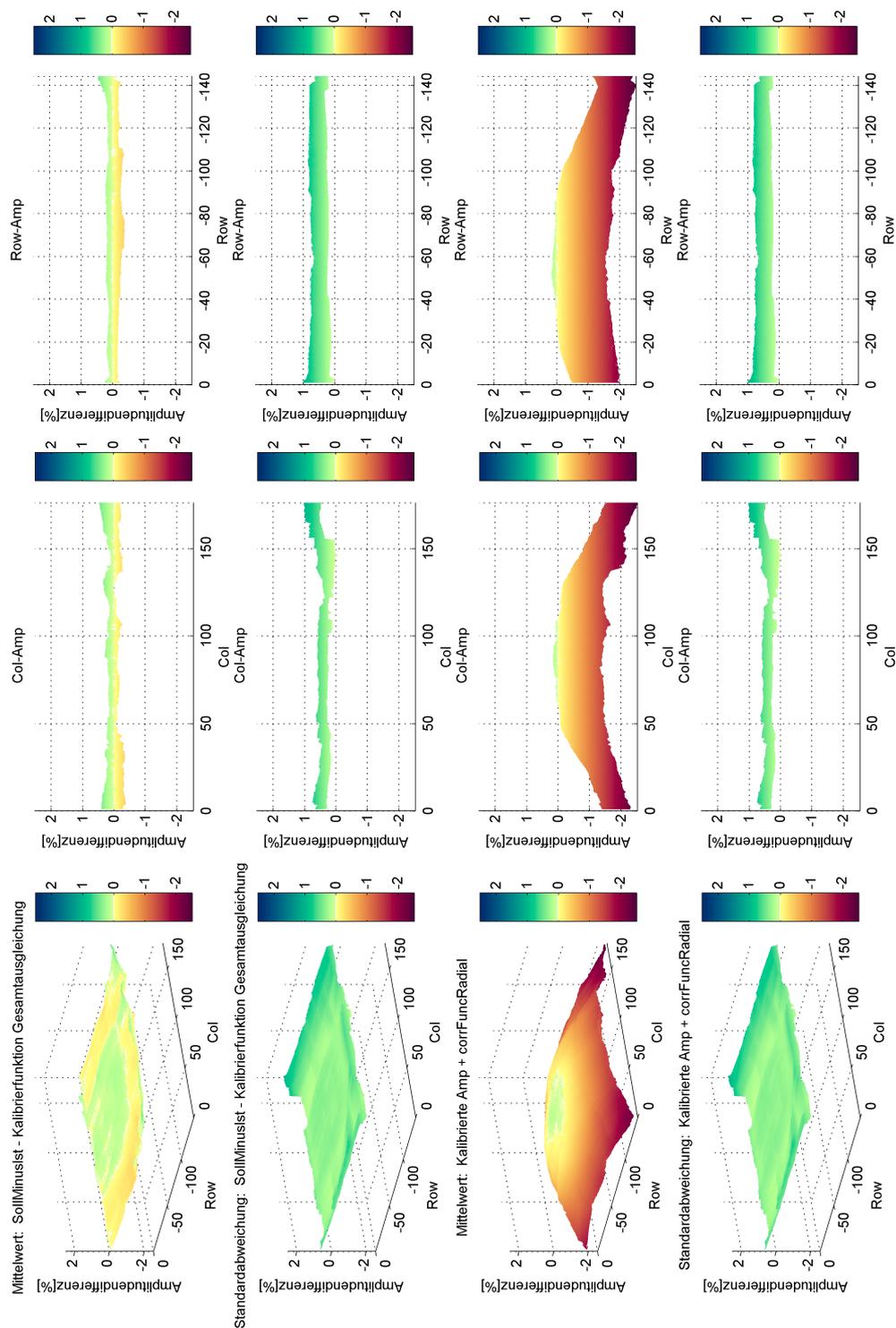


Abbildung A.3: Korrekturterm: Radialsymmetrischer Abfall der Amplitude. 1. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude. 2. Reihe: Standardabweichung der 1. Reihe. 3. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss der gemessenen Amplitude. 4. Reihe: Standardabweichung der 3. Reihe.

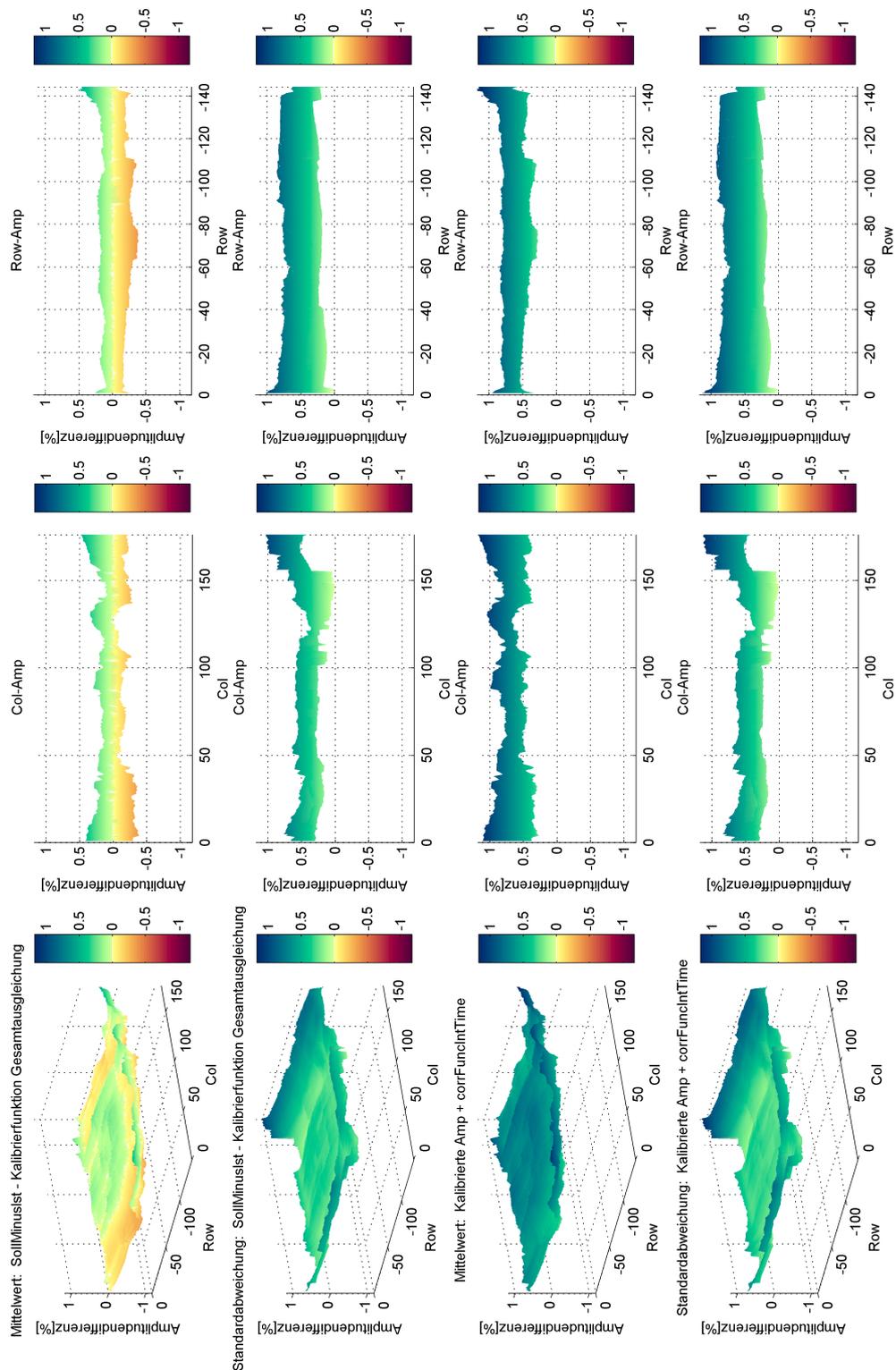


Abbildung A.4: Korrekturterm: Einfluss der Integrationszeit auf die Amplitude. 1. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude. 2. Reihe: Standardabweichung der 1. Reihe. 3. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss der Integrationszeit auf die Amplitude. 4. Reihe: Standardabweichung der 3. Reihe.

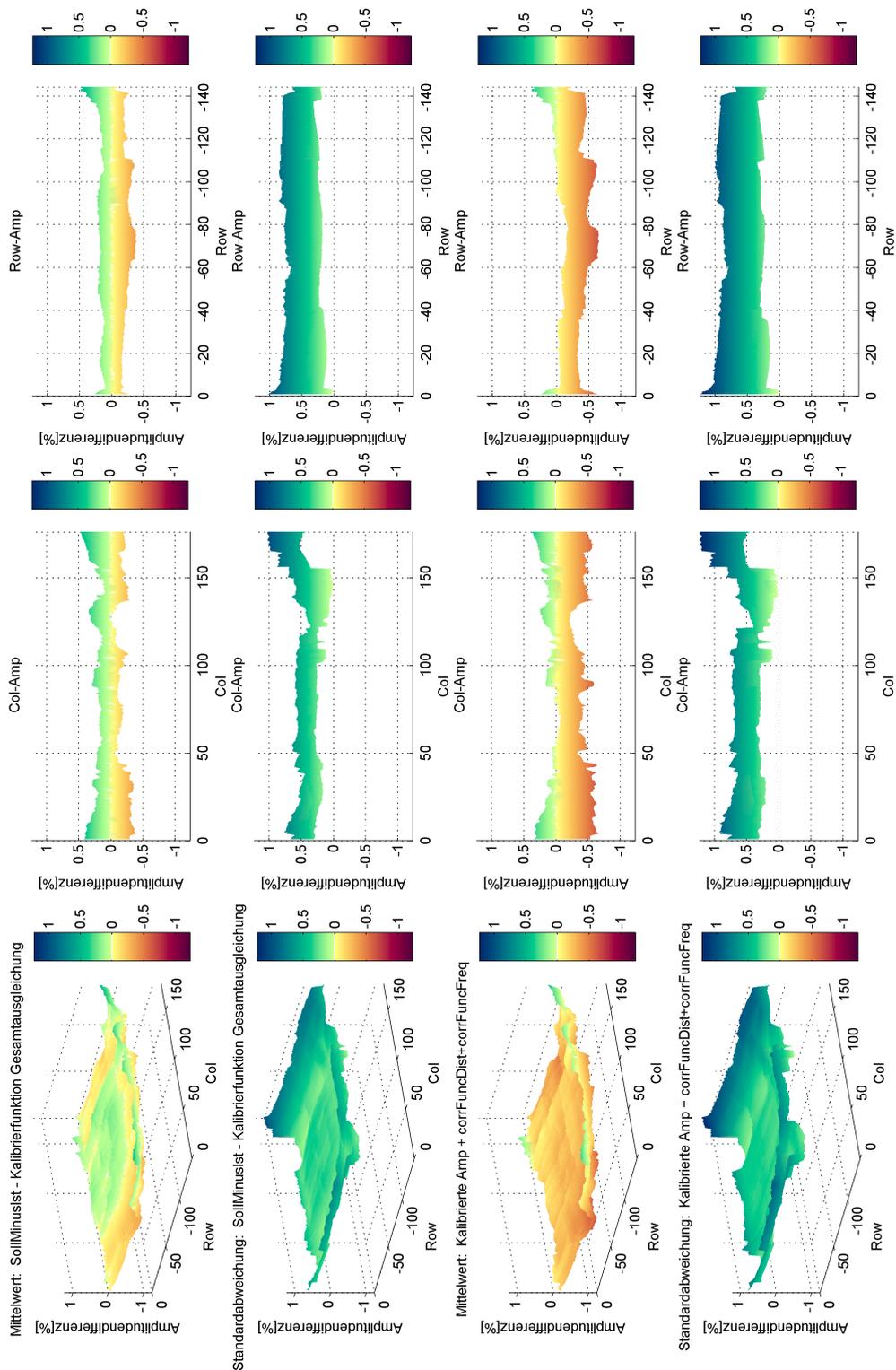


Abbildung A.5: Korrekturterm: Einfluss der Distanz und periodischer Einfluss der Frequenz auf die Amplitude. 1. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude. 2. Reihe: Standardabweichung der 1. Reihe. 3. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss der Distanz auf die Amplitude. 4. Reihe: Standardabweichung der 3. Reihe.

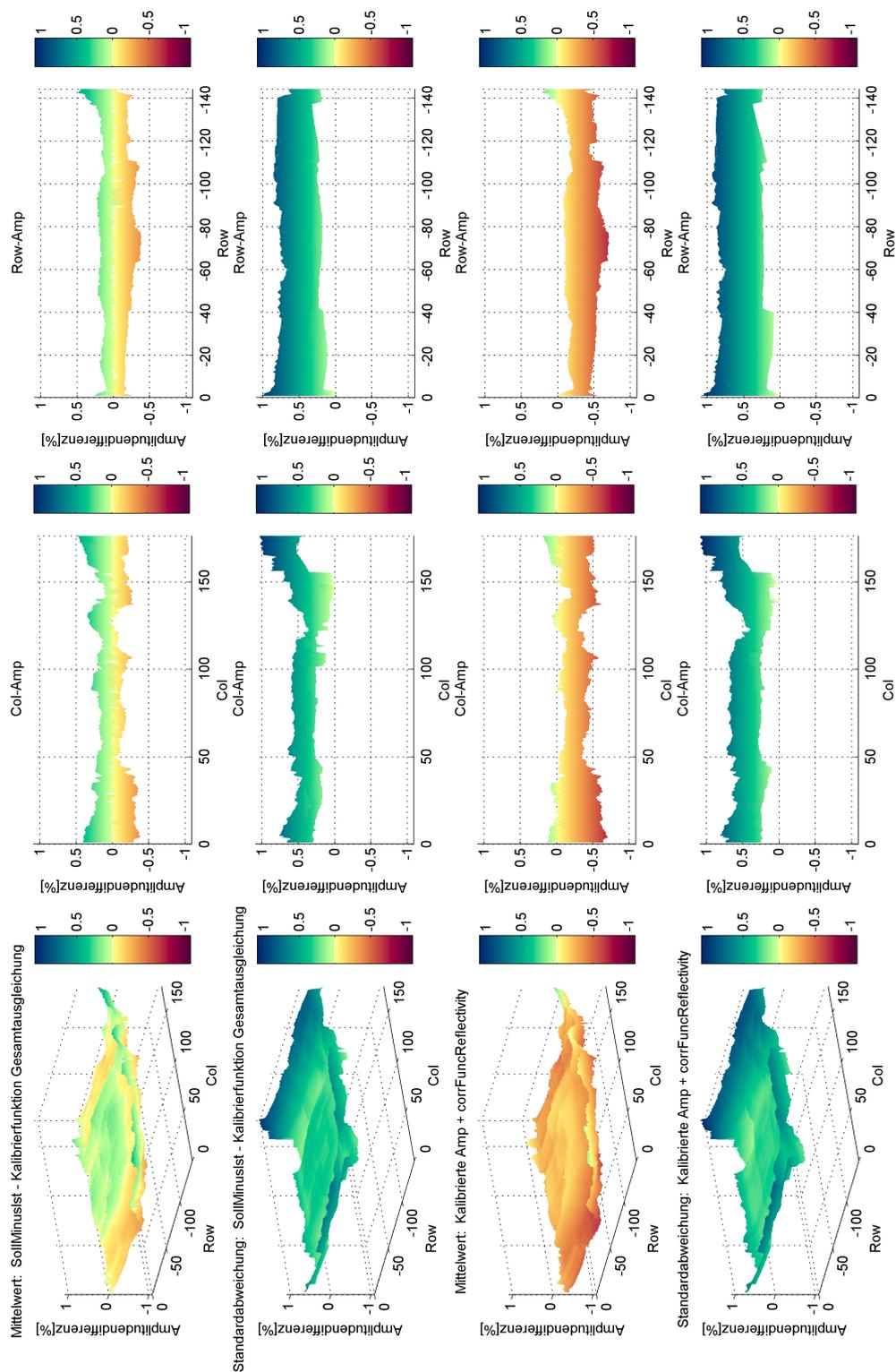


Abbildung A.6: Korrekturterm: Einfluss der Reflektivität auf die Amplitude. 1. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude. 2. Reihe: Standardabweichung der 1. Reihe. 3. Reihe: Mittelwert der kalibrierten Amplitude ohne den Einfluss der Reflektivität auf die Amplitude. 4. Reihe: Standardabweichung der 3. Reihe.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Messprinzip einer TOF-Kamera . . . . .	1
2.1	Strahlungsfluss an einer Grenzfläche von zwei Medien . . . . .	5
2.2	Gerichtete und diffuse Reflexion, Oberflächenunebenheit . . . . .	6
2.3	Strahldichte und Lambertscher Strahler . . . . .	7
2.4	Größen der Radargleichung . . . . .	8
2.5	Impulsmessverfahren . . . . .	9
2.6	Phasenvergleichsverfahren . . . . .	10
3.1	Blockdiagramm einer Distanzkamera . . . . .	14
3.2	Beleuchtungseinrichtung von Distanzkameras . . . . .	14
3.3	Vereinfacht dargestelltes PMD-Pixel . . . . .	16
3.4	Prinzip der Phasenmessung . . . . .	17
3.5	Einfluss eines Wechsels der Integrationszeit auf die Distanzmessung . . . . .	19
3.6	Sensortemperatur . . . . .	20
3.7	Einfluss der Textur auf die Distanzmessung . . . . .	21
3.8	Mehrwegeeffekte und Scattering . . . . .	22
4.1	Verschiedene Ansichten der Swissranger 3000 . . . . .	25
4.2	Horizontaler Abstrahlwinkel der Beleuchtungseinrichtung versus Sichtfeld des SR-3000 . . . . .	26
4.3	Spektroradiometer „GER 1500“ der Firma SVC . . . . .	29
4.4	Kalibrierung des Spektrometers vor jeder Messung mit einer Referenzmessung auf Spectralon . . . . .	30
5.1	Mögliche Flächen für eine Kalibrierung . . . . .	33
5.2	Testmessung mit roten und schwarzen Kreidespray . . . . .	34
5.3	Zweite Testmessung mit weißer Farbe, ohne Farbe und blauer Farbe . . . . .	35
5.4	Endgültiges Kalibrierfeld . . . . .	35
5.5	Passpunktfeld rund um die Styrodurplatten und die verwendeten Sperrmaße für die Ausgleichung . . . . .	36
5.6	Schwenken der Kamera um die Stehachse des Statives . . . . .	38

5.7	Aufnahmestandpunkte im Grundriss dargestellt . . . . .	38
5.8	Reflektivität der weißen Tafel bei Schwenkung des Statives . . . . .	39
5.9	Vier Messungen der Reflektivität der lilafarbenen Tafel . . . . .	40
5.10	Verwendete Koordinatensysteme . . . . .	41
5.11	Ergebnis des Mittelungsprozesses des Bildes Nr. 82 . . . . .	42
5.12	Feinorientierung . . . . .	44
5.13	Erstellung der Farbmasken . . . . .	45
5.14	Berechnete Distanzen des Bildes Nr.82 . . . . .	46
6.1	Mittelwert der Amplitudendifferenz zwischen Modell und gemessenen Amplituden . . . . .	49
6.2	Anzahl der Beobachtungen pro Pixel, die in die Ausgleichung eingeflossen sind	50
6.3	Amplitudendifferenzen vs. Distanz . . . . .	50
6.4	Amplitudendifferenzen vs. Inzidenzwinkel . . . . .	51
6.5	Amplitudendifferenzen vs. Reflektivität . . . . .	51
6.6	Amplitudendifferenzen vs. Sensorposition . . . . .	52
6.7	Amplitudendifferenzen vs. Integrationszeit . . . . .	52
6.8	Amplitudendifferenzen vs. beobachtete Amplituden . . . . .	53
6.9	Anzahl der Beobachtungen pro Amplitudendifferenz . . . . .	53
6.10	Mittelwert der Amplitudenresiduen a posteriori abhängig von der Sensorposition	54
6.11	Korrekturterm: Einfluss der gemessenen Amplitude . . . . .	56
6.12	Korrekturterm: radialsymmetrischer Randlichtabfall der Amplitude . . . . .	57
6.13	Korrekturterm: Einfluss der Integrationszeit . . . . .	58
6.14	Korrekturterm: Einfluss der Reflektivität auf die Amplitude . . . . .	59
6.15	Korrekturterm: Einfluss der Distanz auf die Amplitude . . . . .	60
6.16	Korrekturterm: Periodischer Einfluss der Frequenz auf die Amplitude . . . . .	61
6.17	Korrekturterm: Einfluss der Distanz und periodischer Einfluss der Frequenz auf die Amplitude . . . . .	62
7.1	Foto der Testszene: Karton vor einer weißer Wand. . . . .	64
7.2	Amplitudenbild der Testszene vor und nach der Kalibrierung . . . . .	65
7.3	3D-Ansicht der Amplitude vor und nach der Kalibrierung . . . . .	66
A.1	Sensorabdeckung der einzelnen Farben . . . . .	68
A.2	Korrekturterm: Einfluss der gemessenen Amplitude mit Standardabweichung .	69
A.3	Korrekturterm: Radialsymmetrischer Abfall der Amplitude mit Standardabweichung . . . . .	70
A.4	Korrekturterm: Einfluss der Integrationszeit auf die Amplitude mit Standardabweichung . . . . .	71
A.5	Korrekturterm: Einfluss der Distanz und periodischer Einfluss der Frequenz auf die Amplitude mit Standardabweichung . . . . .	72

A.6 Korrekturterm: Einfluss der Reflektivität auf die Amplitude mit Standardabweichung . . . . . 73

# Tabellenverzeichnis

3.1	Fehlereinflüsse . . . . .	19
4.1	Beleuchtungseinheit SR-3000 . . . . .	26
4.2	Objektiv SR-3000 . . . . .	26
4.3	Optischer Filter SR-3000 . . . . .	27
4.4	Sensor SR-3000 . . . . .	27
4.5	Spezifikationen des SVC GER 1500. [SpectraVista (2012)] . . . . .	29
5.1	Aufnahmekonfiguration der einzelnen Standpunkte . . . . .	37
5.2	Verwendete Reflektivitäten . . . . .	40
6.1	Korrelationsmatrix der Parameterschätzung . . . . .	63
6.2	Geschätzte Parameterwerte $p_n$ , deren Standardabweichung $s_n$ und die normierten Parameter $e_n$ der Kalibrierfunktion. . . . .	63

# Abkürzungsverzeichnis

APS .....	Active Pixel Sensor
CCD .....	Charge coupled Device
CMOS .....	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CW .....	Continuous wave
ERP .....	Exterior Reference Point
FPN .....	Fixed-Pattern-Noise
FWHM .....	Fill Width Half Maximum = Halbwertsbreite
GNSS .....	Global Navigation Satellite System
IMU .....	Inertial Measurement Unit
IRP .....	Interior Reference Point
LED .....	Light-Emitting Diode
NIR .....	Nahes Infrarot
PMD .....	Photonic Mixing Device
RIM .....	Range Imaging
SBI .....	Suppression of Background Illumination
SR-3000 .....	Swissranger 3000
SVC .....	Spectra Vista Corporation
TOF .....	Time of flight
USB .....	Universal Serial Bus

# Literaturverzeichnis

- AHN, S.J., KOTOWSKI, R. AND WARNECKE, H.J. (1999). Systematic Geometric Image Measurement Errors of Circular Object Targets: Mathematical Formulation and Correction. In *Photogrammetric Record*, pp.485–502.
- DEMANT, C., STREICHER-ABEL, B. AND SPRINGHOFF, A. (2011). *Industrielle Bildverarbeitung: Wie Optische Qualitätskontrolle Wirklich Funktioniert*. Springer Verlag.
- JAAKKOLA, A., KAASALAINEN, S., NIITYMÄKI, H. AND AKUJÄRVI, A. (2008). Radiometric Calibration of Intensity Images of Swissranger SR-3000 Range Camera. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Vol.21 No.1.
- JOECKEL, R., STOBER, M. AND HUEP, W. (2008). *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung und ihre Integration in aktuelle Positionierungsverfahren*. Herbert Wichmann Verlag, 5th edn.
- KAGER, H., ROTTENSTEINER, F., KERSCHNER, M. AND STADLER, P. (2002). *ORPHEUS 3.2.1 - User Manual*. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- KAHLMANN, T. (2007). *Range Imaging Metrology: Investigation, Calibration and Development*. Ph.D. thesis, ETH Zurich.
- KAHLMANN, T., REMONDINO, F. AND INGENSAND, H. (2006). Calibration for increased accuracy of the range imaging camera Swissranger. Vol. 36 of *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, pp.136–141, ISPRS.
- KAREL, W. (2008a). Integrated Range Camera Calibration Using Image Sequences From Hand-Held Operation. In *Proceedings*, pp.945–951, Vol. XXXVII. Part B5, talk: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXIst Congress, Beijing, China; 2008-07-03 – 2008-07-11.
- KAREL, W. (2008b). Range Imaging: 3d-Punktwolken in Echtzeit. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, begutachteter Beitrag, 96, pp.12–26.
- KAREL, W. AND PFEIFER, N. (2009). Range camera calibration based on image sequences and dense comprehensive error statistics. In *SPIE Proceedings Vol. 7239, Three-Dimensional Ima-*

- ging Metrology, talk: Three-Dimensional Imaging Metrology, San José, USA; 2009-01-19 – 2009-01-20.
- KAREL, W., GHUFFAR, S. AND PFEIFER, N. (2010). Quantifying The Distortion Of Distance Observations Caused By Scattering In Time-Of-Flight Range Cameras. In *The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, pp.316–321, XXXVIII/5, talk: ISPRS Commission V Mid-Term Symposium Close Range Image Measurement Techniques, Newcastle; 2010-06-21 – 2010-06-24.
- KILLIAN, K. (1955). Über das Rückwärtseinschneiden im Raum. *Die Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie Wien*, Vol.43, pp.97–104.
- KRAUS, K. (2004). *Photogrammetrie Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. deGruyter Verlag, 7th edn.
- KRAUS, K., KAGER, H. AND JANSA, J. (1996). *Photogrammetrie Band 2 - Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Ferd. Dümmlers Verlag.
- LINDNER, M. (2010). *Calibration and real-time processing of time-of-flight range data*. Ph.D. thesis, Universität Siegen.
- LINDNER, M. AND KOLB, A. (2006). Lateral and depth calibration of PMD-distance sensors. In *Advances in Visual Computing*, Vol. 2, pp.524–533, Int. Symp. on Visual Computing, Springer-Verlag.
- LIPKOWSKI, S. AND SCHERER, M. (2012). Verbesserung der 3d-Punktgenauigkeit einer PMD-Kamera durch Kombination mit einer 2d-Kamera. *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, pp.117–120.
- MATLAB® (2013). Homepage Mathwoks <http://www.mathworks.de/>. Zugriff: Juli 2013.
- MESA-IMAGING (2013). Homepage MESA-Imaging <http://www.mesa-imaging.ch/>. Zugriff: April 2013.
- MÜLLER, F. (1925). *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 37, 249–255.
- OGGIER, T., BÜTTGEN, B. AND LUSTENBERGER, F. (2005). Swissranger SR3000 and first experiences based on miniaturized 3d-tof cameras. *Proceedings of the First Range Imaging Research Day ETH Zürich*.
- PMD-VISION (2013). Homepage PMD Vision <http://www.pmdtec.com/>. Zugriff: Juli 2013.
- SCHNEIDER, B. (2003). *Der Photomischdetektor zur schnellen 3D-Vermessung für Sicherheitssysteme und zur Informationsübertragung im Automobil*. Ph.D. thesis, Universität-Gesamthochschule Siegen.

SPECTRAVISTA (2012). *SVC GER-1500 User Manual*.

SWISSRANGER (2006). *SwissRanger SR-3000 User Manual*. Mesa Imaging, 1st edn.

SWISSRANGER (2011). *SwissRanger SR-4000 User Manual*. Mesa Imaging, 2nd edn.

WAGNER, W. (2007). *Grundzüge der Fernerkundung*. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung.

WAGNER, W., ULLRICH, A. AND BRIESE, C. (2003). Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)*, 91. Jahrgang, pp.223–235.

ZACHHUBER, P. (2011). *Impact of Temperature and Temperature-Change on Range-Cameras*. Master's thesis, Technical University of Vienna.

ZHANG, Z. (2003). *Untersuchung und Charakterisierung von PMD (Photomischdetektor)-Strukturen und ihren Grundschaltungen*. Ph.D. thesis, Universität Siegen.

# Lebenslauf

Name: Gregor Marx  
E-mail: gregor.marx@chello.at  
Geburtstag: 24. Februar 1980  
Geburtsort: Wien, Österreich  
Staatsbürgerschaft: Österreich  
Familienstand: verheiratet

## Schulbildung

09/1986 – 06/1990 Volksschule; Rothenburgstraße 1, 1120 Wien  
09/1990 – 06/1993 Gymnasium; Erlgasse 32-34, 1120 Wien  
09/1993 – 06/1995 Mittelschule; Anton-Baumgartner-Str.119, 1230 Wien  
09/1995 – 02/1999 Berufsschule; Apollogasse 1, 1070 Wien  
09/2004 – 06/2006 Werkmeister für Maschinenbau  
TGM Plösslgasse13, 1040 Wien  
09/2006 – 04/2008 Berufsreifeprüfung; TGM Plösslgasse13, 1040 Wien  
09/2008 – 03/2012 Bachelorstudium Geodäsie und Geoinformatik  
Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien  
04/2012 – 12/2013 Masterstudium Vermessung und Katasterwesen  
Technische Universität Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien

## Beruflicher Werdegang

09/1995 – 02/1999 Lehre als Feinmechaniker, Firma AKG Acoustics  
04/1999 – 11/1999 Präsenzdienst  
12/1999 – 12/2005 Werkzeugmacher, Firma AKG Acoustics  
01/2006 – 04/2006 Drahterodierer; Firma Cincinnati-Extrusion  
05/2006 – 09/2008 Erodierer, Firma Karl Schiebl  
08/2011 – 08/2011 Grenzvermessung, Österreichische Bundesforste AG  
08/2012 – 08/2012 Grenzvermessung, Österreichische Bundesforste AG