GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Heft Nr. 63, 2003

Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnutzung der Farbinformation

von

Anton Nießner

Veröffentlichung des Instituts für Geodäsie und Geophysik Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie 128/3

mit finanzieller Unterstützung
der Bank Austria Creditanstalt

Schriftenreihe der Studienrichtung VERMESSUNGSWESEN UND GEOINFORMATION
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Heft Nr. 63, 2003

Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnutzung der Farbinformation

von

Anton Nießner

Veröffentlichung des Instituts für Geodäsie und Geophysik Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie 128/3

mit finanzieller Unterstützung
der Bank Austria Creditanstalt

**Schriftenreihe der Studienrichtung VERMESSUNGSWESEN UND GEOINFORMATION
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**

Herausgeber und Verleger: o.Univ.Prof.Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Vorstand des Institutes für Geodäsie und Geophysik
Der Technischen Universität Wien
A-1040 Wien, Gusshausstrasse 27-29

Diese Arbeit wurde an der Technisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Wien zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der technischen Wissenschaften eingereicht.

Die Kosten für den Druck wurden aus der ordentlichen Dotation des Institutes und mit der Unterstützung der Bank Austria Creditanstalt getragen.

Referent: o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen
Koreferent: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Josef Jansa
Tag der mündlichen Prüfung: 7. November 2002

Druck: KOPIE, A-1090 Wien
Auflage 70 Stück

Danksagung

Mein Dank gilt dem FWF Der Wissenschaftsfond, ohne dessen finanzieller Unterstützung diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen, der die Aufgabenstellung initiierte, mir sehr viel Freiheit für Kreativität ließ und mit zahlreichen Anregungen und Ergänzungen zu dieser Arbeit beitrug. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Josef Jansa, der bereitwillig das Ko-Referat dieser Arbeit übernommen hat.

Herrn Antonio Batovanja danke ich für die Hilfestellung bei der Implementation von Softwarealgorithmen in das bestehende Messsystem. Außerdem danke ich auch all jenen Kolleginnen und Kollegen, die mich als „Quereinsteiger" in der Welt der Geodäsie gut aufgenommen haben und auch in fachlicher Hinsicht unterstützten.

Besonders danke ich auch meiner Partnerin Bärbel, die nicht nur die Korrekturen mit viel Ausdauer gelesen hat, sondern mit viel seelischer Unterstützung für mich da war, sowie meinen Eltern und all meinen Freunden, die mir für das Gelingen dieser Arbeit viel Zuversicht gaben.

Kurzfassung

In den klassischen Aufgabengebieten der Ingenieurgeodäsie ist durch die Automatisierung eine enge Verknüpfung mit der Informationsverarbeitung gegeben. Theodolite mit integrierten CCD-Kameras ermöglichen einen hohen Automatisationsgrad und stellen ein hochpräzises Messwerkzeug dar.

In dieser Arbeit wird ein Messmodul beschrieben, dass einen Ansatz liefert, um das menschliche visuelle Wahrnehmungsvermögen nachzubilden. Den Ausgangspunkt stellt eine Unterscheidung von Objekten im CCD-Bild nach unterschiedlichen Farben dar. Es wird ein Algorithmus vorgestellt, der einzelne Objekte extrahiert und deren Formveränderungen analysiert. Die Bildinformation der CCD-Kamera wird für eine qualitative Deformationsanalyse genützt.

Nach der Berechnung und Transformation der Abstandfunktion wird ein heuristischer Ansatz mit Regeln zur Interpretation der erhaltenen Ergebnisse gewählt. Als Ergebnis liegt dann eine semantische Aussage über das Auftreten von Deformationen vor. Aufgrund der gegebenen Lokalisation der Objekte können dann mit weiteren Messungen spezifische quantitative Untersuchungen gemacht werden.

Das Verfahren wurde aus einer Reihe von empirischen Untersuchungen entwickelt, deren wichtigsten Testmessungen werden detailliert vorgestellt. Weiters wurden Untersuchungen über die Empfindlichkeit der Methode und der Signifikanz der Ergebnisse durchgeführt. Die Formulierung der Regeln und die Ergebnisse der daraus folgenden Interpretationen werden anschließend beschrieben. Schlussfolgerungen und Vorschläge zur weiteren Entwicklung des Farbsegmentverfahrens beenden diese Arbeit.

Die Arbeit steht in engem Zusammenhang mit dem FWF-Forschungsprojekt „Theodolite-based and Knowledge-based Multi-Sensor-System for 3D Object Recognition“, wo dieses Farbsegmentverfahren als ein qualitatives Messmodul integriert werden kann.

Abstract

The classical application fields of engineering geodesy are in close connection with computer science by automation. Theodolites with integrated CCD cameras make a high automation possible and represent a highly precise measuring tool.

In this work a measuring module is described that furnishes an approach to copy human visual perceptivity. Different colours represent the starting point for distinction of objects in the CCD image. An algorithm is presented, which extracts individual objects and analyses their deformation. The image information of the CCD camera is used for a qualitative deformation analysis.

After the computation and transformation of the distance function a heuristic method with rules is selected for the interpretation of the received results. A semantic statement about the occurrence of deformations is the result. Due to the given localization of the objects specific quantitative investigations can be made with further measurements.

The procedure was developed from a set of empirical investigations, their most important test measurements are presented in detail. Further investigations about the sensitivity of the method and the significance of the results are conducted. Afterwards the formulation of rules and results of the interpretations following from it are described. This work finishes with conclusions and suggestions for further developments of this colour-segmentation procedure.

This work stands in close relationship with the FWF research project "Theodolite-based and Knowledge-based Multi-Sensor-System for 3D Object Recognition", where this colour-segmentation procedure can be integrated as a qualitative measuring module.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung		iv
Abstract		v
1	**Einleitung**	**1**
1.1	Zielsetzung und Motivation	1
1.2	Stand der Technik	3
2	**Konzept des Messsystems**	**4**
2.1	Das theodolit- und wissensbasierende Messsystem mit seinen Komponenten	4
2.2	Hardware- und Softwarekomponenten des Messsystems	7
2.3	Konzept des Farbsegmentverfahrens als ein Softwaremodul	9
3	**Komponenten des Farbsegmentverfahrens**	**13**
3.1	Der Segmentierungsprozess	13
3.2	Die Abstandfunktion	20
3.3	Transformation zur Vereinfachung einer Problemlösung	24
3.3.1	Weg 1: Fouriertransfomation	24
3.3.2	Weg 2: Wavelet-Transformation	26
3.4	Interpretation der Transformationsergebnisse	30
4	**Testmessungen bei Deformationen**	**31**
4.1	Messungen an nicht deformierten Objekten	32
4.2	Messungen am deformierten Kreis	35
4.3	Messungen am deformierten Viereck	40
4.4	Berechnung der Differenzspektren	43

5 Untersuchung des Rauschverhaltens 49

5.1 Transformationsergebnisse idealer Objektformen 49

5.2 Rauscherscheinungen bei Wiederholungsmessungen 52

6 Interpretation der Messergebnisse mittels Regeln 55

7 Schlussfolgerung und Ausblick 62

Literaturverzeichnis 64

Anhang 66

Lebenslauf 75

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung und Motivation

Geodätische Aufgaben der Ingenieurgeodäsie können grundsätzlich in drei Aufgabenbereiche unterschieden werden:

1. die Aufnahme und Darstellung des örtlichen Bestandes,
2. die geometrische Übertragung (Absteckung) in die Örtlichkeit und
3. die messtechnische Kontrolle (Überwachung).

In diesen drei klassischen Aufgabengebieten ist vor allem durch die zunehmende Automatisierung eine enge Verknüpfung zu den Methoden und Anwendungen anderer technischer Wissensgebiete wie der Informationsverarbeitung gegeben.

Eine geodätische Messaufgabe gliedert sich in die eigentliche Kernaufgabe, die koordinative Erfassung des Objekts bzw. dessen zeitliche Veränderungen und all jene vorbereitenden Aufgaben, wie die Auswahl des Messverfahrens, den Aufbau des entsprechenden Messinstrumentariums und die sinnvolle Auswahl entsprechender Messpunkte der zu messenden Objektbereiche. D.h. neben der eigentlichen quantitativen Messaufgabe sind auch viele rein qualitative Aufgaben und Entscheidungen zu bewältigen.

Die Vorbereitungen der Messung, wie die Messpunktauswahl oder allgemein formuliert, was wann wo gemessen wird, zählen heute zu den wesentlichen Aufgaben eines Vermessungsingenieurs, da der eigentliche Messablauf oft automatisiert und zumindestens die Schritte in der Aufbearbeitung der Messdaten computerunterstützt ablaufen.

Dies bedeutetet wiederum, dass im Bereich dieser qualitativen Entscheidungsprozesse und der Automatisierung der Messverfahren nach wie vor ein enormes Entwicklungspotential gegeben ist. Speziell für Überwachungsaufgaben ist ein automatisiertes und „intelligentes“ Messsystem eine zeit- und kosteneinsparende Innovation.

Vermessungsaufgaben im Bereich der Ingenieurgeodäsie werden neben den Anwendungen von GPS, photogrammetrischen Verfahren und anderen sensortechnischen Methoden in bewährter Weise mit Theodolit- und Tachymetersystemen durchgeführt. Theodolite als Industriemesssystem sind für die hochpräzise räumliche Koordinatenerfassung ein unvergleichbares Instrumentarium. Vor allem dann, wenn diese Theodolite mit integrierten CCD-Kameras ausgestattet sind, ist ein hoher Automatisierungsgrad möglich. Dadurch werden diese Systeme zu sehr effizienten und zuverlässigen Messwerkzeugen.

Diese Arbeit soll einen grundlegenden Beitrag zur Weiterentwicklung der Möglichkeiten solcher Theodolitmesssysteme mit integrierten CCD-Kameras liefern. Zielsetzung der

Arbeit ist, speziell für diesen unmittelbar der eigentlichen Messung vorausgehenden Teil des Messablaufes Methoden und Algorithmen zu entwickeln, die gerade dort einen Entwicklungssprung im Automatisierungsgrad zulassen. Das sind Methoden, die auf Zielmarken verzichten und die automatisierte Interpretation der Umgebung des Messobjekts sowie dessen optischen Eindruck ermöglichen und damit bei der Messpunktauswahl die Tätigkeiten des Ingenieurs wesentlich unterstützen [KNS01].

Weiters steht diese Arbeit in direktem Zusammenhang mit einem derzeit am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, laufenden FWF-Forschungsprojekt „Theodolite-based and Knowledge-based Multi-Sensor-System for 3D Object Recognition", dessen Aufgabenstellung in der Entwicklung eines automatischen Theodolitmesssystems mit integrierten CCD-Kameras unter Zuhilfenahme wissensbasierter Prozesssteuerung von unterschiedlichen Messalgorithmen und -methoden liegt.

Für dieses „intelligente" Messsystem soll ein Messmodul entwickelt werden, dass speziell die qualitative automatische optische Interpretation des zu messenden Objekts in Hinblick auf Überwachungsaufgaben ermöglicht. Dies bedeutet, dass die allgemeine qualitative visuelle Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen mit einem technischen System nachgebildet und in Form von Algorithmen integriert wird, und dabei diese „maschinelle Wahrnehmung" durch die Präzision des Messinstrumentariums die Qualität der Beobachtungen hinsichtlich der Aussagekraft, Verbindlichkeit und Sensibilität steigert.

Die menschliche Wahrnehmung ist eine komplexe Interaktion zwischen den beiden Augen und verschiedenen Regionen des Gehirns. Sie ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet [SDW94]:

- Wahrnehmung von Form und Farbe,
- Dreidimensionale Wahrnehmung,
- Wahrnehmung von Bewegungen.

Dabei ist besonders die Modellierung der Wahrnehmung von Form und Farbe eine sehr interessante Herausforderung. Speziell die maschinelle Nachbildung der Wahrnehmung und Ausnutzung der Farbinformation, für uns Menschen eine selbstverständliche Alltäglichkeit, wurde bisher in der Forschung weitgehend vernachlässigt.

Motivation der Arbeit ist, dieses Potential an zusätzlicher Information in einem automatischen Theodolitmesssystem zu nutzen. In Kombination mit anderen Methoden der Bildverarbeitung kann ein solches Theodolitmesssystem die Realisierung eines „intelligenten" Messroboters in greifbare Nähe rücken. Dabei wird das menschliche Wahrnehmungsvermögen mittels CCD-Farb-Kameras und Software nachgebildet und ein computergesteuertes Theodolitsystem liefert die Messpräzision.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines qualitativen Lösungsweges zum Auffinden von Formveränderungen.

1.2 Stand der Technik

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an geodätischen sowie photogrammetrischen Methoden und Messverfahren entwickelt [O3D01].

Besonders die Entwicklung von automatischen Theodolitmesssystemen hat mittlerweile eine längere Tradition. Doch sind in den Jahren ausschließlich Systeme entstanden, die entweder aktive Zielmarken bzw. Reflektoren, die durch interne Zielbeleuchter beleuchtet werden, verwenden. Eine weitere Möglichkeit aktive Zielmarken zu erzeugen, besteht in der Verwendung eines koaxial zur Fernrohrachse projizierten Laserstrahls, der speziell zur Deformationsbestimmung von Gebäuden genützt werden kann.

Erst in der Arbeit von A.Mischke [Mis98] wurde ein Ansatz präsentiert, der eine automatische Vermessung von nichtsignalisierten Punkten ermöglicht. Mit Hilfe des Förstner-Operators kann die Extraktion von interessanten Punkten (Eckpunkte, Kantenschnittpunkte) erfolgen, wobei auch hier noch sehr viele interaktive Entscheidungen getroffen werden müssen. Bei all diesen Arbeiten wurden nur Schwarz-Weiß-CCD-Kameras verwendet, somit wurden keine Farbbilder in die Bildverarbeitung einbezogen.

Erstmalig ist ein Theodolit mit einer Farb-CCD-Kamera ausgestattet, sodass in dieser Arbeit die Farbinformation für messtechnische Zwecke genützt werden kann und somit völliges Neuland betreten wird. Generell wurde bisher die Farbe als Bildinformation nur in sehr wenigen Arbeiten genützt, denn die Bildverarbeitung wurde großteils auf einfache Grauwertinformationen fokussiert.

Die Publikationen von H.Frey und H.-G.Maas beinhalten die Beschäftigung mit der Farbinformation. H.Frey hat sich vor ca. zehn Jahren ganz allgemein mit der Bildverarbeitung in Farbräumen auseinandergesetzt. H.-G-Maas betrachtet in seiner Publikation Algorithmen der Bildanalyse und -zuordnung in der digitalen Photogrammetrie [Fre88, Maa97].

Der Forschungsbereich Bildinterpretation ist nicht nur auf den Grundlagenbereich der Informatik beschränkt, sondern hat in vielen technischen Fachbereichen Einzug gehalten. Generell ist zu sagen, dass die automatische Bildinterpretation oft noch im Anfangsstadium steckt und nur in einzelnen Teilbereichen den Sprung von der Strategie- und Grundlagenbetrachtung zur Anwendung geschafft hat. Hierbei soll die Arbeit von W.B.Tong u.a. erwähnt sein, die im Rahmen eines geographischen Informationssystems eine Verkehrszeichenerkennung mittels Videobildern vorstellt [Ton99].

Weiters ist festzustellen, dass bei automatischen Systemen, welche kognitive Fähigkeiten des Menschen nachvollziehen sollen, der Übergang zu wissensbasierenden Systemen oder Expertensystemen ab einer gewissen Komplexitätsstufe unerlässlich ist. Auch hier sind im Bereich der Bildinterpretation nur wenige Vorarbeiten zu finden, so die von C.E.Liedtke, der sich mit Strategien der wissensbasierten Bildinterpretation beschäftigt hat [Lie97].

2 Konzept des Messsystems

2.1 Das theodolit- und wissensbasierende Messsystem mit seinen Komponenten

Da diese Arbeit in engem Zusammenhang zum FWF-Forschungsprojekt „Theodolite-based and Knowledge-based Multi-Sensor-System for 3D Object Recognition" steht, wird hier ein kurzer Einblick in die Aufgabenstellung und Konzeption des Messsystems gegeben.

In der Industrie und Verwaltung benötigt man in zunehmendem Maße 3D-Objektrepräsentationen. Theodolite, die in ihrem optischen System eine CCD-Kamera haben und deren Achsen computergesteuert mit Motoren angetrieben werden, können mit den rotierenden Kameras georeferenzierte Mosaik-Panorama-Bilder aufnehmen. Diese Bilder können dann direkt für Objektrekonstruktionen und online Deformationsanalysen genutzt werden. Während der letzten Jahre wurden verschiedene Theodolitmesssysteme entwickelt, jedoch können all diese Instrumente nur eingesetzt werden, wenn Zielmarken die Punkte definieren, anhand derer die Objekte aufgenommen werden sollen.

In diesem Projekt soll gezeigt werden, dass die Informationen der digitalen Bilder flexibler genutzt werden können, wenn verschiedene Arbeitsmethoden zur Anwendung kommen, die auch ohne das Anbringen von Zielmarken auskommen. In diesem Fall bietet sich ein Messvorgang in zwei Schritten an:

1. Punkte, die das Objekt repräsentieren, müssen durch Interest-Operatoren detektiert werden,
2. mit dem zweiten Theodolit müssen homologe Punkte für die 3D-Punktbestimmung aufgesucht werden (Matching).

Einige Methoden basieren auf der Annahme, dass Muster auf den Objektoberflächen vorhanden sind, andere benötigen keine spezielle Textur [KNS01]. Ein solches Theodolitmesssystem ist in der Handhabung ungewöhnlich kompliziert und ein Operateur benötigt umfangreiche Erfahrungen um all die verschiedenen Messmodi auszuwählen. Ein solches Messsystem sollte daher von einem wissensbasierenden System unterstützt werden [Pup91].

Das Messsystem besteht aus zwei Hauptkomponenten:

- ein wissensbasierendes System für die Unterstützung von Entscheidungen und
- ein Prozesssteuerungssystem für die Videotheodolite.

Die wissensbasierende Komponente (WBK) soll die Auswahl der jeweiligen Arbeitsmethode (Messmode) treffen und die entsprechenden Parametereinstellungen für die einzelnen Messverfahren liefern. Inwieweit automatische Entscheidungen und Optimierungen vom System getroffen werden können und wo die Interaktion mit dem zu unterstützenden Operateur einsetzt, wird der weitere Forschungsverlauf zeigen.

Das Prozesssteuerungssystem gliedert sich in die einzelnen Messverfahren (Messmodi) inklusiv sämtlicher Steuerprogramme für deren automatischen Ablauf und die Ansteuerung der Theodolite.

Einzelne Messmodi sind bereits voneinander unabhängig entwickelt worden. Es sind verschiedene Interestoperatoren wie der Förstner-Operator und der Harris-Operator sowie das Gitterlinienverfahren bekannt. Diese Verfahren bilden einzelne Messmodi, deren optimaler Einsatz und das entsprechende Zusammenwirken von der wissensbasierenden Komponente gesteuert wird. Diese kann wiederum auf Informationen aus CAD-Modellen des zu vermessenden Objekts und auf frühere Messergebnisse aus der Messdatenbank (DB) zugreifen. Der Operateur wirkt interaktiv je nach Bedarf in den Prozess ein. Die Struktur des Messsystems ist in Abb. 2.1 dargestellt.

Das Messmodul „Förstner-Operator" nutzt diesen Interestoperator zur Extraktion von markanten Punkten (Eckpunkte, Kantenschnittpunkte) am Objekt, von diesen können dann 3D-Koordinaten bestimmt werden [Mis98].

Das Messmodul „Gitterlinienverfahren" nützt die Anwendung eines Lasers für die aktive Signalisierung eines Punktes. Dabei sollen virtuelle Durchstoßpunkte von Gitterlinien mit dem Objekt erfasst werden, aus welchen wiederum 3D-Koordinaten der Objektoberfläche bestimmt werden [Sei01].

Neben diesen Messmodi soll auch ein weiteres Verfahren integriert werden, welches qualitativ arbeitet und in dieser Arbeit ab Kap. 2.3 beschrieben wird.

Wie bereits erwähnt ist die eigentliche Kernaufgabe geodätischer Messungen die Erfassung von 3D-Koordinaten und deren zeitliche Änderungen eines Objekts. Bevor eine quantitative räumliche Erfassung möglich ist, muss in der Messvorbereitung eine Reihe von qualitativen Bestimmungen am Objekt und der umgebenden Örtlichkeit durchgeführt werden. Es handelt es sich dabei um folgende Bestimmungen:

- um welches Objekt handelt es sich,
- wie sieht das Objekt aus,
- aus welchen Materialien besteht das Objekt und welche Oberflächenbeschaffenheiten liegen vor,
- welche Objektteile sollen messtechnisch erfasst werden,
- welche Messdaten werden gewünscht,
- welche Messpunkte sind dazu notwendig und in welcher Dichte müssen diese vorliegen,
- wie sieht die Umgebung des Objekts aus,
- weitere Informationen über das Objekt und der Beobachtungsbedingungen.

Für den Vermessungsingenieur sind diese Interpretationen in der Messvorbereitung oft schon eine Selbstverständlichkeit. Viele Analysen einer von uns Menschen betrachteten Szene werden uns gar nicht mehr wirklich bewusst, da wir sie von Kind an erlernt haben. Viele dieser erwähnten Bestimmungen sollten teilweise von einem automatischen Messsystem übernommen werden. Durch Interaktion des Operateurs mit wissensbasierenden Messverfahren sollte einerseits eine Unterstützung des Operateurs im Arbeitsprozess erreicht werden und anderseits viele Arbeits- und Entscheidungsschritte bereits selbsttätig ablaufen.

Einen ersten Schritt in diese Richtung zeigt das in dieser Arbeit nachfolgend entwickelte Verfahren. In Hinblick auf Deformationsuntersuchungen soll das hier beschriebene Messverfahren spezielle Entscheidungshilfen auf die Frage, „Welche Objektteile sollen messtechnisch erfasst werden?“, liefern. Es handelt sich dabei um ein qualitatives Messmodul, das wertvolle Ergebnisse über eintretende Formveränderungen unterscheidbarer Objektteile an die wissensbasierende Komponente (WBK) liefert und im weiteren „Farbsegmentverfahren“ genannt wird.

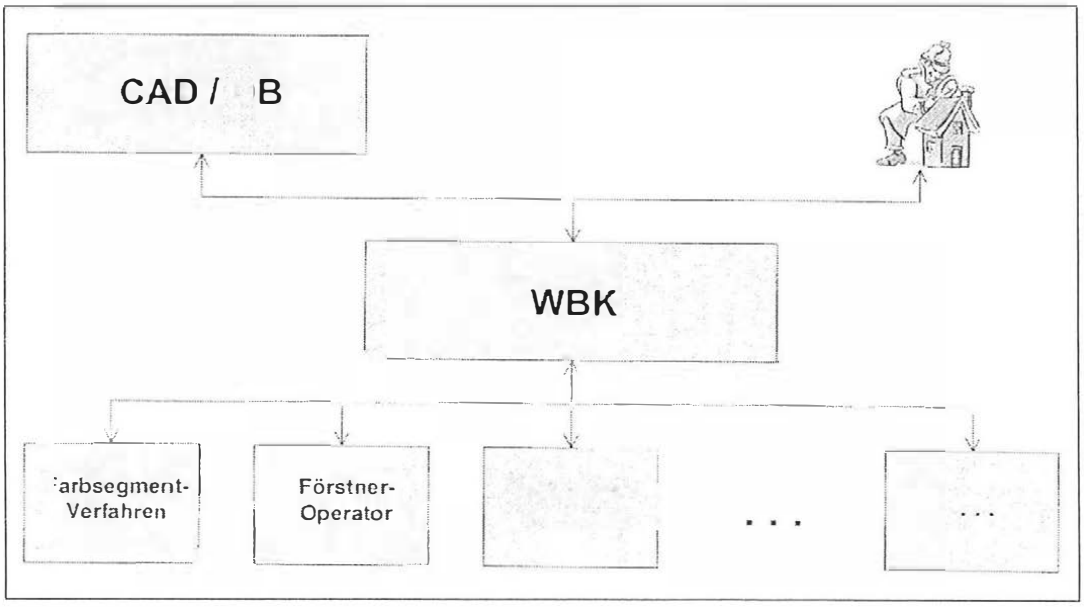


Abb. 2.1: Komponenten eines wissensbasierenden Messsystems

Das Konzept des gesamten Messsystems ist offen ausgelegt, d.h. es ist als Grundgerüst gedacht, in dem vorerst nur einige Messmodi integriert sind. Eine Ausweitung um weitere Messmodi, deren Verknüpfung mit einer Datenbasis und weitere Wissensakquisitions- und Inferenzkomponenten, ist für spezifische Anwendungsfälle sinnvoll und wünschenswert.

2.2 Hardware- und Softwarekomponenten des Messsystems

Um uns zurechtzufinden, nutzen wir Menschen in erster Linie die Augen als „Sensoren", welche einen Teil der radiometrischen Information, die von den uns umgebenden Objekten abgestrahlt wird, aufnehmen. Diese visuellen Reize werden im Gehirn zu komplexen Informationen verarbeitet. Entscheidend sind nicht nur die momentanen Reize sondern auch Erinnerungen und Analogien.

Das visuelle Wahrnehmungsvermögen des Menschen soll mit maschinellen Techniken nachgebildet werden. Analog zur visuellen Wahrnehmung des Menschen benötigt das „maschinelle Sehen" ebenfalls einen bildgebenden Sensor und eine anschließende Verarbeitungseinheit. Wie auch im Gehirn des Menschen, ist nicht nur die unmittelbare Information des Bildes maßgebend, sondern auch die Verknüpfung mit a priori Wissen über die wahrgenommene Szene. Für ein tieferes Einsteigen in die menschliche visuelle Wahrnehmung sei folgende Literatur empfohlen [SDW86, SDW94].

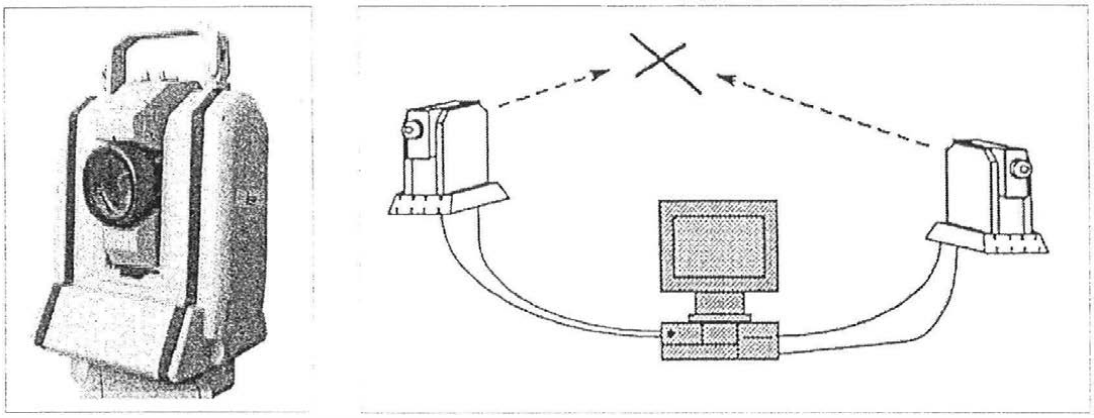
Ein automatisches Messsystem (Messroboter), das die visuelle Wahrnehmung des Menschen nachbildet, setzt sich somit aus folgenden Komponenten zusammen:

- datengewinnende Sensorik (Theodolite mit integrierten Farb-CCD-Kameras),
- datenverarbeitende Einheit (Computer samt Übertragungseinheiten zwischen den Sensoren und dem Computer),
- systemsteuernde und datenverarbeitende Softwaremodule (konventionelle und wissensbasierende Algorithmen).

Die ersten beiden Komponenten bilden die Hardware des Systems. Die Softwaremodule bilden die Gesamtheit aller Programme, die in diesem Projekt entwickelt werden. In Kap. 2.3 werden die einzelnen Komponenten des in dieser Arbeit entwickelten Messmoduls beschrieben.

Für die Bestimmung der Messdaten werden, wie bei der konventionellen Datenerfassung, die entsprechenden Messinstrumente benötigt. Allerdings müssen nun die Messinstrumente mit den bildgebenden Sensoren eine Einheit bilden.

Die verwendete Hardware (Abb. 2.2) besteht aus zwei hochgenauen Theodoliten TM3000 der Firma Leica und einem PC. Die Theodolite wurden um jeweils einer anstelle des Okulars angebauten Farb-CCD-Kamera erweitert (siehe Abb. 2.3). Der PC wurde mit einem für Farbbilder geeigneten Framegrabber ausgestattet. Für die Anwendung des Gitterlinienverfahrens ist ein zusätzliches Tachymeter TCA1800 mit einem koaxial integrierten Laser notwendig. Die Details bezüglich der verwendeten Geräte wurden bereits mehrmals beschrieben und sind folgenden Dissertationen und Diplomarbeiten zu entnehmen [Wie95, Cha97, Mis98, Sei01].



a) b)

Abb. 2.2: a) Theodolit TM3000 b) schematischer Systemaufbau

Hier sei nur soviel erwähnt, dass erstmals Farb-CCD-Kameras zum Einsatz kommen. Es werden Mikrokopfkameras GP-KS162 der Marke Panasonic verwendet. Dabei handelt es sich um ½-Zoll Zwischenzeilenübertragungs-CCD-Bildsensoren mit 752 (H) x 583 (V) Pixel ausgelegt für eine minimale Szenenbeleuchtung von 3Lux.

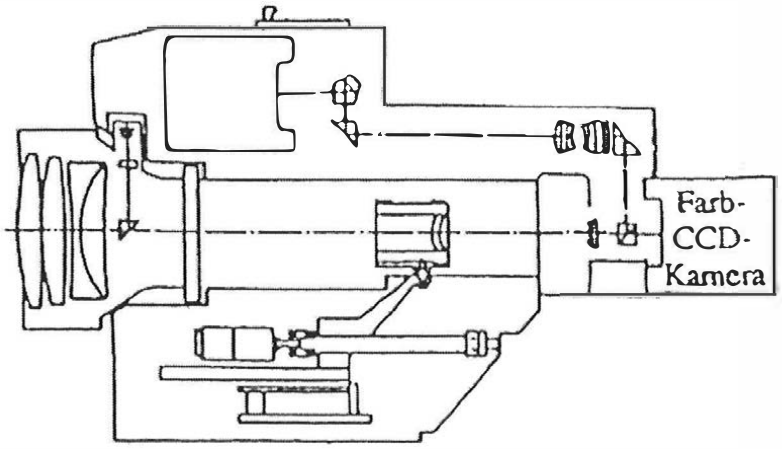


Abb. 2.3: Theodolit TM3000 mit integrierter Farb-CCD-Kamera

2.3 Konzept des Farbsegmentverfahrens als ein Softwaremodul

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Algorithmus bildet das Modul „Farbsegmentverfahren" im gesamten Messsystem.

Das Grundkonzept des zu entwickelnden Verfahrens besteht darin, ausgehend von einem minimalen Input an Information über den zu vermessenden Bereich, zur Gewinnung von Messergebnissen zu gelangen, die eine Überprüfung des Objekts hinsichtlich geometrischer Veränderungen (Deformationen) ermöglichen. Das menschliche visuelle Wahrnehmungsvermögen ist dabei die ausgehende Idee für die Umsetzung der Messalgorithmen.

Der Input ist analog zu jenem Vorwissen, das auch jedem mit konventionellen Methoden arbeitenden Ingenieur zur Verfügung steht. Dieses Vorwissen kann bei der jeweiligen Messaufgabe in unterschiedlichem Ausmaß vorliegen. Der Operateur muss sich neben einer optimalen Standortwahl des Industriemesssystems und dessen räumlicher Lagerung in einem Referenzsystem auch über jene Punkte, deren Koordinaten gewünscht sind, im klaren sein.

Prinzipiell ist zu sagen, dass der Operateur mit diesem Konzept nicht ersetzt werden kann, sondern nur unterstützt wird. Viele Messaufgaben, die mit herkömmlichen Methoden nur aufwendig oder gar nicht durchgeführt werden können, sollen mit diesem Farbinformationen nutzendem System in effizienter Form lösbar sein. So kann speziell bei Überwachungsaufgaben aufgrund einer flächenbasierenden, qualitativen Analyse der Objektoberfläche vorerst auf die zeitraubende Einzelpunktbestimmung verzichtet werden. Erst wenn Formveränderungen (Deformationen) nachgewiesen werden, ist der Einsatz eines weiteren quantitativen Verfahrens notwendig. Ein Messsystem ohne jegliche Interaktion des Operateurs wird bei anspruchsvollen Aufgaben aber weiterhin unerreichbar bleiben.

Das Ablaufschema des Farbsegmentverfahrens ist der Abb. 2.4 zu entnehmen und die detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten folgt im nachfolgenden Kap. 3.

Das menschliche visuelle Wahrnehmungsvermögen basiert auf der Unterscheidung der Kategorien Farbe, Form und Bewegung. Bisher wurde beim „maschinellem Sehen" meist auf den Informationsgehalt der Farbe auch aus technologischen Gründen verzichtet. Bei diesem Konzept der Bildinterpretation stellen Bewertung und Unterscheidung einer Farbbildszene den Ausgangspunkt dar. Einzelne Objekte sollen durch die Bewertung in Form einer Einteilung des Bildes (Segmentierung) nach bestimmten Farben, z.B. rot, gelb, cyan, blau, usw. unterschieden werden.

Wie bei der elektronischen Aufnahme- und Wiedergabetechnik von Bildern üblich, sind Farb-CCD-Bilder in den drei Grundfarben ROT, GRÜN und BLAU als RGB-Bild dargestellt. Die Darstellung des CCD-Bildes als RGB-Bild ist technologisch bedingt. Eine Beschreibung, die sich stark an die visuelle Wahrnehmungsfähigkeit des Gehirns orientiert, ist die Darstellung des Bildes im HSI-Raum mit den Größen INTENSITÄT, SÄTTIGUNG und HUE (BUNTTON).

Dabei sind die Farben mit dem Wert HUE bestimmt, der im umgangssprachlichem Sinne die „Art" der Farbe, d.h. ob rot, gelb, cyan, blau, usw., repräsentiert. Die Größe INTENSITÄT liefert nur die Helligkeitsinformation und die SÄTTIGUNG die „Stärke" der Farbe. Durch Transformation des Bildes vom RGB-Raum in den HSI-Raum wird somit die Bildinterpretation vom Wert HUE bestimmt. Da nur in einem Farbbild die Farbe der Objekte der Wirklichkeit entspricht, muss auch dieses für eine Segmentierung herangezogen werden. Die Klassifikation des Bildes kann daher nur nach unterschiedlichen HUE-Werten bzw. HUE-Intervallen erfolgen.

Die Farbe liefert somit die Zugehörigkeit einzelner Pixel zu einer zusammenhängenden Region innerhalb des Bildes. Nachdem die Farbe die Basisinformation der visuellen Wahrnehmung geliefert hat, kann anschließend die Form der segmentierten Regionen erfasst werden, um in weiterer Folge Informationen über deren Veränderung sowie deren räumliche Lage zu gewinnen.

Doch vorerst ist der im Bild vorhandene Informationsgehalt zu erfassen, der eine Zuordnung von Form und Formänderungen der segmentierten Bereiche zulässt. Eine naheliegende Methodik, analog zur Analyse von Signalen, ist die Anwendung der Fouriertransformation. Neben der Fouriertransformation wird auch ein weiteres modernes Analyseverfahren, die Wavelet-Transformation, untersucht. Zuerst muss eine Funktion gefunden werden, die charakteristische Eigenschaften der Form von Flächen erfasst. Es bietet sich die Abstandfunktion, die aus der Umrandungslinie des segmentierten Bereiches und dem zugehörigen Flächenschwerpunkt bestimmt ist, an.

Das CCD-Bild ist eine Matrix aus Zeilen und Spalten, die Umrandungslinie versteht man als eine Liste von Randelementen (Randpixel). Diese Randelemente müssen für eine Analyse der geometrischen Form der Fläche in einem geordneten Sinne, d.h. ausgehend von einem Randpixel in einem Umlaufsinn von Pixel zu Pixel der Umrandung weiterführend, vorliegen. Die Abstandfunktion ist der jeweilige Abstand eines Randelements bezogen auf den Schwerpunkt der betrachteten Fläche. Damit liegt eine diskrete Funktion vor, deren Verlauf den variierenden Abstand jedes Randpixels zum Schwerpunkt darstellt.

Auf die diskrete Funktion kann eine Fouriertransformation angewandt werden. Damit wird ein Spektrum bestimmt, das je nach Form der Fläche eine unterschiedliche Zusammensetzung aufweist. Analog zur Frequenzanalyse einer Zeitfunktion (Signal) ist damit die Analyse der Abstandfunktion möglich. In ähnlicher Weise kann auch die Kontinuierliche Wavelet-Transformation für Formanalysen und vor allem Formänderungsanalysen eingesetzt werden.

In einem weiteren Schritt zur Analyse des erhaltenen Spektrums ist durch Vergleich mit bereits gemessenen Spektren der Nachweis einer Formveränderung der segmentierten Fläche möglich. Die Analyse ist der anspruchvollste Bereich des gesamten Messverfahrens.

Hier wird deutlich, wie schwierig einfache menschliche Zuordnungen und Interpretationen der visuellen Wahrnehmung, die wir Menschen seit dem Kleinkindalter vollziehen können, in maschinelle Algorithmen umzusetzen sind. Allerdings bestehen Vorteile einer technischen Realisierung darin, dass selbst sehr kleine Änderungen der Form bereits detektiert werden können. Die Bildung von Regeln bei dieser Zuordnung

ist unerlässlich. Methoden wie sie beim Design von Expertensystemen vorkommen, müssen beachtet werden. Soll die Zuordnungsqualität bei höherer Komplexität genügen, wird man nicht auf die Entwicklung von Expertensystemen verzichten können.

Wurde bei einer segmentierten Fläche eine Veränderung festgestellt, so müssen im nächsten Schritt jene Flächen einer weiteren vermessungstechnisch interessanten Interpretation unterzogen werden. Das Messsystem könnte dann die Entscheidung treffen, dass in diesem Bereich des Objekts weitere Messungen mit anderen Messmodi nötig sind, um die entsprechenden Objektveränderungen in hochpräziser, quantitativer Weise beurteilen zu können.

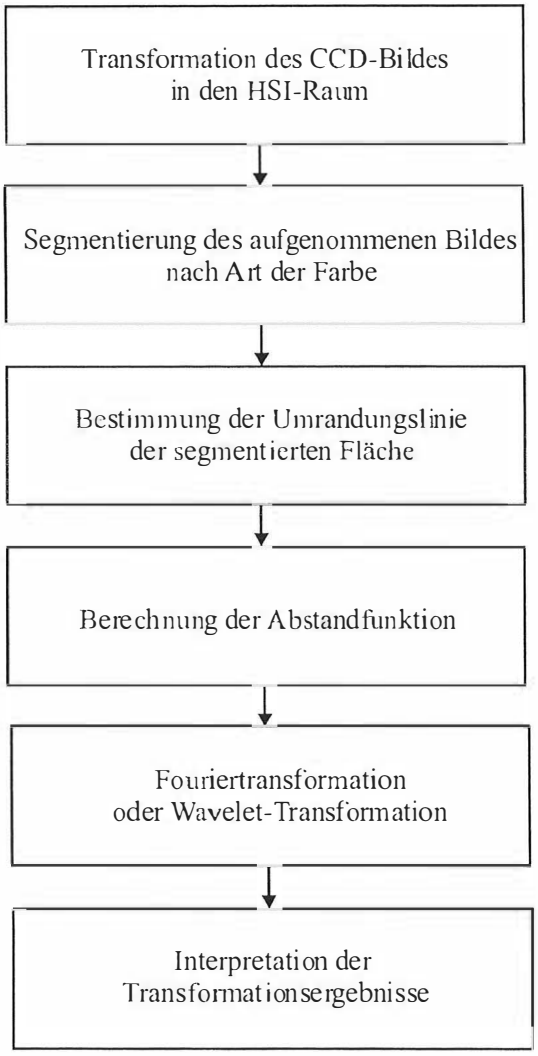


Abb. 2.4: Ablaufschema des Farbsegmentverfahrens

Das Farbsegmentverfahren erfüllt einerseits eine qualitative Alarmfunktion bei Deformationen und anderseits die Möglichkeit, anhand der farblichen Unterschiede des Objekts eine Vorauswahl und Eingrenzung der Objektoberfläche für weitere Messungen zu treffen.

Als primär qualitativer Messmodus steht das Farbsegmentverfahren somit am Beginn der automatischen messtechnischen Beobachtung des Messsystems, kann aber von diesem auch zwischendurch immer für Beobachtungseingrenzungen und für Klarstellungen bei zweifelhaften oder unklaren Observationen eingesetzt werden. Es handelt sich dabei auch um einen Messmodus, der seine ganze Leistungsfähigkeit erst in der Interaktion mit dem Gesamtsystem zur Geltung bringt.

3 Komponenten des Farbsegmentverfahrens

3.1 Der Segmentierungsprozess

Die Physiologie des Farbensehens wird seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts durch zwei Konzepte beschrieben:

- Young-Helmholtzsche Dreikomponententheorie,
- Gegenfarbentheorie von E.Hering.

Die Dreikomponententheorie beschreibt die Farben als dreidimensionale Mannigfaltigkeit, wo drei Grundfarben (ROT, GRÜN, BLAU) alle Farben beschreiben. Diese Theorie stützt sich auf den Aufbau unseres Sehorgans, da es drei verschiedene zapfenförmige Sehzellen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit gibt und bildet daher ein wichtiges Fundament unseres Verständnisses für das Farbensehen. Alle Erscheinungen des Farbensehens können aber damit nicht erklärt werden, dadurch sind auch andere Ansatzpunkte entstanden.

Die Gegenfarbentheorie stellt die Hypothese auf, dass drei gegenläufige Prozesse gleichzeitig stattfinden, ein Hell-Dunkel-Prozess, ein Rot-Grün- und ein Blau-Gelb-Prozess.

Heute weiß man, dass beide Theorien ihre Berechtigung haben. Die Dreikomponententheorie bezieht sich auf die Physiologie des Auges, während die Gegenfarbentheorie Eigenschaften unseres Farbensehens beschreibt, die durch die Reizverarbeitung im visuellen System des Gehirns bestimmt sind [BS93].

Die Aufgaben des Auges werden hier von der CCD-Farb-Kamera übernommen. Der prinzipielle Aufbau eines solchen CCD-Sensors ist aus der Abb. 3.1 ersichtlich. Der CCD-Sensor besteht aus einer rasterförmigen Anordnung von lichtempfindlichen Elementen, die nacheinander ausgelesen werden. Jedes Sensorelement eines Single-Chip-CCD-Sensors gliedert sich üblicherweise in 2x2 Sampling-Felder (siehe Abb. 3.2), deren Elementarpixel in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen (Filterung) empfindlich sind. Jedes Feld repräsentiert damit ein Farbpixel. Da Grün am besten von Menschen wahrgenommen wird, eignet sich dieses am besten zur Fehlerverringerung und ist doppelt vergeben [HDB00].

Da eine CCD-Kamera analog zum Auge Felder mit drei unterschiedlichen Farbempfindlichkeiten besitzt, eignet sich die Dreikomponententheorie auch zur Beschreibung von Farbaufnahmen.

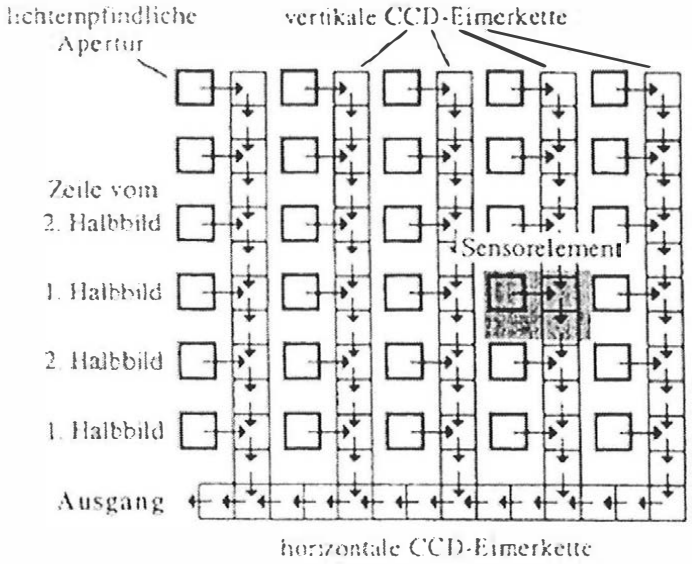


Abb. 3.1: Prinzipieller Aufbau eines CCD-Sensors

Abb. 3.2: Filteranordnung bei Single-Chip Farb-CCD-Kameras, wobei jeder Buchstabe die entsprechende Farbempfindlichkeit (ROT, GRÜN, BLAU) angibt

Die einzelnen Farben spannen einen Würfel im Raum auf. Die drei Raumachsen stellen die drei Grundfarben oder Primärvalenzen (ROT, GRÜN, BLAU) dar. Jeder Vektor zu einem Punkt in diesem Würfel liefert eine bestimmte Farbvalenz welche in ihre Primärvalenzen zerlegt werden kann. Unter dem Begriff Farbvalenz versteht man eine Klasse gleichaussehender Farbreize. All jene Farbvalenzen, die auf der Raumdiagonale des Würfels liegen sind unbunte Farben mit unterschiedlichen Grauwerten, von Schwarz im Ursprung bis Weiß im gegenüberliegenden Eckpunkt.

Wie bereits erwähnt, trägt die Farbe als ein entscheidendes Unterscheidungsmerkmal zur Betrachtung einer Szene bei. Zur Unterscheidung einzelner Objekte im CCD-Bild ist eine Segmentierung des CCD-Bildes nach unterschiedlichen Farben, d.h. einer Klasse von nahe beisammen liegenden Farbvalenzen, erforderlich. Wie die nachfolgenden Erklärungen verdeutlichen werden, erfordert der Segmentierungsprozess

nach unterschiedlichen Farben die Transformation des Bildes vom RGB-Raum in den HSI-Raum. Im HSI-Raum werden alle Farben durch die Grundgrößen INTENSITÄT, SÄTTIGUNG und HUE (BUNTTON) dargestellt. Um die Bedeutung der Transformation zu verstehen, legen wir gedanklich eine Ebene durch den Farbwürfel, sodass sich ein Maxwell´sches Farbdreieck mit den Ecken ROT, GRÜN und BLAU ergibt (siehe Abb. 3.3).

Alle Farbvalenzen auf dieser Ebene haben die gleiche INTENSITÄT, deren Wert auf der Raumdiagonale vom Wert Null im Schwarzpunkt auf den Maximalwert im Weißpunkt ansteigt. Mit dieser Größe ist eine Farbvalenz auf den Schwarz-Weiß-Wert reduziert. In diesem Dreieck können nun die beiden anderen Größen definiert werden. Die SÄTTIGUNG ist die gewichtete Distanz vom Schwerpunkt (Durchstoßpunkt der Unbuntgerade) zur Begrenzungslinie des Dreiecks. Sie beschreibt die „Stärke" der Farbe, d.h. ob es sich um eine kräftige Farbe oder um einen Pastellton handelt. Der BUNTTON (HUE) ist der Winkel zwischen einer wählbaren Nulllinie und der Linie zwischen Schwerpunkt und Farbvalenz. Er beschreibt die „Art" der Farbe, d.h. welchen Namen die Farbe bekommt.

Der Wertebereich der einzelnen Größen ist aufgrund der 8bit-Auflösung des Framegrabbers auf die Werte von 0 bis 255 beschränkt. Durch die zyklische Definition des HUE-Wertes entsteht an der Nulllinie bei ähnlichen Farbvalenzen ein Sprung von 0 auf 255. Aus anwendungstechnischen Gründen wurde die Nulllinie auf die Purpurlinie gelegt, da eine Beeinträchtigung bei der Segmentierung von purpurfarbenen Objektteilen als geringste Einschränkung im Anwendungsfall akzeptiert werden kann.

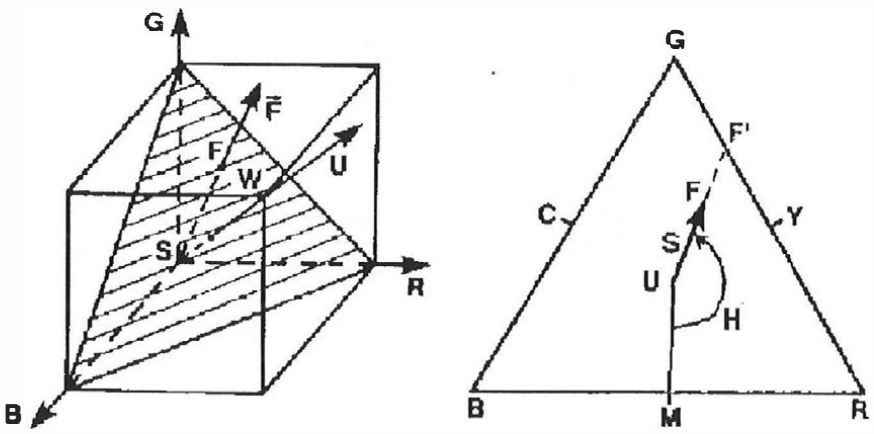


Abb. 3.3: Farbwürfel im RGB-Raum und Farbdreieck

Aus diesen Überlegungen und der Darstellung im Farbdreieck ergeben sich folgende Transformationsgleichungen für die Transformation eines CCD-Bildes von der Darstellung im RGB-Raum in die Darstellung im HSI-Raum:

für die Intensität I:

$$I = \frac{(R+G+B)}{3}, \qquad \begin{aligned} R &= \text{ROT } [0,255] \\ G &= \text{GRÜN } [0,255] \\ B &= \text{BLAU } [0,255] \end{aligned}$$

für die Sättigung S:

$$S = \left(1 - 3 \cdot \frac{\min\{R,G,B\}}{R+G+B}\right) \cdot 255,$$

und für Hue (Buntton):

$$H = \frac{2\pi}{3} + \arctan\frac{\sqrt{3}(G-B)}{(G-B)(R-B)}, \quad \text{für } R > B \text{ und } G \geq B$$

$$\text{oder} \quad H = \frac{4\pi}{3} + \arctan\frac{\sqrt{3}(B-G)}{(B-R)(G-R)}, \quad \text{für } G > R$$

$$\text{oder} \quad H = \arctan\frac{\sqrt{3}(R-B)}{(R-G)(B-G)}.$$

Für die Darstellung der einzelnen Schritte im Farbsegmentverfahren wird eine einfache Szene aus unterschiedlichen bunten einfachen geometrischen Formen gewählt (siehe Abb. 3.4).

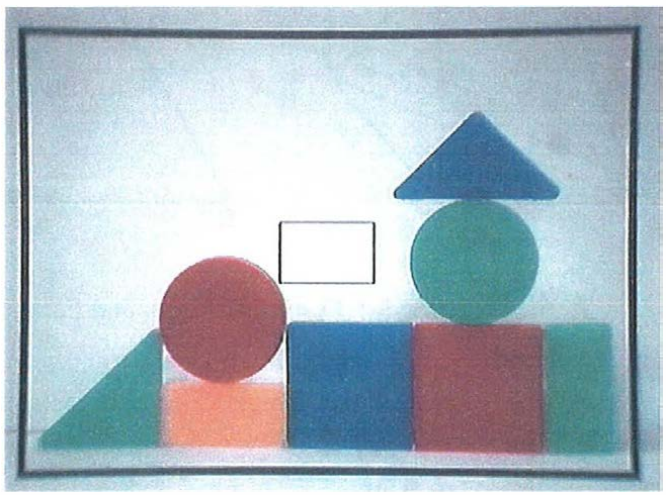


Abb. 3.4: Farb-CCD-Bild

Jede transformierte Größe ergibt ein Grauwertbild der Szene (Abb. 3.5 - Abb. 3.7). Das Bild der INTENSITÄT entspricht dem Schwarz-Weiß-Bild der Farbszene. In diesem wird nur eine Helligkeitsinformation übermittelt. In manchen Fällen hat eine Änderung der Farbe auch eine Änderung des INTENSITÄT-Wertes zur Folge. Doch ist die Problematik aus dem Schwarz-Weiß-Bild (siehe Abb. 3.5) die unterschiedlichen Farbbereiche zu unterscheiden, deutlich erkennbar. Speziell Rot und Grün können kaum bis nicht unterschieden werden. Analog dazu ist die Rot-Grün-Farbblindheit bei Menschen. Eine Segmentierung nach unterschiedlichen Farben ist daher in einem Schwarz-Weiß-Bild so gut wie unmöglich. Das Farbbild ist wirklichkeitsnahe und liefert somit mehr Details über die aufgenommene Szene.

Im Bild mit den Werten der SÄTTIGUNG können ebenfalls die Farben der einzelnen Objekte nicht unterschieden werden. Aus Abb. 3.6 ist erkennbar, dass die unterschiedlich farblichen Objekte sehr ähnliche Grauwerte bei der Größe des SÄTTIGUNG-Wertes aufweisen.

Im Vergleich dazu ist im Bild der Größe HUE eine deutliche Grauwertabgrenzung der unterschiedlichen Farben gegeben. Schon die oberflächliche Betrachtung der Abb. 3.7 zeigt, dass sich die einzelnen Objekte deutlich voneinander unterscheiden.

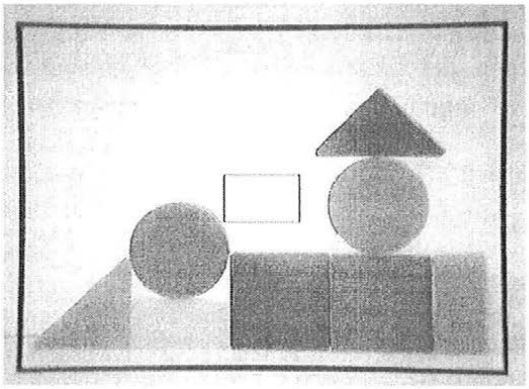


Abb. 3.5: Grauwertbild der Größe I

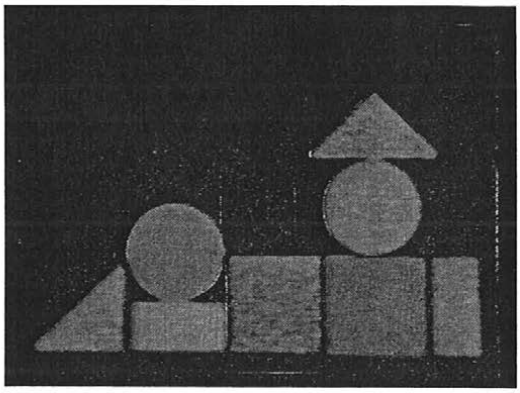


Abb. 3.6: Grauwertbild der Größe S

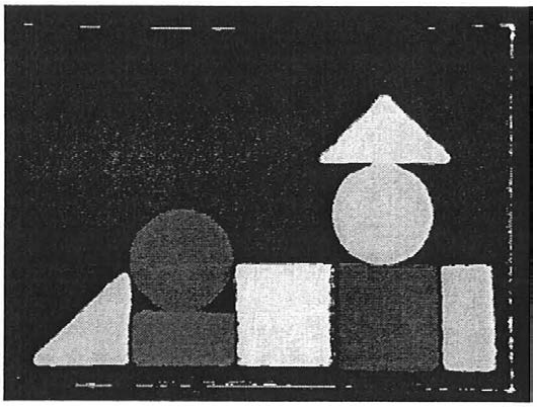


Abb. 3.7: Grauwertbild der Größe H

Diese empirischen Untersuchungen zeigen deutlich, dass Objekte unterschiedlicher Farben nur in einem Farbbild unterschieden werden können. Nach der Transformation des CCD-Bildes in den HSI-Farbraum kann anhand der Größe HUE die Segmentierung nach unterschiedlichen Farben erfolgen. Sie erfolgt durch die Festlegung eines bestimmten HUE-Intervalls. Jedes HUE-Intervall liefert alle Regionen einer bestimmten dem Intervall entsprechenden Farbe. Eine Vielzahl an durchgeführten Experimenten zeigt, dass bei der Segmentierung einzelne Objekte nur dann korrekt und vollständig erfasst werden können, wenn neben den HUE-Werten auch die Größen INTENSITÄT, SÄTTIGUNG und die minimale Pixelanzahl des segmentierten Objekts in Betracht gezogen werden. Somit erfolgt eine Festlegung von Schwellwerten für die INTENSITÄT und die SÄTTIGUNG sowie eine Definition der Grenze für die untere Schranke der Pixelanzahl eines Objekts.

Als Beispiel sollen zunächst aus Abb. 3.4 Objekte mit der Farbe „Rot" gefunden werden. Neben diesem Beispiel wurden auch viele andere Farbszenen untersucht. Empirische Untersuchungen ergaben die entsprechenden Intervallwerte für die Segmentierungen nach unterschiedlichen Farben. Ebenso konnten ideale Schwellwerte für die anderen Größen definiert werden.

Für die Segmentierung nach der Farbe „Rot" wurde ein optimales Intervall der HUE-Werte von 36 bis 48 gefunden. Wird der niedrige HUE-Wert kleiner gewählt, so werden auch purpurfarbene Bereiche erfasst. Wenn der höhere Wert größer gewählt wird, werden auch orange und gelbe Bereiche einbezogen.

Die Schwellwerte für die Pixelauswahl wurden folgendermaßen optimiert:

- untere Schranke für Weiß: 190,
- obere Schranke für Schwarz: 25,
- untere Schranke für die Sättigung: 30,
- minimale Pixelanzahl für ein Objekt: 100.

Das bedeutet, dass nur jenes Pixel einbezogen wird, dass einen INTENSITÄTS-Wert zwischen 25 und 190 und einen SÄTTIGUNGS-Wert über 30 besitzt. Weiters wird eine Region nur dann als Objekt angenommen, wenn die Pixelzahl der Region minimal 100 beträgt. Werden für die INTENSITÄT andere Schranken gewählt, so werden bei größerem Intervall helle und dunkle unbunte Bereiche einbezogen und bei kleinerem Intervall nicht der gesamte farbige Bereich erfasst. Wenn die Schranke für die SÄTTIGUNG herabgesetzt wird, werden ebenfalls unbunte Bereiche einbezogen.

Die Abb. 3.8 zeigt nun alle gefundenen Bildbereiche, die in dem angegebenen HUE-Intervall liegen und die Schwellwerte für die INTENSITÄT und SÄTTIGUNG erfüllen.

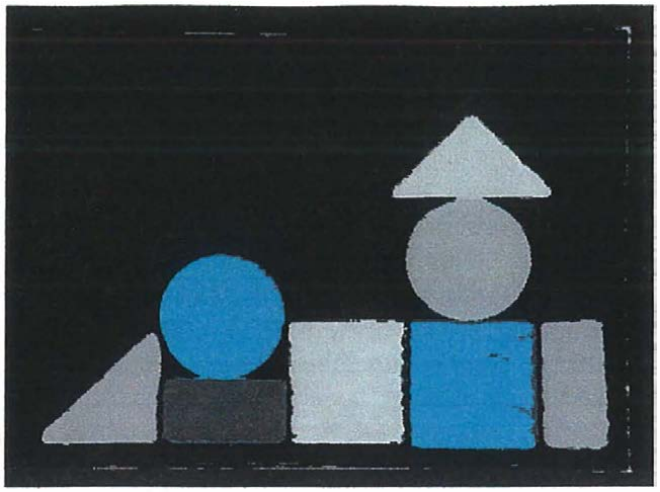


Abb. 3.8: Ausgewählte Pixel im entsprechenden HUE-Intervall von 36 bis 48, die auch die Schwellwerte für INTENSITÄT und SÄTTIGUNG erfüllen

Unter der Berücksichtigung der geforderten minimalen Pixelanzahl ergeben sich genau zwei Flächen, die dann als Segmentierungsergebnis vorliegen (Abb. 3.9). Deutlich ist im CCD-Bild die Auswahl des roten Kreises und des roten Vierecks erkennbar.

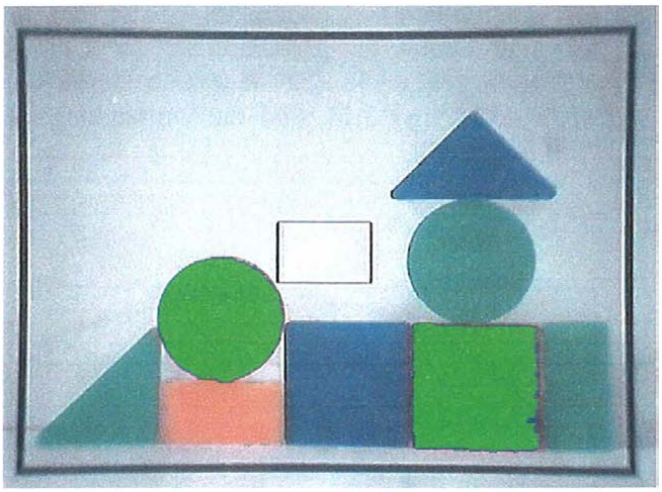


Abb. 3.9: Ergebnis der Segmentierung nach roten Objekten

3.2 Die Abstandfunktion

Nachdem nun die Segmentierung nach Objekten bestimmter Farben erfolgt ist, müssen die gefundenen Regionen einer weiteren Untersuchung unterzogen werden. Schließlich sollen nicht nur Objekte bestimmter Farben detektiert werden, sondern auch Ergebnisse über deren Veränderungen vorliegen. Von der reinen Farbanalyse des CCD-Bildes erfolgt nun der Übergang zur messtechnischen Formanalyse, deren vorrangiges Ziel das qualitative Auffinden einer Formveränderung ist.

Es muss eine Funktion gefunden werden, die im Hinblick auf weitere Analysen möglichst viel an Information über die Form des Objekts liefert. Analog zur visuellen Wahrnehmung des Menschen, wo speziell die Begrenzungen unterscheidbarer Regionen und Schattenbildungen Rückschlüsse auf die Form zulassen, bietet sich auch beim automatisierten Verfahren die Umrandungslinie der segmentierten Fläche zur Formunterscheidung an.

Da das CCD-Bild einen diskreten Aufbau (picture elements = pixel) hat, liegt die Umrandungslinie als Liste von Paaren von Pixelwerten vor. Ein Algorithmus, der die Nachbarschaft der Pixel der segmentierten Region untersucht, findet all jene Pixel, die diese segmentierte Region außen begrenzen. Ein Randpixel kann nur jenes Pixel sein, dass zumindest ein unmittelbares Nachbarpixel besitzt, das nicht zur segmentierten Region gehört. Etwaige Fehler bei Bestimmung der Umrandungslinie, die durch einzelne nicht zur Region gehörende Pixel innerhalb dieser Region entstehen, werden behoben. In den Abb. 3.10 und 3.11 sind die Umrandungslinien der segmentierten Flächen aus Abb. 3.9 dargestellt.

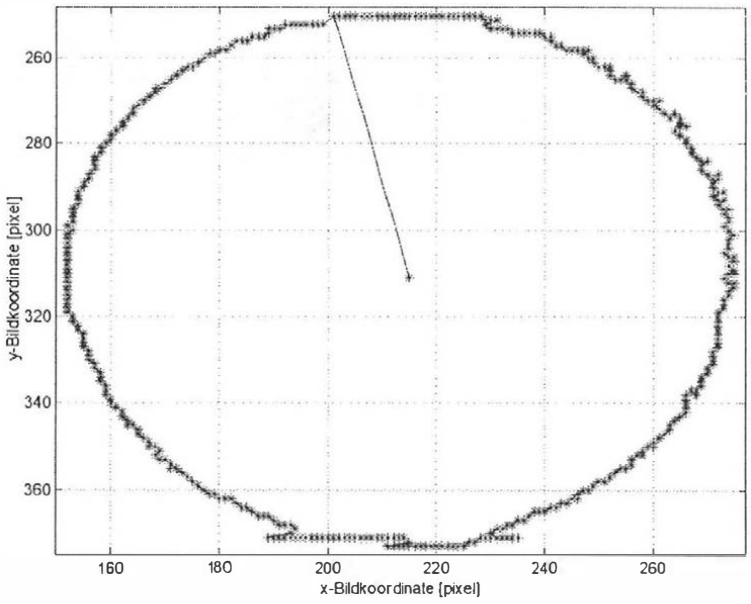


Abb. 3.10: Umrandungslinie des Kreises mit Schwerpunkt

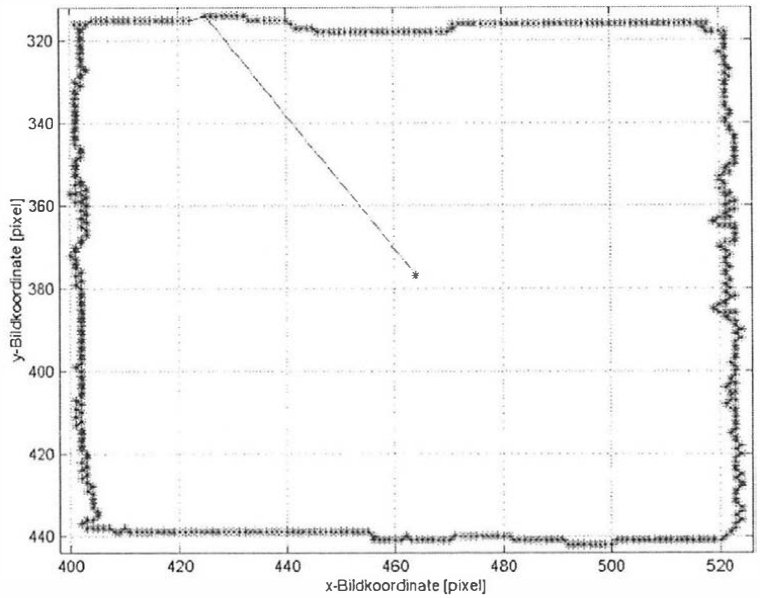


Abb. 3.11: Umrandungslinie des Vierecks mit Schwerpunkt

Dabei ist festzustellen, dass diese extrahierten Umrandungslinien Abweichungen gegenüber den erwarteten Randlinien aufweisen. Diese Fehlerbehaftung real bestimmter Umrandungslinien wirft generell einige Schwierigkeiten und Grenzen der Formanalyse auf.

Für alle nachfolgenden Abbildungen und Berechnungen wurde die Mathematiksoftware MATLAB [ÜK00, MAT01] verwendet. Sie bietet für empirische Untersuchungen und Testzwecke eine umfangreiche und leistungsfähige Plattform. Kleine Nachteile bei ungleichen Darstellungen der Diagrammachsen werden in Kauf genommen. Sie beeinträchtigen allerdings in keiner Weise die folgenden Überlegungen und Berechnungen.

Bei der Analyse empirisch gefundener Umrandungslinien von einfachen undeformierten Objekten können folgende Abweichungen von einer idealen Form gefunden werden (siehe Kap. 5.1):

- die Umrandungslinie ist nicht glatt,
- Kreise entarten zu Ellipsen,
- Vierecke werden verzerrt.

Die Gründe für diese Abweichungen sind unterschiedlich begründet:

- unglatte Randlinien sind durch den CCD-Sensor bestimmt, da die Aufnahmequalität des Sensors wesentlich das Segmentierungsergebnis bedingen,
- Verzerrungen sind im wesentlichen auf die Aufnahmeposition zurückzuführen. So wird eine kreisförmige Objektoberfläche nur dann korrekt als Kreis abgebildet, wenn die Richtung der Kameraachse mit der Normalrichtung der Objektfläche im Objektschwerpunkt übereinstimmt und die Objektoberfläche plan ist.

Da Formänderungen im Vordergrund der Betrachtungen stehen, ist die ausschließliche Bestimmung der Begrenzungslinie der segmentierten Objekte für weitere Analysen unattraktiv. Es empfiehlt sich die Essenz dieser Umrandungslinie zu betrachten.

Die vorliegenden Randpixel beschreiben eine geschlossene Kurve um den segmentierten Bereich. Diese Fläche besitzt einen Flächenschwerpunkt. Somit kann der Abstand von jedem Randpixel zu diesem Schwerpunkt bestimmt werden. Beginnend von einem Pixel können die einzelnen Abstände im Uhrzeigersinn geordnet berechnet werden. Als Startpixel wird jenes Pixelpaar der Umrandungslinie gewählt, das erstens die niedrigste y-Bildkoordinate und zweitens die niedrigste x-Bildkoordinate aufweist.

Man erhält somit eine Funktion der Pixeldistanz bezogen auf die laufende Punktnummer. Je nach Form der segmentierten Fläche hat diese Abstandfunktion einen entsprechend unterschiedlichen Verlauf. Zur Fokussierung auf die Abstandsänderungen werden die Abstände nur als Schwankung um den mittleren Abstand zum Schwerpunkt betrachtet. Die entsprechenden normierten Ergebnisse der Abstandfunktionen der betrachteten Beispiele sind aus Abb. 3.12 und 3.13 zu entnehmen. Ein wesentlicher Vorteil der normierten Darstellung liegt in der weitgehenden Objektgrößen-unabhängigkeit und ist deutlich von der Objektform abhängt.

Die Abstandfunktion besitzt je nach segmentierter Form einen spezifischen Charakter und ändert sich entsprechend der entstehenden Formveränderung. Die weitere Extraktion von Information über die auftretende Deformationen kann grundsätzlich auf verschiedenste Weise erfolgen. Analog zu Anwendungen in der Mathematik und anderen technischen Anwendungsgebieten wird in dieser Arbeit auch der Weg über Transformationen (Fouriertransformationen und Wavelet-Transformation) eingeschlagen (siehe Kap. 3.3).

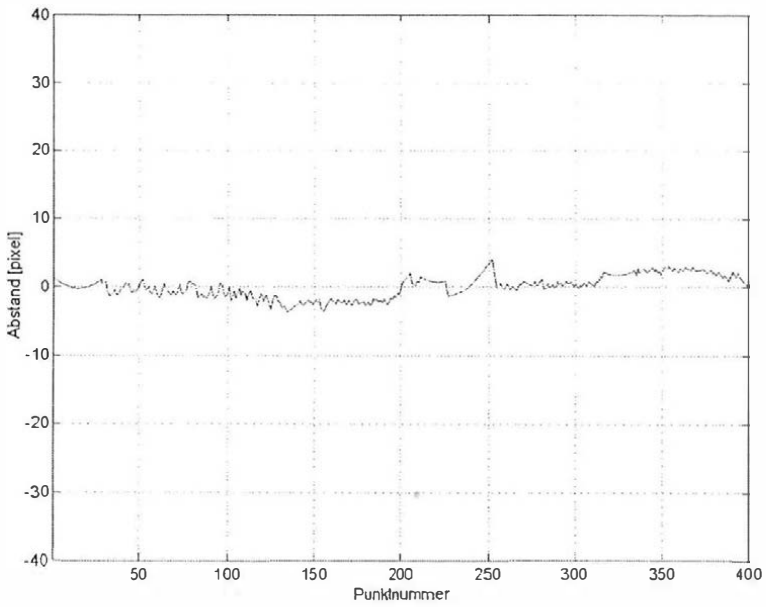


Abb. 3.12: Normierte Abstandfunktion des Kreises

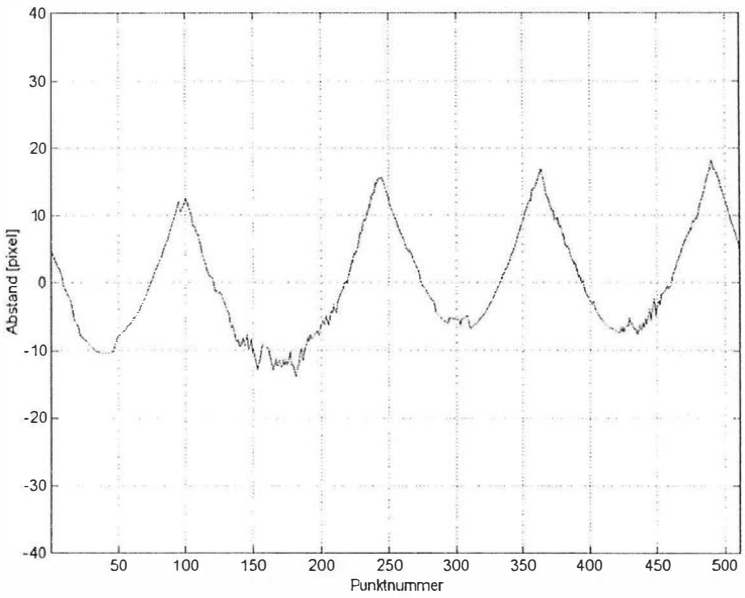


Abb. 3.13: Normierte Abstandfunktion des Vierecks

In den erhaltenen Abstandfunktionen sind wiederum die Abweichungen von den idealen Kurven sehr deutlich erkennbar. So sollte die normierte Abstandfunktion eines Kreises überall die Werte Null aufweisen. Stattdessen kommen die elliptische Verzerrung und die Schwankungen deutlich zum Vorschein. Auch bei der Abstandfunktion des Vierecks sind die unglatte Umrandungslinie und eine Neigung des mittleren Abstandes auf die Nulllinie bezogen feststellbar. In dieser Neigung spiegelt sich die Verzerrung gegenüber einer idealen Rechteckgestalt. Sehr gut erkennt man die charakteristischen vier Spitzen, die den vier Eckpunkten des Vierecks entsprechen. Weitere Details zu den Ergebnissen von idealen Formen unter idealen Bedingungen finden sich in Kap. 5.1.

3.3 Transformation zur Vereinfachung einer Problemlösung

Zur Verdeutlichung der Motivation bei der Auswahl der weiteren Analyseschritte sei ein kleiner Exkurs erlaubt. In der Mess- und Nachrichtentechnik ist die signaltheoretische Untersuchung von Sensoren und Schaltkreisen von großer Bedeutung. Die Anwendung von mathematischen Transformationen wie Fouriertransformation oder Laplacetransformation ermöglicht eine einfache Signalanalyse. Es kann mit einer Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich ein beliebiges Signal auf seine einzelnen Frequenzanteile analysiert werden.

Der Übergang von einem in einen anderen Darstellungsbereich, d.h. der Übergang vom Zeit- in den Frequenzbereich, erleichtert generell mathematische Berechnungen. Statt der komplizierten Lösung von Differentialgleichungen muss nach Anwendung solcher Transformationen nur noch mit einfachen algebraischen Gleichungen weiter gerechnet werden.

Die Transformation von einem Darstellungsbereich in einen anderen Bereich kann auch für andere Problemstellungen genützt werden. So soll hier auch versucht werden, die Fouriertransformation für eine Untersuchung der segmentierten Flächen anzuwenden. Es muss eine charakteristische Funktion als Äquivalent zur klassischen Signalfunktion nach der Zeit gefunden werden. In der Abstandfunktion (Kap. 3.2) ist diese für jede extrahierte Fläche gefunden. Es wird erwartet, dass durch die Anwendung der Fouriertransformation auf die Abstandfunktion eine Vereinfachung der weiteren Interpretationen über entstandene Formveränderungen erzielt wird. Zum Vergleich und zur eventuellen Verbesserung der anschließenden Interpretation wird auch die Wavelet-Transformation verwendet. In den Diagrammen werden die Achsengrößen dimensionslos angegeben, da ausschließlich der Zahlenwert von Interesse ist.

3.3.1 Weg 1: Fouriertransformation

Da die Abstandfunktion eine diskrete Funktion ist, kommt die Diskrete Fouriertransformation zur Anwendung [Bri92]:

$$H(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) e^{-j 2\pi n k / N} \qquad n = 0, 1, \ldots, N\text{-}1$$

Die Abb. 3.14 und 3.15 zeigen die berechneten Fourierspektren der bisherigen Beispiele. Da in unserer Betrachtung die Ausgangsfunktion eine Funktion des Ortes und nicht der Zeit ist, spricht man beim Ergebnis von Amplituden als Funktion der Sequenz.

Wie bei den Abstandfunktionen zeigen sich auch hier die Abweichungen vom entsprechenden Idealfall. So treten beim idealen Kreis generell keine Amplituden auf, im Realfall sind sie deswegen sehr klein. Beim Viereck blieben nur die Amplitude, die Vielfache von vier bilden, übrig. Die anderen Amplituden müssten ebenfalls die Werte Null haben (siehe Kap. 5.1).

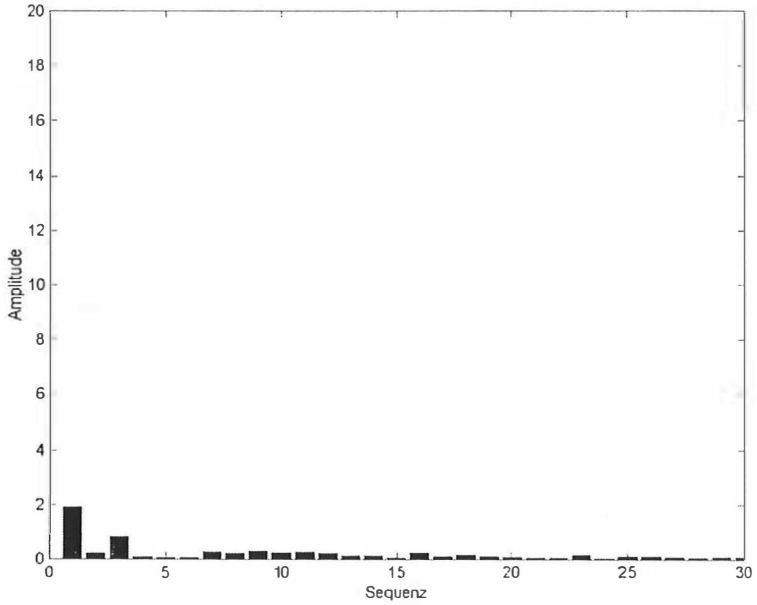


Abb. 3.14: Fourierspektrum des Kreises

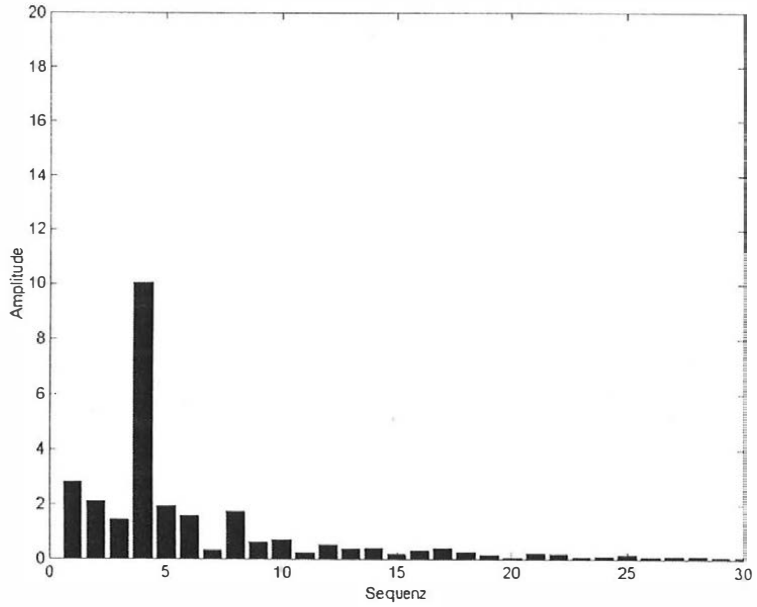


Abb. 3.15: Fourierspektrum des Vierecks

3.3.2 Weg 2: Wavelet-Transformation

Eine weitere Möglichkeit aus den Abstandfunktionen mittels Transformation besser die jeweilig charakteristische Information zu erhalten, stellt die Wavelet-Analyse dar. Sie ist mit der Fouriertransformation verwandt, bietet im Gegensatz zu dieser jedoch eine Mischung aus Zeit(Ort)- und Frequenz(Sequenz)analyse des Signals. Die Kontinuierliche Wavelet-Transformation liefert als Ergebnis Wavelet-Koeffizienten als Funktion von Scale und Position [MAT01].

Scale ist eine Größe, die mit der Frequenz (in unserem Fall Sequenz) indirekt proportional ist. Ein hoher Wert für Scale bedeutet eine Auflösung nach niedriger Sequenz und ein niedriger Wert für Scale nach hoher Sequenz. Die Größe Position entspricht der Zeit bei Zeitfunktionen, in diesem Fall des Ortes (der Punktnummer).

Die Abb. 3.16 zeigt die Form des Daubechies-Wavelets mit dem in unterschiedlich skalierter Form die Abstandfunktion über den gesamten Bereich abgescannt wird. Dabei können eine Vielzahl an beliebigen Wavelets definiert werden. Aufgrund der zu erwartenden Abstandfunktionen und deren Änderungen bietet sich das Daubechies-Wavelet als gängiges Wavelet gut an, da dieses die beste Übereinstimmung mit dem Verlauf der Abstandfunktion und deren Änderungen erwarten lässt und Voraussetzungen für gute Interpretationsergebnisse liefert.

Die Werte für die Skalierung des Wavelets liefert der Parameter Scale, dieser bildet die y-Achse des Diagramms der Wavelet-Transformation. Die Positionierung des Wavelets erfolgt kontinuierlich längs der Achse der Punktnummer (Ort) der Abstandfunktion und bildet die x-Achse des Diagramms. Eine hohe Korrelation des Wavelets mit der lokalen Form der Abstandsfunktion liefert hohe Wavelet-Koeffizienten, wobei hier wieder stark der entsprechende Skalierungswert zum Tragen kommt. Die Abb. 3.17 und 3.18 zeigen allgemeine Beispiele von Ergebnissen einer Wavelet-Transformation.

Abb. 3.16: Daubechies-Wavelet mit niedriger und hoher Skalierung

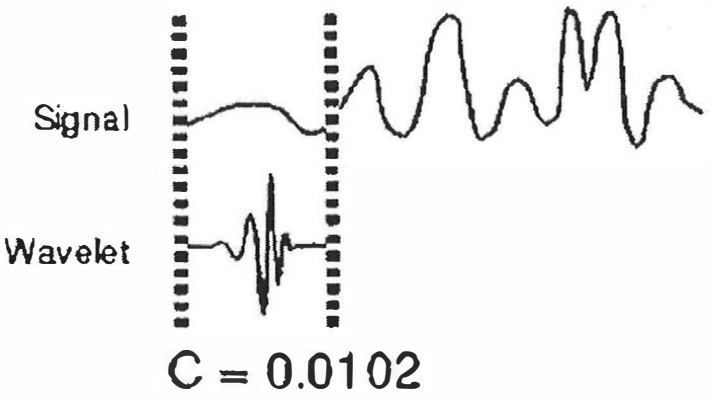


Abb. 3.17: Niedriger Wavelet-Koeffizient aufgrund geringer Korrelation des Wavelets mit dem Signal

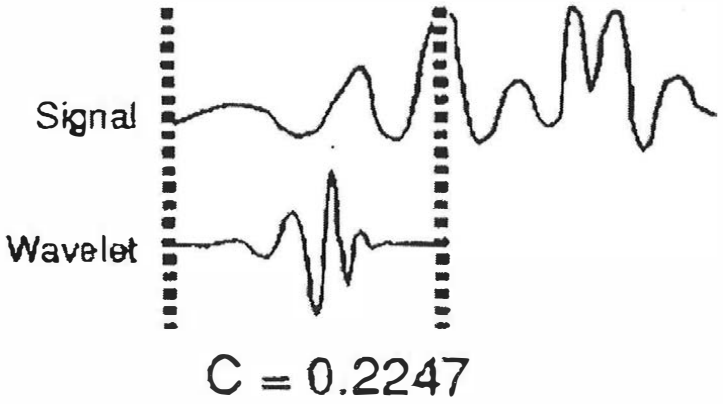


Abb. 3.18: Höherer Wavelet-Koeffizient aufgrund stärkerer Korrelation des Wavelets mit dem Signal

Die Wavelet-Koeffizienten bilden ein „Gebirge" über der Fläche, welche durch die Größen Scale und Position aufgespannt ist. In dieser Anwendung gibt die Achse der Position die Punktnummer (den Ort) der Abstandfunktion an. Das Ergebnis der Wavelet-Transformation kann in zweidimensionaler Darstellung als farblich codiertes Höhenmodell oder in dreidimensionaler Darstellung in Form eines Reliefs ausgegeben werden. In den Abb. 3.19 bis 3.22 sind die zweidimensionalen und die dreidimensionalen Darstellungen der Ergebnisse der Wavelet-Transformation für obige Abstandfunktionen abgebildet. Generell ist zu beachten, dass die Randbereiche nicht in die Betrachtung einbezogen werden dürfen, da diese Korrelationswerte vor allem bei hohen Skalierungswerten Phantasiewerte darstellen.

Idealerweise müsste beim Kreis das Ergebnis komplett eben sein, während beim Viereck (Quadrat) die Dynamik gleichförmig ist und die Koeffizienten bei den „Bergen" gleiche Werte annehmen (siehe Kap. 5.1).

Eine Entscheidung über eine Auswahl zugunsten einer der beiden Transformationsmethoden kann noch nicht getroffen werden. In den weiteren Betrachtungen werden immer beide Transformation betrachtet.

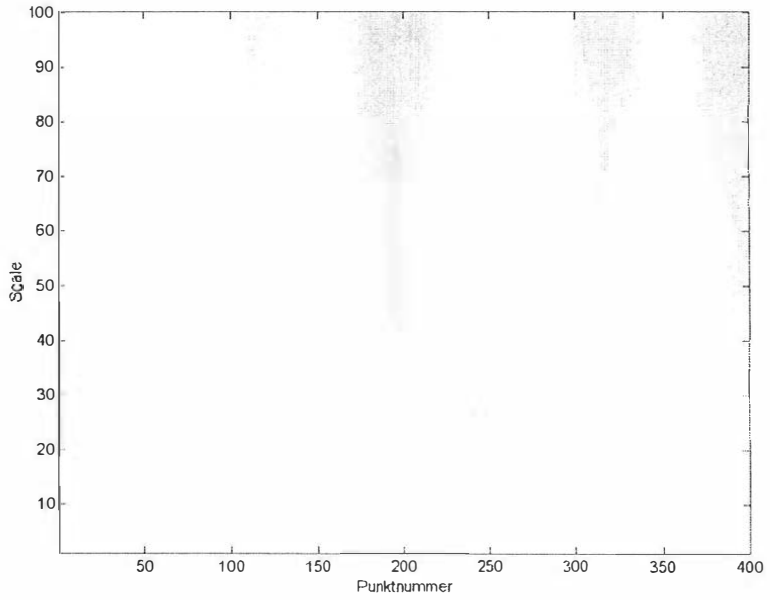


Abb.3.19: Wavelet-Transformation des Kreises in zweidimensionaler Darstellung

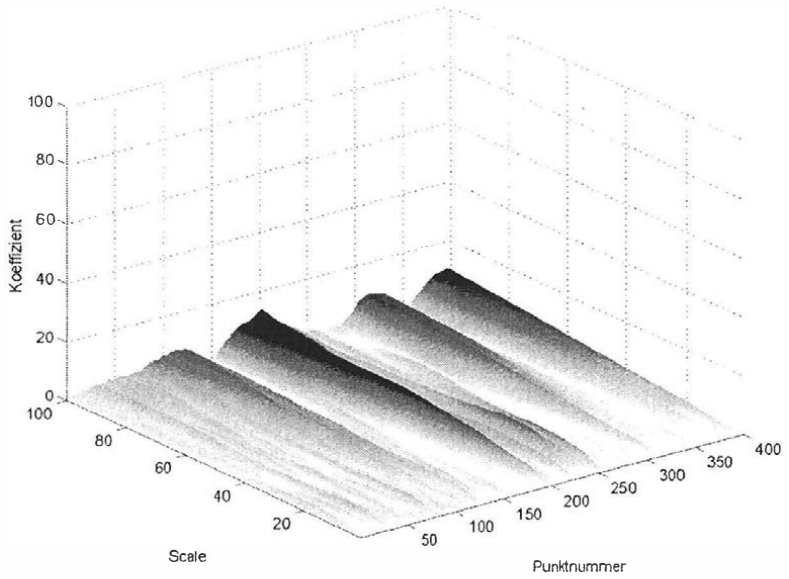


Abb. 3.20: Wavelet-Transformation des Kreises in dreidimensionaler Darstellung

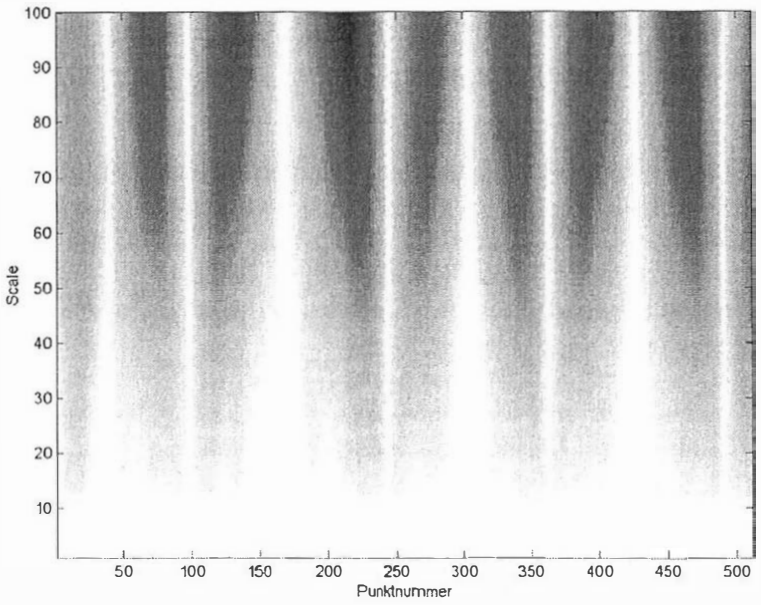


Abb. 3.21: Wavelet-Transformation des Vierecks in zweidimensionaler Darstellung

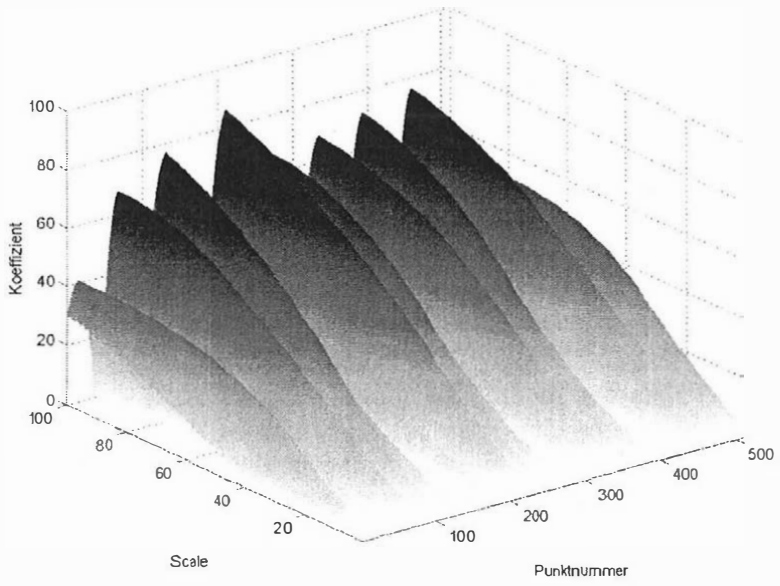


Abb. 3.22: Wavelet-Transformation des Vierecks in dreidimensionaler Darstellung

3.4 Interpretation der Transformationsergebnisse

Ziel der beiden vorher besprochenen Transformationen ist, die Interpretation der Ergebnisse ausgehend von der Segmentierung nach Farben zu erleichtern. Es soll eine Aussage über die Formveränderung (Deformation) der Objekte bzw. derer Teile gemacht werden können. Ob die Transformation die beste Ausgangsbasis ist, Aussagen über eingetretene Formveränderungen zu erhalten, werden die weiteren Untersuchungen in den nachfolgenden Kapiteln zeigen.

Damit ein hohes Maß an Flexibilität, Erweiterbarkeit und in späterer Folge auch an Selbstlernfähigkeit des Messmoduls gegeben ist, ist ein Ziel dieser Arbeit für die Interpretation jene Methoden zu finden, die dies in ausreichendem Maß gewährleisten können.

In dieser Arbeit wird versucht mit heuristischen Methoden eine effiziente und leicht erweiterbare Interpretation der Messergebnisse zu gewährleisten. Eine naheliegende Methodik ist die Formulierung von Regeln, wie sie auch bei wissensbasierenden Systemen verwendet wird. Auch bei der Entwicklung des gesamten theodolit- und wissensbasierenden Messsystems werden diese Methoden angewandt. Letztlich ist damit auch eine gute Integration des Interpretationsprozesses im Farbsegmentverfahren in die Architektur des Gesamtsystems gewährleistet.

Generell ist zu erwarten, dass durch die Interpretation der Transformationsergebnisse mit den entsprechenden Regeln, Rückschlüsse auf eingetretene Formveränderungen gemacht werden können. Diese Ergebnisse können nun als Output des Farbsegmentmessmoduls an das Gesamtsystem weitergegeben werden. Sie sollen als Entscheidungshilfe für konkrete Folgemessungen mit anderen Messmodi dienen.

Im Kap. 6 werden die Ergebnisse der Testmessungen und daraus ableitbare Interpretationen genauer beschrieben.

Da die CCD-Kameras in die Theodolite integriert sind, ist neben den qualitativen Interpretationen auch eine genaue, quantitative geometrische Interpretation der betrachteten Szene gegeben. Voraussetzung ist die Analyse der CCD-Bilder von zwei unterschiedlichen Standpunkten und ein Matchingvorgang in diesen Bildern, um die Gleichheit der betrachteten Szene zu gewährleisten.

4 Testmessungen bei Deformationen

Technische Objekte setzen sich häufig aus vielen Teilen einfacher geometrischer Formen zusammen. Es sollen daher auch hier vorerst sämtliche Testmessungen an abstrahierten Formen in einer einfachen Szene durchgeführt werden.

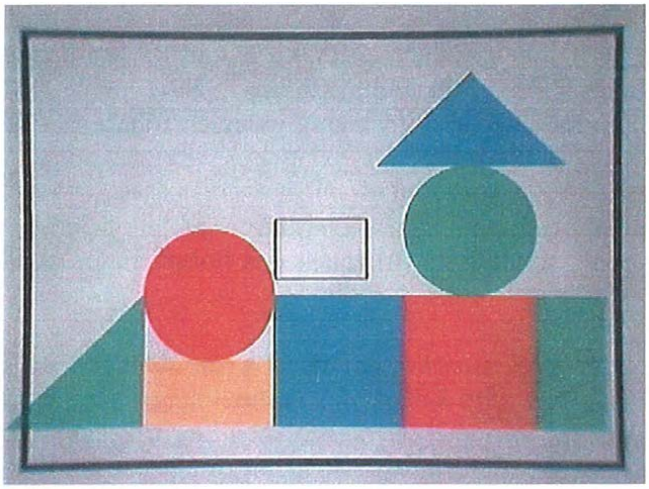


Abb. 4.1: Szene mit abstrahierten Objekten zwecks Deformationsuntersuchungen

In dieser Szene wurden Messungen an den roten Objekten durchgeführt. Die jeweilige Auswertung der Abstandfunktion wurde sowohl mit der Berechnung des Fourierspektrums als auch mit einer Wavelet-Transformation durchgeführt. Zuerst erfolgte eine Messung im nicht deformierten Zustand (Nullmessung), deren Ergebnisse für das kreisförmige und viereckige Objekt im Kap. 4.1 in den Abb. 4.2 bis 4.11 dargestellt sind. Die Werte in den dabei entstandenen Diagramme sind jenen in Kap. 3 sehr ähnlich. Diese Ergebnisse wurden bereits teilweise bei der Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte des Farbsegmentverfahrens diskutiert. Die Abweichungen gegenüber den Ergebnissen in Kap. 3 werfen Fragen auf, die anhand von Rauschuntersuchungen geklärt werden müssen (siehe Kap. 5).

Danach sind Messungen bei schrittweise zunehmenden Deformationen (die Deformation wird in Prozentanteilen des Objektdurchmessers bzw. der Objektkantenlänge angegeben) erfolgt, wobei beim kreisförmigen Objekt Abplattungen an der Unterseite und beim viereckigen Objekt Eindellungen an der Oberseite simuliert wurden. Ausgewählte Ergebnisse bei Deformationen am kreisförmigen Objekt sind im Kap. 4.2 in den Abb. 4.12 bis 4.31 dargestellt. Wichtige Ergebnisse der Messungen bei Deformationen am viereckigen Objekt sind im Kap. 4.3 in den Abb. 4.32 bis 4.41 dargestellt.

4.1 Messungen an nicht deformierten Objekten

Wie die unterschiedlichen Ergebnisse für Kreis und Viereck (Abb. 4.2 - 4.11) zeigen, kann durch einfache Vergleiche der Spektren bzw. Wavelet-Analysen möglicherweise ein Rückschluss auf die segmentierte Form erfolgen. Die vielen zusätzlichen empirischen Untersuchungen zeigten, dass klar unterscheidbare geometrische Grundformen wie Kreis, Dreieck, Viereck, usw. in der Formanalyse mittels Fouriertransformation oder Wavelet-Transformation stark voneinander unterscheidbare Ergebnisse liefern.

Allerdings zeigen die Rauscherscheinungen und die starken Abweichungen von der idealen Gestalt der Abstandfunktionen, dass eine Mustererkennung viele Schwierigkeiten aufwirft und für wenig unterscheidbare Formen daher kaum möglich ist.

Unsere Problemstellung liegt allerdings nicht primär in den Fragen der Mustererkennung, sondern im Erkennen von Formveränderungen an den segmentierten Objekten.

Vermutlich lässt sich nachweisen, dass Veränderungen an der Form der Objekte aufgetreten sind. Dies wird anhand der Testmessungen in den folgenden Kapiteln weiter ausgeführt. Aus der Vergleichs(Null)messung liegen Ergebnisse über die transformierte Abstandfunktion vor. Bei Wiederholungsmessungen müssen unter der Annahme, dass keine katastrophalen Änderungen am Objekt eingetreten sind, wieder ähnliche Ergebnisse vorliegen. Der Vergleich der Transformationsergebnisse soll eindeutige, brauchbare Ergebnisse über qualitative Formveränderungen liefern.

Für die weitere Annahme, dass mittels Regeln gute Interpretationen der Transformationsergebnisse möglich sind, müssen zuerst Erkenntnisse aus den Ergebnissen extrahiert werden.

Beispielsweise können mit der Fouriertransformation folgende Tatbestände geklärt werden:

- qualitative Angaben der Amplitudengrößen bei unterschiedlichen Formen.
- welche Amplitude ist jeweils am größten?
- welche Amplituden stechen bei welchen Formen aus dem Spektrum heraus?
- wie verändert sich das Spektrum wenn Deformationen einsetzen?

Für die Wavelet-Koeffizienten können ebenfalls ähnliche Erkenntnisse gewonnen werden.

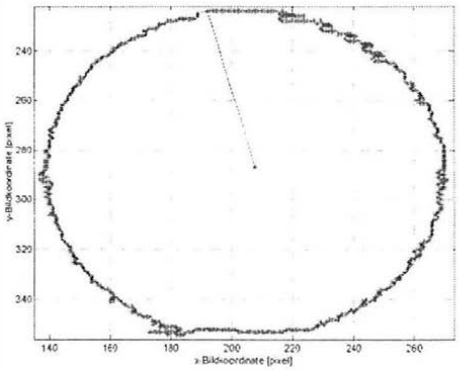


Abb. 4.2: Umrandungslinie des undeformierten Kreises

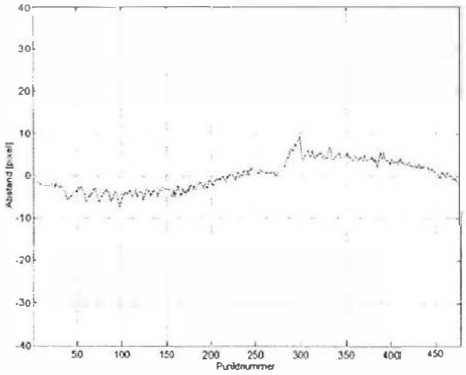


Abb. 4.3: Abstandfunktion des undeformierten Kreises

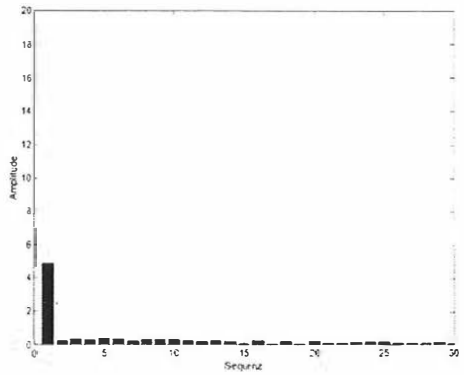


Abb. 4.4: Fourierspektrum des undeformierten Kreises

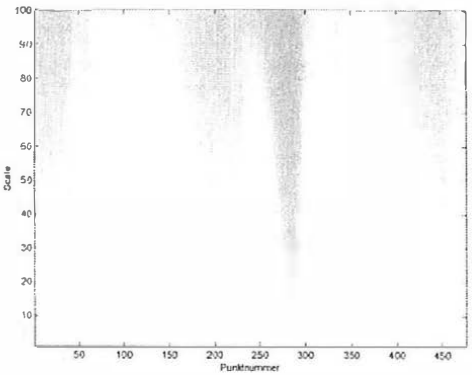


Abb. 4.5: Wavelet-Transformation in 2D des undeformierten Kreises

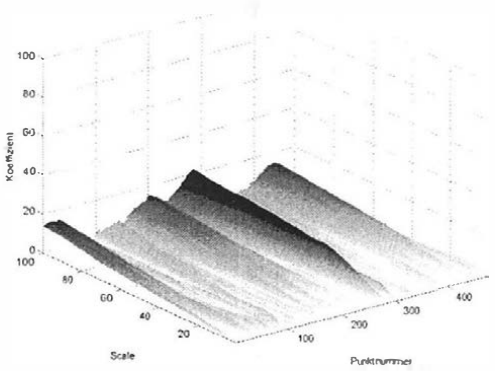


Abb. 4.6: Wavelet-Transformation in 3D des undeformierten Kreises

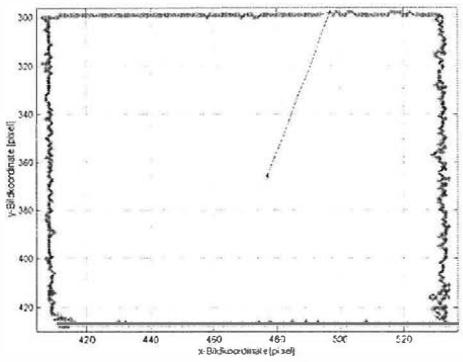


Abb. 4.7: Umrandungslinie des undeformierten Vierecks

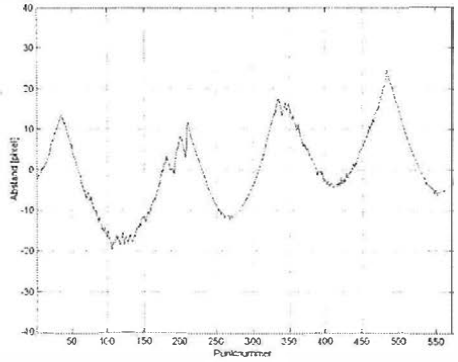


Abb. 4.8: Abstandfunktion des undeformierten Vierecks

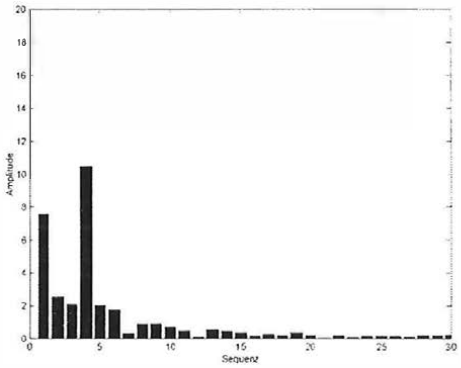


Abb. 4.9: Fourierspektrum des undeformierten Vierecks

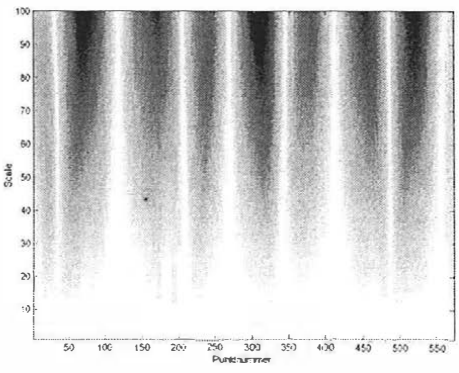


Abb. 4.10: Wavelet-Transformation in 2D des undeformierten Vierecks

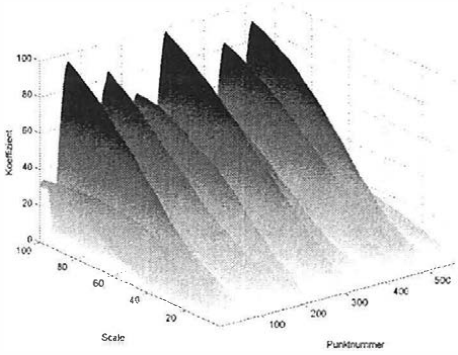


Abb. 4.11: Wavelet-Transformation in 3D des undeformierten Vierecks

4.2 Messungen am deformierten Kreis

Die zunehmende Abplattung an der Unterseite des kreisförmigen Objekts wurde in vielen Abstufungen aufgenommen, wobei hier exemplarisch vier verschiedene Deformationsstufen behandelt werden. Als Maß für die eingetretene Deformation wird das Verhältnis von Abplattungstiefe zu Objektdurchmesser berechnet. Diese Werte sind bei den Abbildungen angeführt und liegen zwischen 0.3% und 10%. Da Deformationen erfasst werden sollen, werden die zu berechnenden Abstandfunktionen immer auf den Schwerpunkt des nicht deformierten Objekts bezogen.

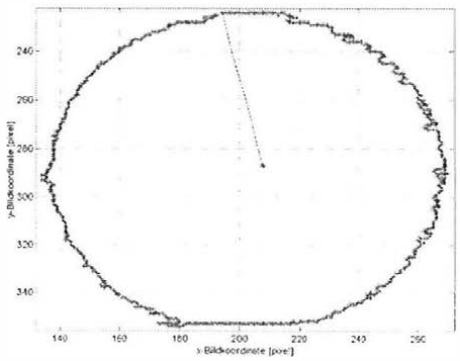


Abb. 4.12: Umrandungslinie des Kreises (0.3% Deformation)

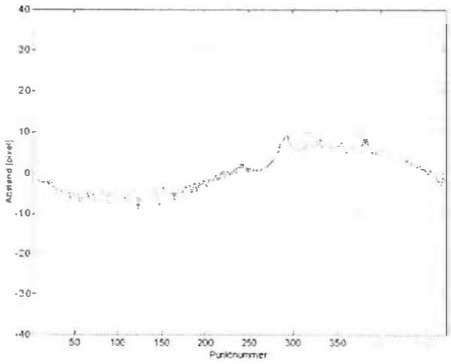


Abb. 4.13: Abstandfunktion des Kreises (0.3% Deformation)

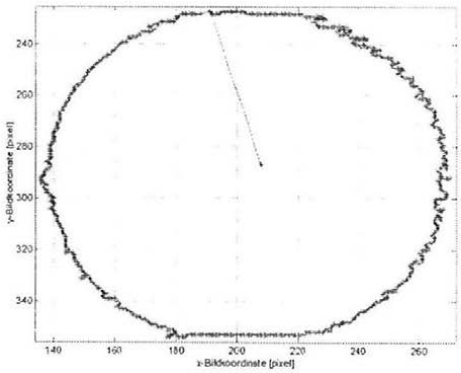


Abb. 4.14: Umrandungslinie des Kreises (1% Deformation)

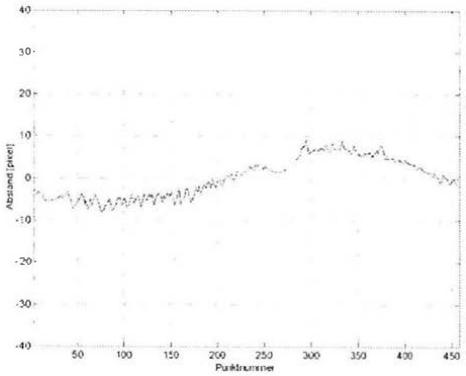


Abb. 4.15: Abstandfunktion des Kreises (1% Deformation)

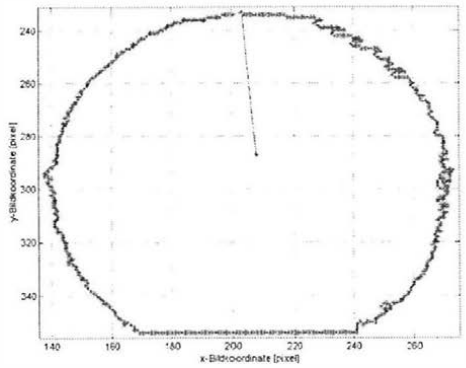


Abb. 4.16: Umrandungslinie des Kreises (5% Deformation)

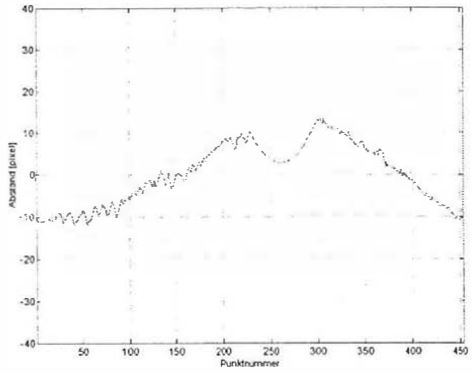


Abb. 4.17: Abstandfunktion des Kreises (5% Deformation)

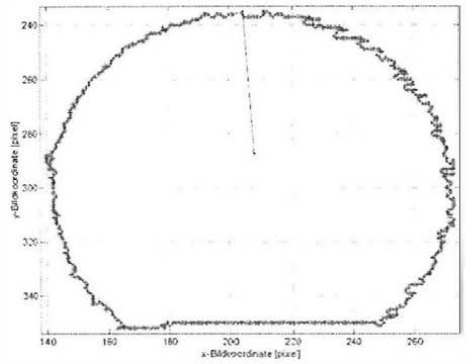


Abb. 4.18: Umrandungslinie des Kreises (10% Deformation)

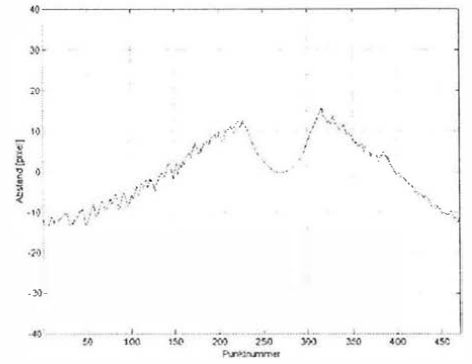


Abb. 4.19: Abstandfunktion des Kreises (10% Deformation)

Aus den einzelnen Umrandungslinien ist die Abplattungszunahme klar erkennbar. Allerdings entstehen auch leichte Unterschiede in der Lage der Randpixel im nicht deformierten Teil des Kreises. Diese Änderungen sind darauf zurückzuführen, dass einerseits bei der Segmentierung Schwankungen und anderseits bereits bei der Aufnahme Ungleichheiten entstehen. Es ist immer darauf zu achten, dass das Messsystem derart stabil eingerichtet ist, dass für die Wiederholungsmessungen Aufnahmestandpunkt, Visureinstellung und Kameraeinstellungen konstant bleiben.

In den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 4.20 - 4.31) sind wiederum die daraus resultierenden Fourierspektren und die Ergebnisse der Wavelet-Transformation in zwei- und dreidimensionaler Darstellung dargestellt. Dabei spiegelt sich die zunehmende Deformation in den einzelnen Diagrammen. Die zunehmende elliptische Verzerrung äußert sich in der Erhöhung der maximalen Abstandswerte und daraus folgernd in höheren Werten der 1.Amplitude des Fourierspektrums und höheren Koeffizienten bei der Wavelet-Transformation. Die zunehmende Abplattung äußert sich in der Zunahme der Einbuchtung und in der Erhöhung der Amplituden der niederen Sequenzen sowie in einer größeren Dynamik der Wavelet-Koeffizienten.

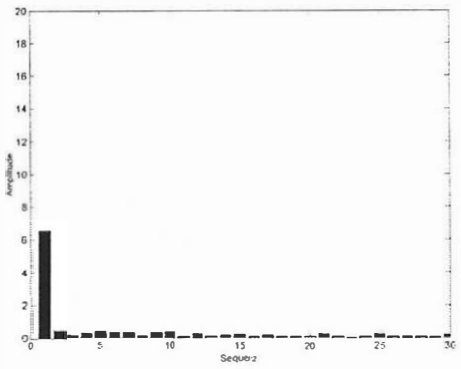


Abb. 4.20: Fourierspektrum des Kreises (0.3% Deformation)

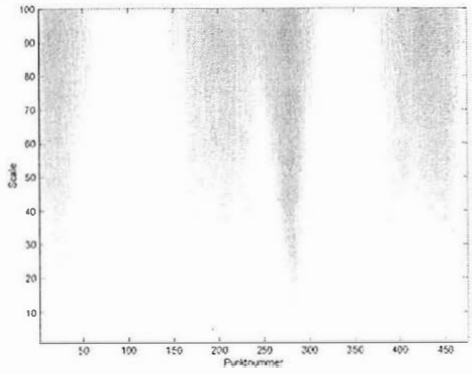


Abb. 4.21: Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (0.3% Deformation)

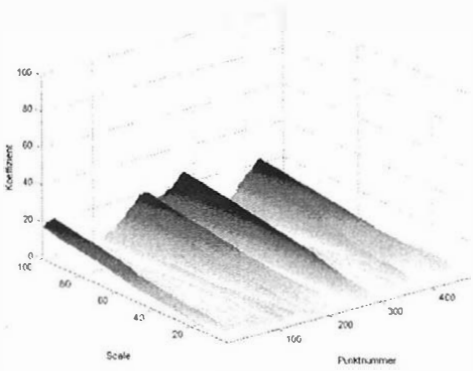


Abb. 4.22: Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (0.3% Deformation)

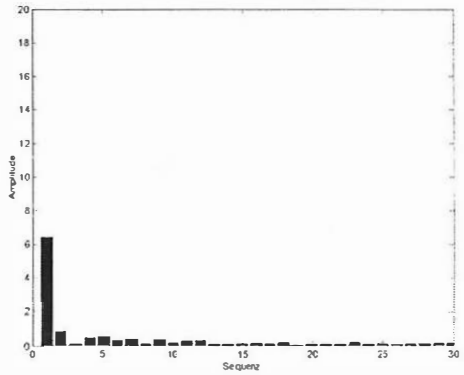


Abb. 4.23: Fourierspektrum des Kreises (1% Deformation)

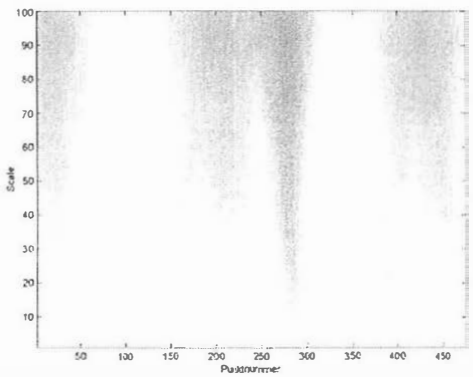


Abb. 4.24: Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (1% Deformation)

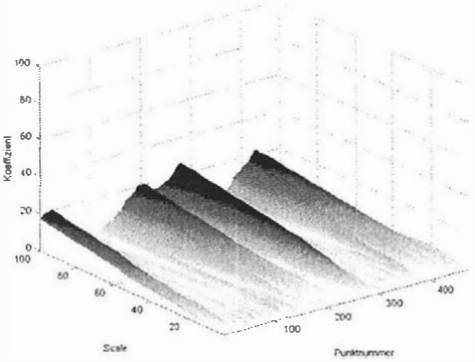


Abb. 4.25: Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (1% Deformation)

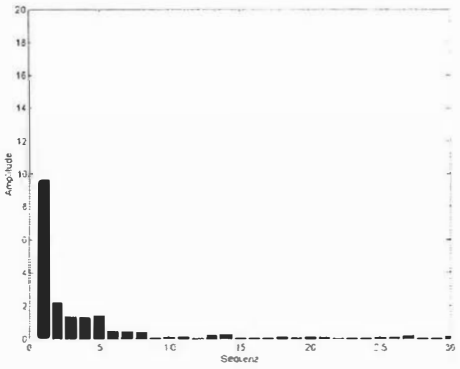


Abb. 4.26: Fourierspektrum des Kreises (5% Deformation)

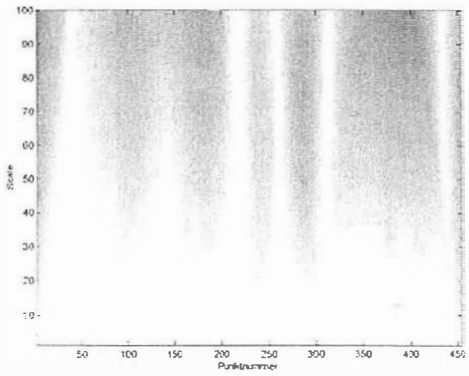


Abb. 4.27: Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (5% Deformation)

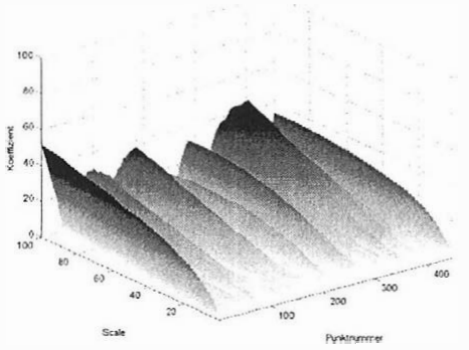


Abb. 4.28: Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (5% Deformation)

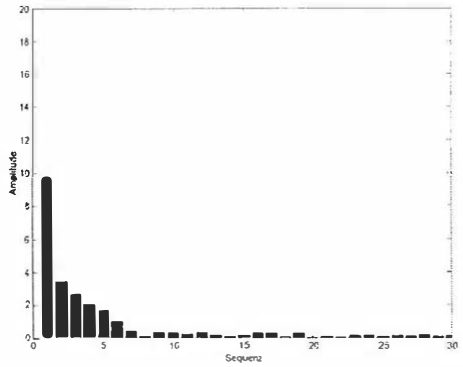


Abb. 4.29: Fourierspektrum des Kreises (10% Deformation)

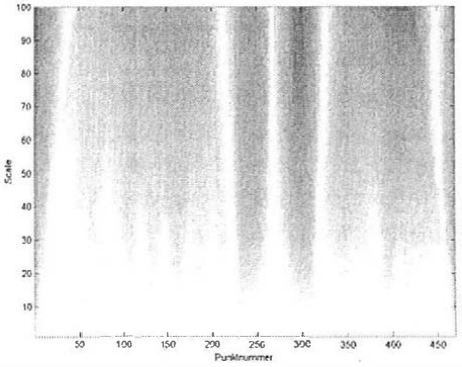


Abb. 4.30: Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (10% Deformation)

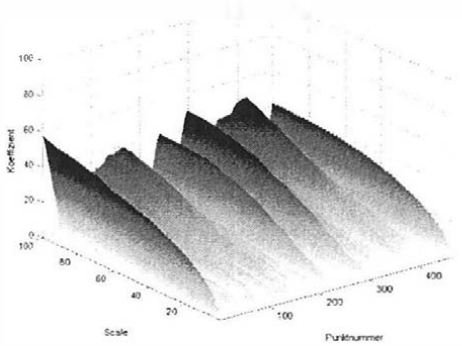


Abb. 4.31: Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (10% Deformation)

Aus den Ergebnissen können nun folgende Erkenntnisse für Kreise gewonnen werden:

<u>für die Fouriertransformation:</u>

- beim undeformierten Kreis sind alle Amplituden klein,
- beim undeformierten Kreis ist nur die 1.Amplitude deutlich größer (ca. Faktor 10),
- mit zunehmender Deformation steigen die niedrigen Sequenzen an, auch die 1.Amplitude steigt,
- mit zunehmender Deformation steigen die niedrigeren Sequenzen stärker (bis zu Faktor 20 bei 2.Amplitude);

<u>für die Wavelet-Transformation:</u>

- beim undeformierten Kreis sind die Koeffizienten generell klein,
- beim undeformierten Kreis tritt nur eine geringe Dynamik der Koeffizientenwerte entlang der Punktnummer (Ort) und der Skalierung auf,
- mit zunehmender Deformation steigt die Dynamik im gesamten Bereich,
- mit zunehmender Deformation steigen die Koeffizienten mindestens auf den zweifachen Wert.

4.3 Messungen am deformierten Viereck

Analog zu den Untersuchungen am kreisförmigen Objekt wurden auch beim Viereck verschieden starke Deformationen untersucht. Diesmal sind nur die niedrigen Deformationsstufen dargestellt, da aus zwei Gründen vor allem kleine und kleinste Formveränderungen interessant sind:

- in der Praxis sind ebenfalls kleine und kleinste Veränderungen am Objekt von Interesse. Diese sollen möglichst früh erkannt werden, worin eine starke Motivation für die Entwicklung dieses Messmoduls im Gesamtsystem begründet liegt.
- stärkere Deformationen erzeugen, wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, sehr deutliche Veränderungen in den Spektren und sind somit bei der Auswertung sowieso unproblematischer als geringe Deformationserscheinungen.

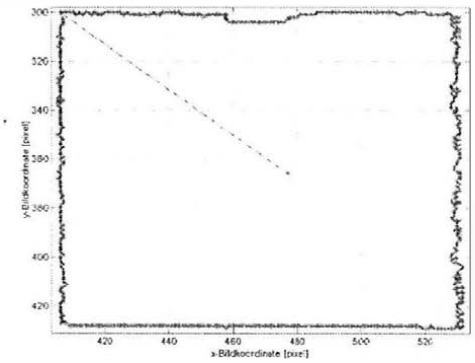


Abb. 4.32: Umrandungslinie des Vierecks (0.3% Deformation)

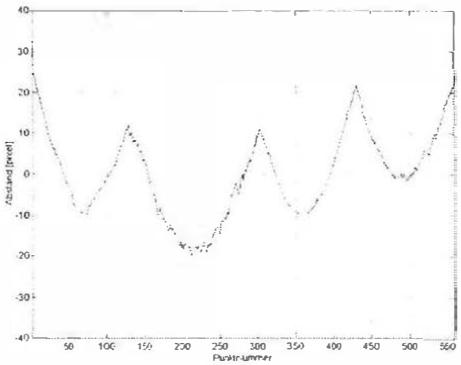


Abb. 4.33: Abstandfunktion des Vierecks (0.3% Deformation)

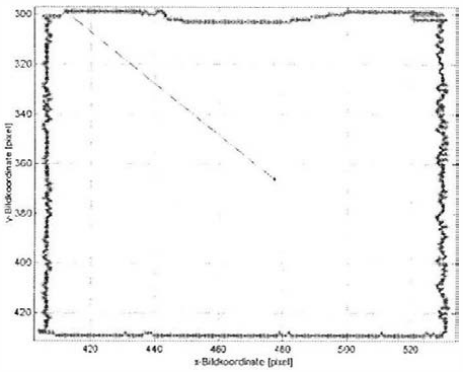


Abb. 4.34: Umrandungslinie des Vierecks (1% Deformation)

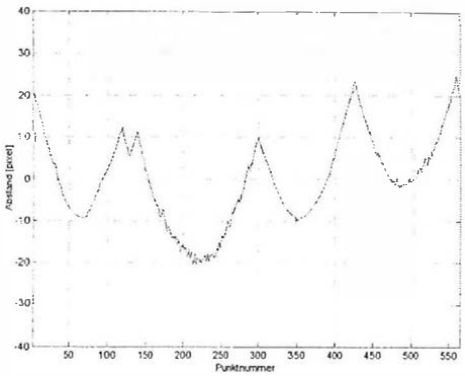


Abb. 4.35: Abstandfunktion des Vierecks (1% Deformation)

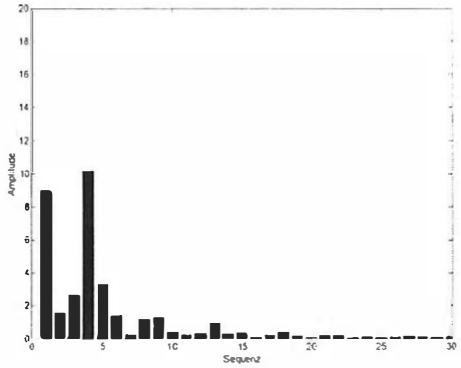


Abb. 4.36: Fourierspektrum des Vierecks (0.3% Deformation)

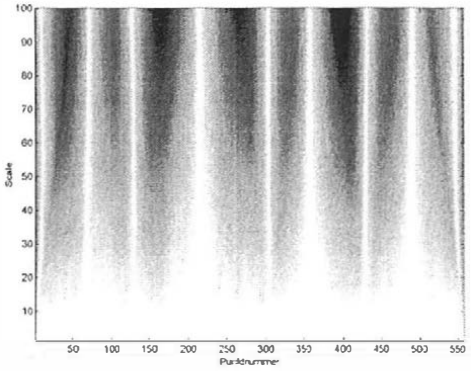


Abb. 4.37: Wavelet-Transformation in 2D des Vierecks (0.3% Deformation)

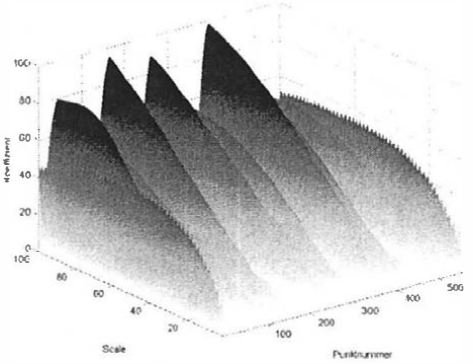


Abb. 4.38: Wavelet-Transformation in 3D des Vierecks (0.3% Deformation)

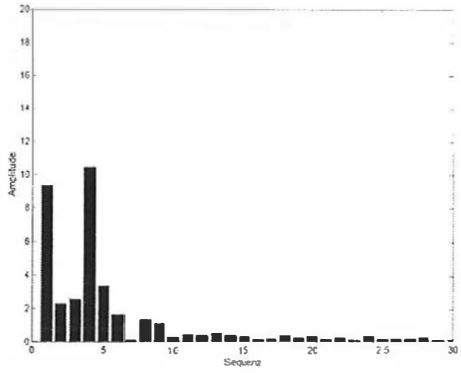


Abb. 4.39: Fourierspektrum des Vierecks (1% Deformation)

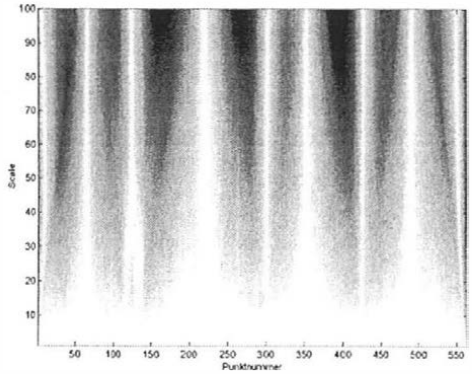


Abb. 4.40: Wavelet-Transformation in 2D des Vierecks (1% Deformation)

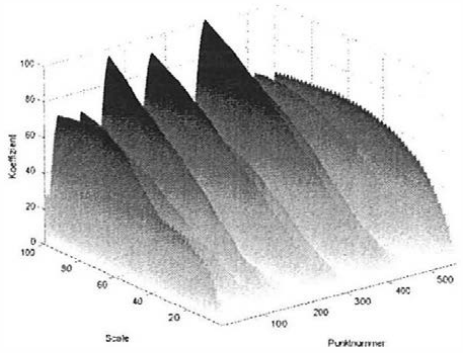


Abb. 4.41: Wavelet-Transformation in 3D des Vierecks (1% Deformation)

Kleine Deformation (Eindellung) zeigen nur geringe Veränderungen in der Abstandfunktion und den entsprechenden Transformationen. Es stellt sich die Frage, ob diese kleinen Unterschiede durch eine Berechnung von Differenzspektren (siehe im nächsten Kap. 4.4) bestimmt werden können und sich diese signifikant von Rauscherscheinungen (Kap. 5.2) abheben.

Trotzdem können nun folgende Erkenntnisse für Vierecke gewonnen werden:

<u>für die Fouriertransformation:</u>

- ➢ beim undeformierten Viereck ist die 4.Amplitude am größten,
- beim undeformierten Viereck ist auch die 1.Amplitude deutlich größer,
- mit zunehmender Deformation sind keine ausgeprägten Änderungen der Amplitudenwerte feststellbar;

<u>für die Wavelet-Transformation:</u>

- beim undeformierten Viereck sind hohe Koeffizienten bei hohen Skalierungswerten,
- beim undeformierten Viereck tritt generell eine große Dynamik der Koeffizientenwerte entlang der Punktnummer (Ort) auf,
- mit zunehmender Deformation sind leider keine ausgeprägten Änderungen hinsichtlich der Koeffizientenhöhe und der Dynamik bei kleinen Deformationserscheinungen ableitbar.

4.4 Berechnung der Differenzspektren

Anhand der vorliegenden Ergebnisse der Fourierspektren und der Wavelet-Transformationen aus Kap. 4.2 und 4.3 können Unterschiede bei verschieden starken Deformationen festgestellt werden. Die geringen Unterschiede bei kleinen Deformationen am Viereck zwingen zu weiteren Untersuchungen. So ist zu untersuchen, ob durch die Berechnung der jeweiligen Differenzen zu der Nullmessung (nicht deformiertes Objekt) eine Verdeutlichung der Unterschiede zwischen dem Ergebnis für die nicht deformierten Objekte und den Ergebnissen nach eingetretener Deformation erreicht wird. Die Differenzspektren werden berechnet laut

DiffFourier = Fourier (deformiert) - Fourier (undeformiert) und

DiffWavelet = Wavelet (deformiert) - Wavelet (undeformiert),

und sind in den Abb. 4.42 bis 4.53 für das kreisförmige Objekt und in den Abb. 4.54 bis 4.59 für das Viereck dargestellt.

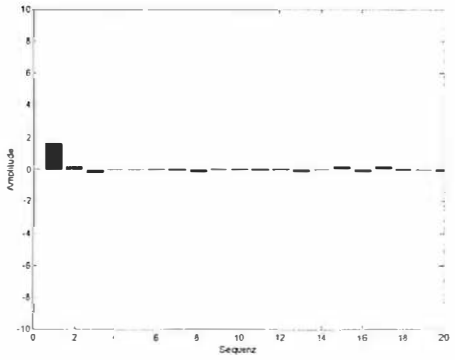


Abb. 4.42: Differenz-Fourierspektrum des Kreises (0.3% Deformation)

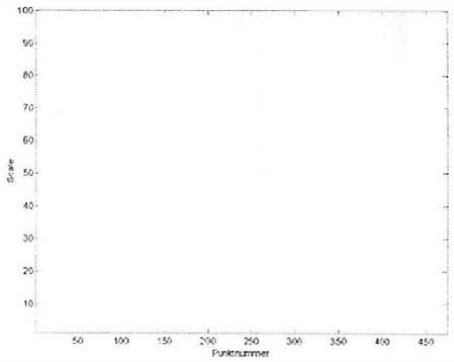


Abb. 4.43: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (0.3% Deformation)

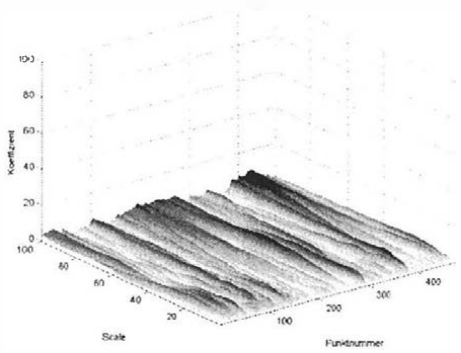


Abb. 4.44: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (0.3% Deformation)

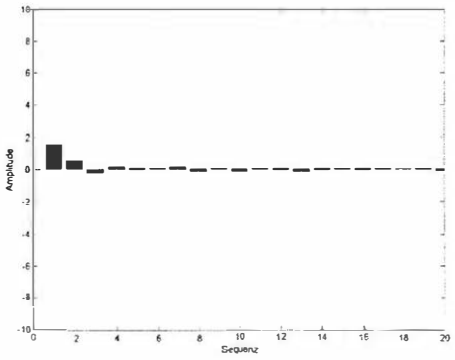


Abb. 4.45: Differenz-Fourierspektrum des Kreises (1% Deformation)

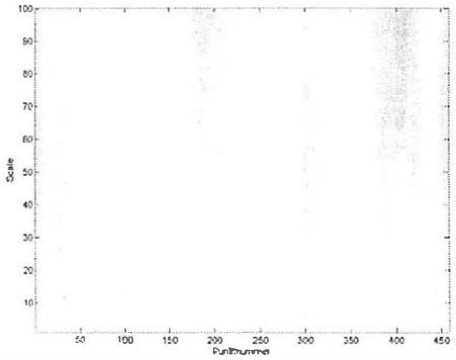


Abb. 4.46: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (1% Deformation)

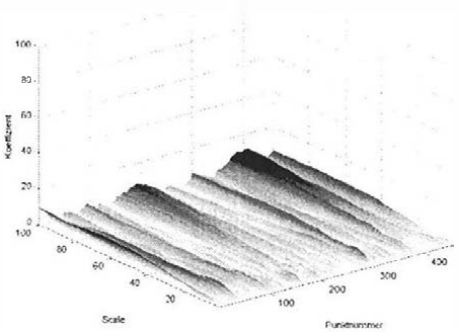


Abb. 4.47: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (1% Deformation)

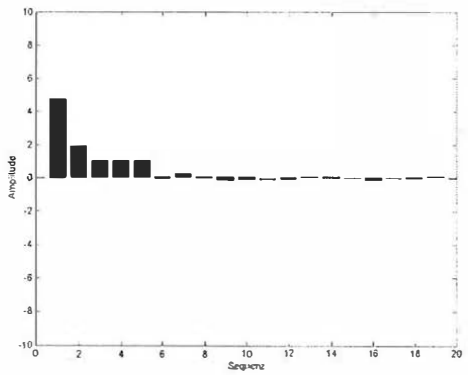


Abb. 4.48: Differenz-Fourierspektrum des Kreises (5% Deformation)

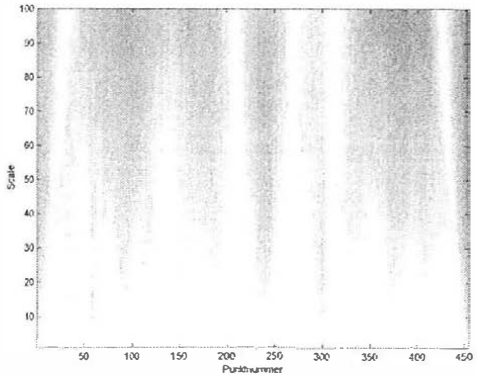


Abb. 4.49: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (5% Deformation)

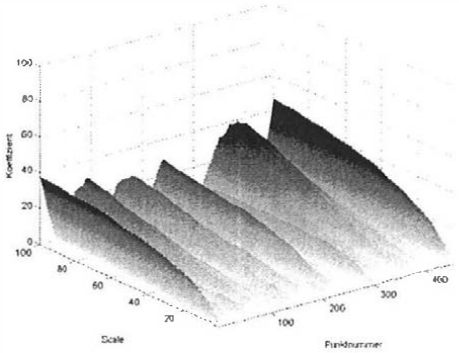


Abb. 4.50: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (5% Deformation)

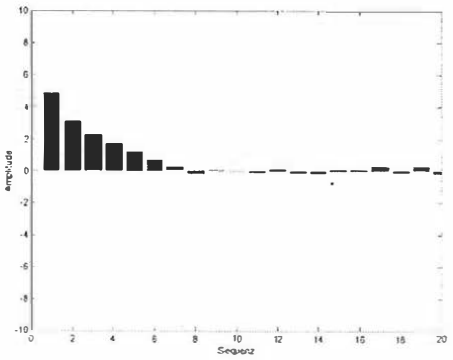


Abb. 4.51: Differenz-Fourierspektrum des Kreises (10% Deformation)

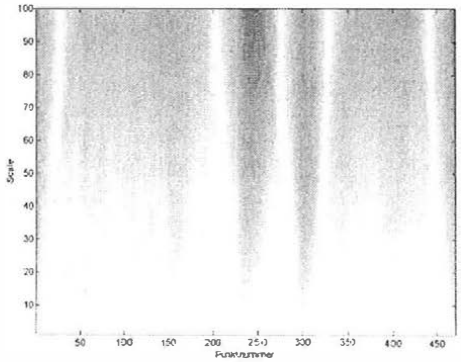


Abb. 4.52: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (10% Deformation)

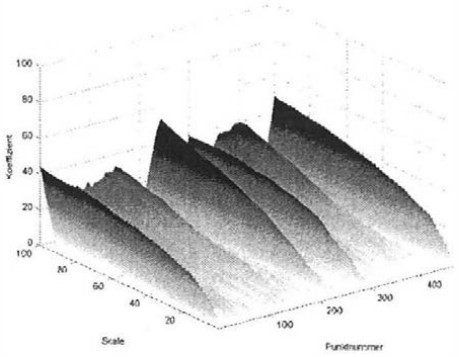


Abb. 4.53: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Kreises (10% Deformation)

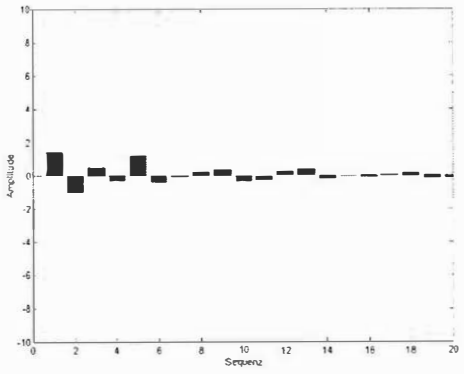


Abb. 4.54: Differenz-Fourierspektrum des Vierecks (0.3% Deformation)

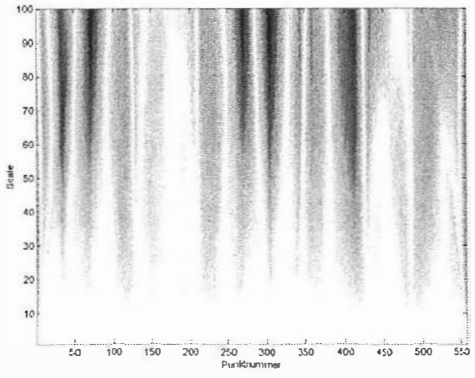


Abb. 4.55: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Vierecks (0.3% Deformation)

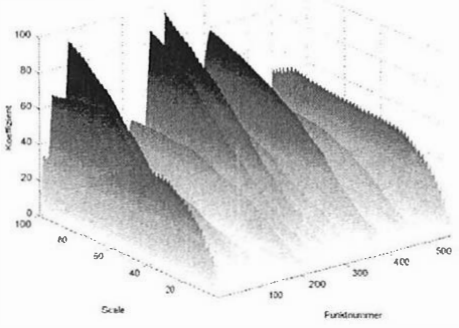


Abb. 4.56: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Vierecks (0.3% Deformation)

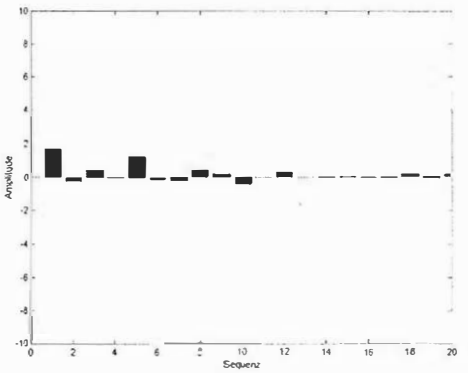


Abb. 4.57: Differenz-Fourierspektrum des Vierecks (1% Deformation)

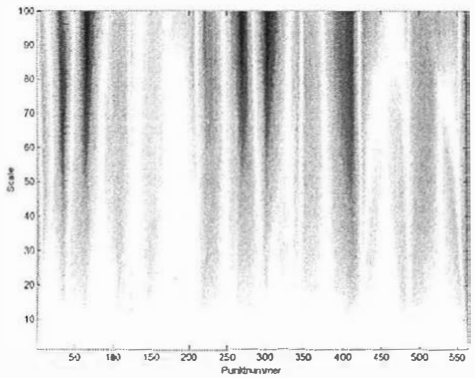


Abb. 4.58: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Vierecks (1% Deformation)

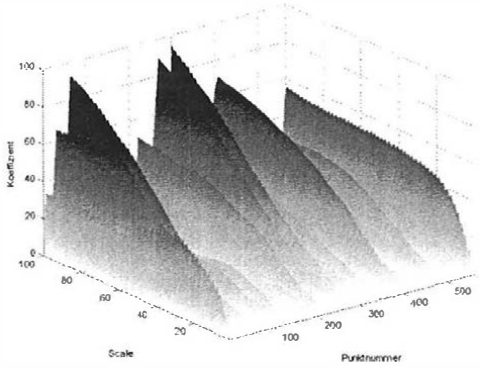


Abb. 4.59: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Vierecks (1% Deformation)

Sehr deutlich ist eine Veränderung der Differenzergebnisse bei zunehmender Formveränderung (stärkerer Deformation) zu bemerken. Speziell beim Viereck sind nun die Unterschiede bei unterschiedlich starken Deformationen deutlich erkennbar. Auffallend sind die hohen Werte der Wavelet-Koeffizienten beim Viereck.

Aus den Ergebnissen der Differenzspektren können aufgegliedert nach Art des Objekts und der Transformation folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

<u>für die Fouriertransformation des Kreises:</u>

- bei zunehmenden Deformationen nehmen auch die Amplitudenwerte zu,
- die niedrigen Sequenzen haben höheren Zuwachs,
- die 1.Amplitude hat den stärksten Zuwachs, alle weiteren Amplituden weisen einen deutlich geringeren Zuwachs auf;

<u>für die Wavelet-Transformation des Kreises:</u>

- mit zunehmender Deformation steigen die Koeffizienten bei höheren Skalierungswerten,
- bei größeren Deformationen entsteht eine deutliche Zunahme der Dynamik entlang der Punktnummer (Ort),
- bei geringen Deformationen tritt eine geringe und gleichmäßige Welligkeit (Dynamik) der Koeffizienten entlang der Punktnummer (Ort) auf;

<u>für die Fouriertransformation des Vierecks:</u>

- bei zunehmenden Deformationen nehmen einzelne Amplitudenwerte stärker zu,
- eine Formveränderung ist erkennbar, jedoch ist kaum eine Aussage über die Stärke der Deformation bei geringen Deformationserscheinungen möglich;

für die Wavelet-Transformation des Vierecks:

- mit zunehmender Deformation tritt über den gesamten Bereich entlang der Punktnummer (Ort) eine starke Zunahme der Koeffizienten bei hohen Skalierungswerten auf,
- generell besteht eine große Dynamik entlang der Punktnummer (Ort).

Die experimentellen Ergebnisse der Testmessungen lassen erwarten, dass mit dem Farbsegmentverfahren unter den gegebenen Hardware-Voraussetzungen Formveränderungen bis zu 0.3% Deformation des Objekts erkannt werden können. Diese untere Schranke der Empfindlichkeit zur Aufdeckung von Deformationen muss anhand von Rauschuntersuchungen bestätigt werden (siehe Kap. 5.2).

5 Untersuchung des Rauschverhaltens

Für die Rauschanalyse des Farbsegmentverfahrens sind zwei Fälle unterscheidbar:

1. wie verhalten sich die Transformationsergebnisse von gemessenen Objekten gegenüber idealen Formen,
2. welche Grenzen der Deformationsbeobachtungen sind gegeben und sind die bisherigen Ergebnisse signifikant.

5.1 Transformationsergebnisse idealer Objektformen

Im Kap. 3.2 wurde bereits angedeutet, dass die Ergebnisse der Segmentierung und die daraus erhaltenen Umrandungslinien eine Abweichung gegenüber jenen, die idealen Formen entsprechen, aufweisen. In den Abb. 5.1 und 5.2 sind berechnete ideale Umrandungslinien dargestellt. Die daraus gewonnenen Abstandfunktionen und die Transformationsergebnisse bekommen daher ebenfalls ein entsprechend verändertes Aussehen (Abb. 5.3 - 5.10).

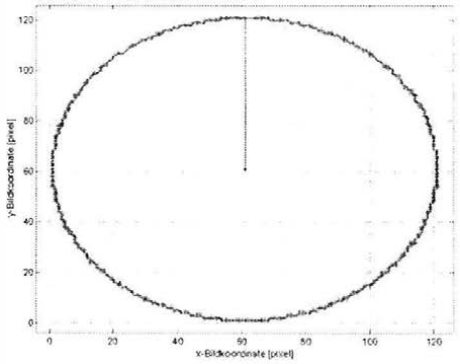


Abb. 5.1: Umrandungslinie eines idealen Kreises

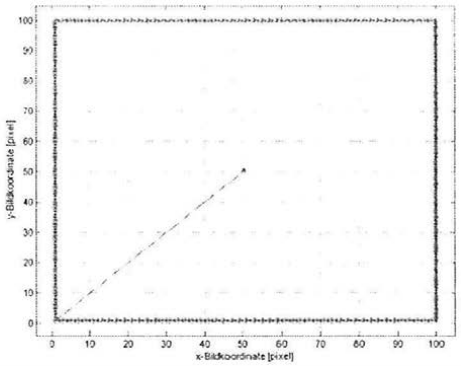


Abb. 5.2: Umrandungslinie eines idealen Vierecks

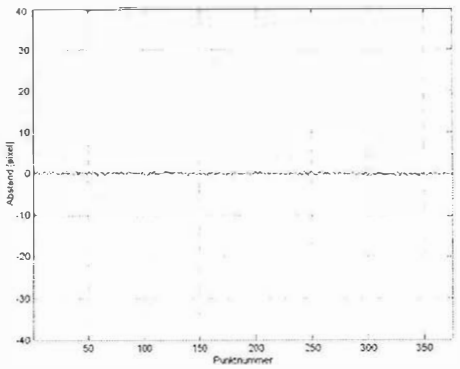


Abb. 5.3: Abstandfunktion eines idealen Kreises

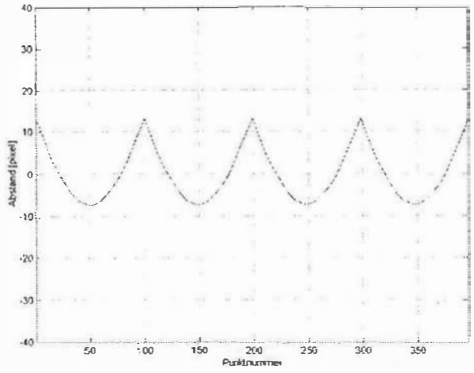


Abb. 5.4: Abstandfunktion eines idealen Vierecks

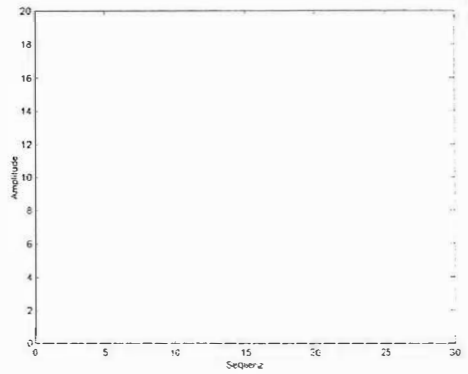


Abb. 5.5: Fourierspektrum eines idealen Kreises

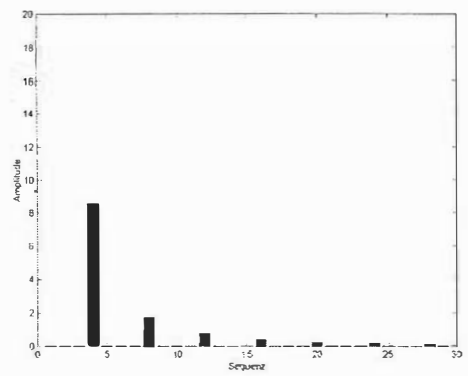


Abb. 5.6: Fourierspektrum eines idealen Vierecks

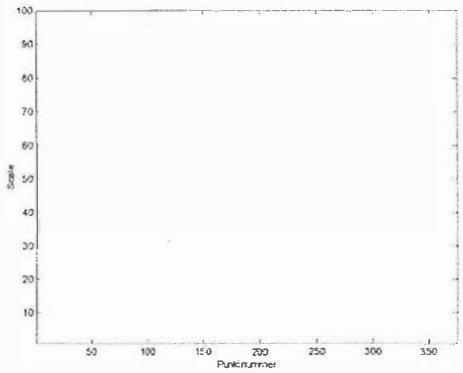


Abb. 5.7: Wavelet-Transformation in 2D eines idealen Kreises

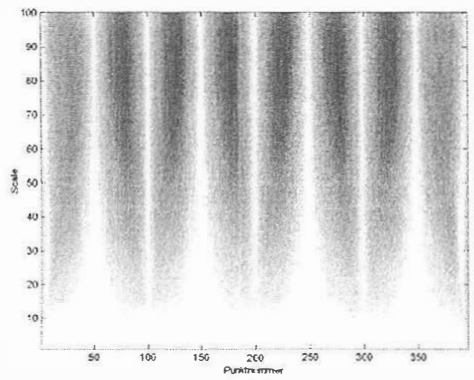


Abb. 5.8: Wavelet-Transformation in 2D eines idealen Vierecks

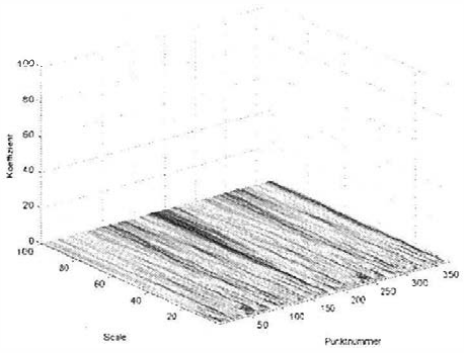


Abb. 5.9: Wavelet-Transformation in 3D eines idealen Kreises

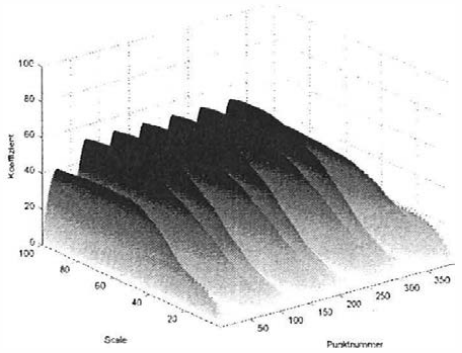


Abb. 5.10: Wavelet-Transformation in 3D eines idealen Vierecks

Diese berechneten Umrandungslinien haben einen glatten Verlauf. Minimale Abweichungen sind aufgrund der Diskretisierung mathematisch bedingt. Dies hat zur Folge, dass beim Kreis nicht sämtliche Amplituden der Fouriertransformation sowie die Koeffizienten der Wavelet-Transformation exakt Null sind.

Bei der Aufnahme von realen Objekten (siehe Kap. 4.1), anschließender Segmentierung und Bestimmung der Umrandungslinie entstehen Abweichungen von dieser glatten idealen Gestalt. Diese Abweichungen entstehen auch dann, wenn die Objekte in ihren Formen und Abmessungen den idealen Referenzformen entsprechen, weil die Aufnahme mit der CCD-Kamera nie optimale Bedingungen erfüllen kann, da:

- der CCD-Sensor durch die beschränkte Anzahl an Pixel nur eine Annäherung an die tatsächliche Form liefert,
- der CCD-Sensor ein elektronisches Rauschverhalten besitzt und damit Ungenauigkeiten einbringt,
- der Segmentierungsvorgang auf eine endliche Farbauflösung (8bit) angewiesen ist,
- durch die Aufnahmeposition Verzerrungen enstehen.

Aus diesen realen Bedingungen ist ersichtlich, dass eine Formerkennung mit diesem Verfahren nur in eingeschränktem Maße möglich ist. Einige Verbesserungen wären allerdings mit optimaler Hardware erzielbar. Dazu zählt vor allem ein hochauflösender CCD-Sensor und die vollständige Integration des Sensors in den Theodoliten.

Gesucht ist aber die Erkennung von Formänderungen, weshalb weitere Untersuchungen zur Signifikanz der Messergebnisse notwendig sind (siehe Kap 5.2).

5.2 Rauscherscheinungen bei Wiederholungsmessungen

Um ein Maß der Signifikanz für die Ergebnisse der Testmessungen zu erhalten werden Wiederholungsmessungen durchgeführt. Für die betrachtete Szene wurden für Kreis und Viereck jeweils zehn Messungen am undeformierten Objekt gemacht. Eine Messung dient als Referenzmessung. Die weiteren Messungen dienen als Vergleichsmessung und analog zu den Berechnungen in Kap. 4.4 werden die Differenzspektren berechnet:

DiffFourier = Fourier (weitere Messung) - Fourier (Referenzmessung), und
DiffWavelet = Wavelet (weitere Messung) - Wavelet (Referenzmessung).

Die Ergebnisse der Differenzspektren aus Kap. 4.4 sollten sich signifikant vom Grundrauschen abheben. Die bei dieser Untersuchung erhaltenen Differenzspektren zeigen das Grundrauschens des Verfahrens und bilden die Grenze der Empfindlichkeit des Farbsegmentverfahrens.

Nachfolgend sind die Ergebnisse für eine Wiederholungsmessung dargestellt. Die Ergebnisse der weiteren Wiederholungsmessungen sind im Anhang zu finden.

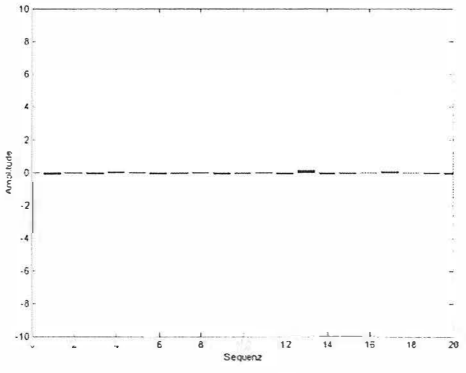


Abb. 5.11: Differenz-Fourierspektrum des Kreises (erste Vergleichsmessung)

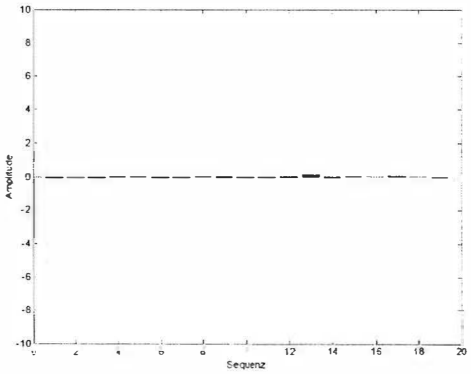


Abb. 5.12: Differenz-Fourierspektrum des Vierecks (erste Vergleichsmessung)

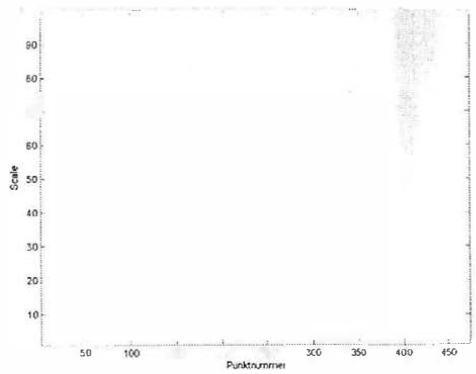


Abb. 5.13: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Kreises (erste Vergleichsmessung)

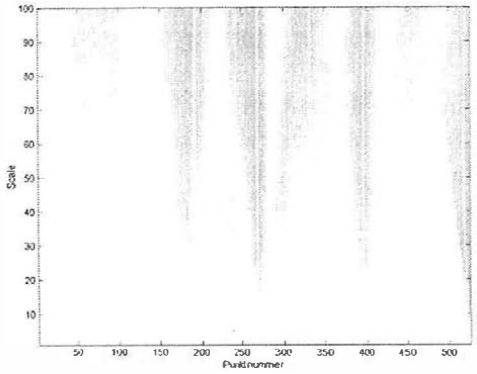


Abb. 5.14: Differenz-Wavelet-Transformation in 2D des Vierecks (erste Vergleichsmessung)

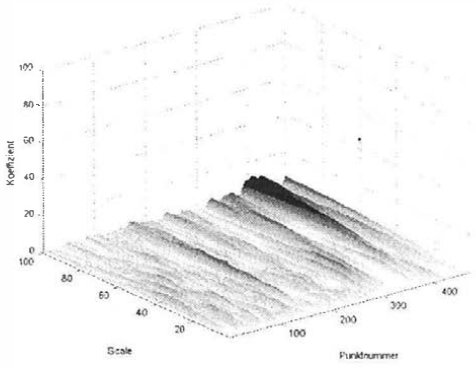


Abb. 5.15: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Vierecks (erste Vergleichsmessung)

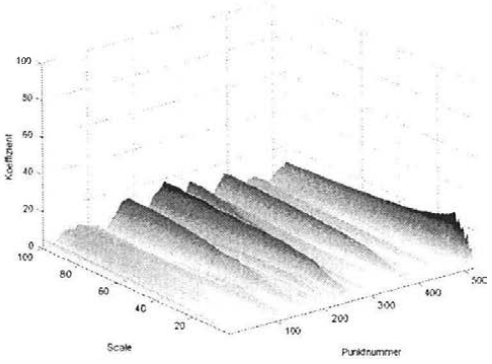


Abb. 5.16: Differenz-Wavelet-Transformation in 3D des Vierecks (erste Vergleichsmessung)

Die Bildsignalaufnahme unterliegt einem elektronischem Rauschen, somit stimmen die aufgenommenen Bilder nie genau überein. Dadurch werden die segmentierten Flächen und deren Umrandungslinien immer leicht verändert bestimmt. Damit ergeben sich entsprechend leicht abweichende Abstandfunktionen, die wiederum zu veränderten Fourierspektren und Wavlet-Transformationen führen. Dies bedeutet, dass die Differenzspektren aus zwei Messungen von Null verschiedene Amplituden- und Koeffizientenwerte zeigen.

Bei den Fourierspektren treten die erwarteten geringen Differenzamplituden auf. Auch die Differenz-Wavelet-Transformation für den Kreis zeigt entsprechend niedrige Koeffizientenwerte. Die Differenz-Wavelet-Koeffizenten beim Viereck können deutlich höher sein. Schon bei leichten Deformationserscheinungen waren beim Viereck große Koeffizienten aufgetreten (siehe Kap. 4.4). Das Verfahren der Kontinuierlichen Wavelet-Transformation zeigt hier seine große Empfindlichkeit.

Trotzdem sind die Koeffizientenwerte über den gesamten Bereich signifikant kleiner als bei den Ergebnissen der deformierten Objekte.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Schranke der Empfindlichkeit des Farbsegmentverfahrens unter 0.3% Objektdeformation liegt. Daher können sämtliche Messergebnisse (Kap. 4) als signifikant eingestuft werden. Eine klare Empfindlichkeit des Verfahrens für die Detektion von Deformationserscheinungen von 0.3% der Segmentgröße ist gegeben.

Da auch die Untersuchung der Rauscherscheinungen die Signifikanz der erhaltenen Ergebnisse der Transformationsberechnungen bestätigen, können nun anwendbare Methoden zur automatischen Interpretation dieser Ergebnisse untersucht werden (siehe Kap. 6).

6 Interpretation der Messergebnisse mittels Regeln

Aus den Gründen, die schon in Kap. 3.4 erläutert wurden, wird ein heuristischer Ansatz zur Auswertung der Messergebnisse gewählt. Es wäre denkbar, bereits die Umrandungslinie oder die Abstandfunktion für die Bildung von Regeln heranzuziehen. Die Testmessungen legen aber nahe, dass die Berechnung der Transformation als Zwischenschritt für die Definition von Regeln besser geeignet ist. Vorerst ist noch keine Entscheidung zugunsten einer Transformationsmethode getroffen. Die Ergebnisse der Fouriertransformation und der Wavelet-Transformation können als Datensatz für die Formulierung von Regeln verwendet werden.

Aus folgenden Gründen ist der zusätzliche Aufwand der Berechnung der Transformationen gewährleistet, da:

- der Startpunkt für die Berechnung der Abstandfunktion grundsätzlich nicht an der gleichen Stelle des Objekts liegt, ist ein direkter Vergleich der Abstandfunktionen sehr problematisch, wogegen die Fouriertransformation davon unabhängig ist,
- generell ein globales und lokales Kurvenverhalten auf Amplituden- und Koeffizientenwerte reduziert wird, und speziell bei der Fouriertransformation kann sich die Interpretation auf wenige Amplitudenwerte beschränken.

Die erhaltenen Regeln dienen wiederum der Interpretation weiterer Messergebnisse. Mit der Formulierung dieser interpretierenden Regeln ist die letzte und entscheidende Stufe des Farbsegmentverfahrens erreicht.

An das Regelsystem sind folgende Anforderungen geknüpft:

- anhand des Interpretationsergebnisses muss eine klare Feststellung über den Zustand des segmentierten Objekts vorliegen (Eindeutigkeit),
- aufgrund weiterer Messungen muss es die Möglichkeit zur einfachen Erweiterbarkeit und Verbesserung des Regelsystems geben (Anpassungsfähigkeit),
- die Regeln sollen so gestaltet sein, dass mit wenigen das Auslangen gefunden wird (Einfachheit),
- die Regeln so zu gestalten, dass für den Systembenutzer klar ist wie das System zu den Ergebnissen gekommen ist (Transparenz).

Das Ergebnis der Interpretation wird als Output des Moduls „Farbsegmentverfahren" dem Gesamtsystem zur Verfügung gestellt. Die wissensbasierende Komponente hat diese Information weiterzuverarbeiten und daraus entsprechende Konsequenzen zu ziehen.

Folgende Konsequenzen wären dabei denkbar:

- geringe Veränderungen sind beobachtet worden ⇒ es ist sinnvoll die beobachtete Objektregion mit anderen Messmodi (Operatoren) detailliert zu untersuchen,
- deutlich feststellbare Veränderungen ⇒ Warnung und detaillierte Untersuchung der betroffenen Region des Objekts mit weiteren Messmodi,
- drastische Formveränderung, d.h. Gefahr in Verzug ⇒ Alarmierung und Einleitung von detaillierten Messungen im unmittelbar betroffenen Objektbereich aber auch umfangreiche Messungen am gesamten zu untersuchendem Objekt.

Bei der Bildung von Regeln zur Detektion von Formveränderungen sind die Messergebnisse der Differenzspektren auch mit jenen Ergebnissen aus reinen Wiederholungsmessungen ohne Deformationseinwirkungen zu vergleichen. Eine statistische Schwankung der Spektren aufgrund des bildgebenden Verfahrens tritt ein und dieses Rauschverhalten des Verfahrens gibt die untere Schranke der Empfindlichkeit des Farbsegmentverfahrens an. Tests zum Rauschverhalten (Kap. 5.2) haben gezeigt, dass eine klare Empfindlichkeit des Verfahrens für die Detektion von Deformationserscheinungen von 0.3% der Segmentgröße gegeben ist.

Die Regeln sind nach unterschiedlichen Kategorien der Beobachtung zu gliedern:

a) Regeln, die bei unterschiedlich starken Deformationserscheinungen abgeleitet werden können.
b) Regeln, die aus unterschiedlichen Formen abgeleitet werden können.
c) Regeln, die aus den unterschiedlichsten Formveränderungen, die durch die Deformationserscheinungen ausgelöst werden, abgeleitet werden können.
d) Regeln, die für die zwei unterschiedlichen Analysen gelten (Fouriertransformation und Wavelet-Transformation). Hier ist dann weiters zu klären, ob sich eine Analysemethode besser bewährt oder ob die parallele Nutzung beider Methoden sinnvoll ist.
e) Regeln, die aus dem Berechnungsergebnis der Differenzspektren abgeleitet werden können. Hier ist ebenfalls zu klären, ob für gute Interpretationsergebnisse die Berechnung von Differenzspektren unerlässlich ist und welche praktische Verwendbarkeit diese erlangen.

Diese Arbeit kann keine allumfassende Behandlung unterschiedlichster Formen und Formveränderungen beinhalten. Sie soll lediglich die Idee und eine auszugsweise Umsetzung des Verfahrens liefern. Daher können auch nur exemplarisch entsprechende Regeln formuliert werden. Weitere umfangreiche Untersuchungen können klären, welche Regeln hinzugefügt werden müssen, damit das Verfahren einwandfrei in den unterschiedlichsten Situationen arbeitet.

Der erste Schritt zur Formulierung von Regeln, vorerst nur in sprachlicher Form, ist die Auflistung und Formulierung von Beobachtungen, die bei den Spektren bei unterschiedlich starken Deformationserscheinungen und unterschiedlichen Formen der Objekte gemacht werden. Danach können diese Beobachtungen in Regeln für eine Auswertung dieser Ergebnisse umformuliert werden. Diese müssen wiederum soweit formalisiert werden, damit eine Softwareapplikation geschrieben werden kann.

Die vorangegangenen Kap. 4.3 und 4.4 beinhalten eine Reihe von formulierten Beobachtungen bei Fourierspektren und Wavelet-Transformatioen für absolute und differenzielle Bestimmungen bei undeformierten und deformierten, kreisförmigen und viereckigen Objekten.

Aus den Beobachtungsergebnissen können nun einfache Regeln formuliert werden. Diese Regeln dienen der Interpretation von berechneten Spektren und bilden somit das Ergebnis des Farbsegmentverfahrens.

Bei Anwendung der Regeln ist zu berücksichtigen, dass klare Kategorien des vorliegenden Zwischenergebnisses bekannt sind. So sind insgesamt vier Kategorien von Spektren bekannt, die in zwei Gruppen zusammengefasst werden können.

Folgende vier Kategorien von Spektren liegen vor:

- Fouriertransformation:
  - absolute Spektren,
  - Differenzspektren,
- Wavelet-Transformation:
  - absolute Spektren,
  - Differenzspektren.

Vorläufig unbekannt ist die Form des segmentierten Objekts und ob und in welcher Stärke Formveränderungen und somit Deformationen vorliegen. Ziel ist es, genau diese Deformationen möglichst früh zu erkennen.

Bekannt ist, ob dieses Objekt mit diesem Messmodul schon bestimmt wurde bzw. ob aus dem CAD Daten vorliegen. Bei Wiederholungsmessungen muss die Beobachtung immer vom gleichen Theodolitstandpunkt und bei gleichen Visureinstellungen erfolgen. Im Falle der ersten Bestimmung (Nullmessung) liegen keine Spektren über die segmentierten Objekte vor, somit können nur absolute Spektren verarbeitet werden. Im Falle von Wiederholungsmessungen unter der oben genannten Voraussetzung können zusätzlich Differenzspektren berechnet werden, die weitere Informationen über Änderungen am Objekt liefern. Der Operateur muss gewährleisten, dass diese Voraussetzungen erfüllt sind.

Weiters ist zu prüfen, ob eventuelle Verdeckungen, Schattenbildungen und andere extreme Lichteinflüsse eine Verzerrung der wahrnehmbaren Objektform bewirken und somit eine andere Objektform bzw. eine scheinbare Veränderung der Objektform vortäuschen. In diesen Fällen ist man vorerst nur auf das manuelle Eingreifen des Operateurs angewiesen. Ein automatisches Erkennen dieser äußeren Einflüsse ohne unterstützendes Einwirken des Operateurs, ist in einer weiteren Forschungsarbeit zu erarbeiten. Aus heutiger Sicht ist allerdings zu bezweifeln, ob mit den bestehenden Systemkomponenten diese Fehlermeldung allein durch „intelligente“ Software bewerkstelligt werden kann. Vermutlich müssen weitere Sensoren Daten liefern, die diese automatische Erkennung ermöglichen.

Die Regeln können nun für jede Kategorie aufgestellt und im Farbsegmentverfahren entsprechend der durchgeführten Berechnungen (Fouriertransformation oder Wavelet-Transformation) angewandt werden.

Zwei Fragen müssen weiters im Auswerteprozess entschieden werden:

1. welche Berechnung soll durchgeführt werden?
2. ist eine Berechnung ausreichend oder müssen weitere Berechnungen angeschlossen werden?

Diese beiden Fragestellungen sind eng mit einer grundsätzlichen Bewertung der beiden Berechnungswege (Fouriertransformation, Wavelet-Transformation) verknüpft. Bevor hier eine grundsätzliche Entscheidung zugunsten einer der beiden Transformationen getroffen wird, sind die Auswerteregeln zu formulieren (siehe Tab. 6.1) und die Mächtigkeit der jeweiligen Regeln abzuschätzen, um schließlich die Effizienz des Berechnungsweges zu bewerten.

Die Beobachtungsergebnisse lassen erwarten, dass durch die zusätzliche Berechnung von Differenzspektren bei Wiederholungs- und Überwachungsmessungen eine bessere Interpretation hinsichtlich Formänderungen erreicht wird.

Fall 1) Fouriertransformation: absolutes Spektrum: • alle Amplituden sind sehr klein, nur 1.Amplitude groß ⇒ kreisförmiges Objekt • 4.Amplitude ist größer ⇒ Viereck • alle niedrigen Sequenzen haben höhere Amplituden, aber keine Amplitude ausgenommen der 1. ist hoch ⇒ Deformation eines kreisförmigen Objekts
Fall 2) Fouriertransformation: Differenzspektrum: • Amplitudenwerte der niedrigen Sequenzen liegen über der Rauschgrenze ⇒ Deformation • nur die 1.Amplitude hat einen höheren Wert ⇒ Deformation eines kreisförmigen Objekts
Fall 3) Wavelet-Transformation: absolutes Spektrum: • generell treten kleine Koeffizienten auf ⇒ kreisförmiges Objekt • es treten hohe Koeffizienten bei hohen Skalierungswerten auf ⇒ Viereck • es treten höhere Koeffizienten auf, aber bei hohen Skalierungswerten keine hohen Koeffizienten ⇒ Deformation eines kreisförmigen Objekts
Fall 4) Wavelet-Transformation: Differenzspektrum: • Koeffizienten liegen bei hohen Skalierungswerten über der Rauschgrenze ⇒ Deformation • es treten hohe Koeffizienten bei hohen Skalierungswerten auf ⇒ Deformation eines Vierecks

Tab. 6.1: Regeln im Farbsegmentverfahren

Bei Betrachtung dieser einfachen Regeln ergeben sich nun folgende Feststellungen:

- bei den in dieser Arbeit betrachteten Objekten sind anhand der absoluten Spektren (Kap. 4.1) Formzuordnungen möglich,
- bei Vergleich von Fouriertransformation und Wavelet-Transformation bei absoluten Spektren hat sich die Fouriertransformation als einfacher handhabbar erwiesen (siehe Kap. 4.2 und 4.3),
- bei absoluten Spektren können mit der Fouriertransformation nur Deformationen an kreisförmigen Objekten detektiert werden, da die Ergebnisse beim Viereck speziell bei geringen Deformationen keinen eindeutigen Trend aufweisen (siehe Kap. 4.1 bis 4.3),
- bei absoluten Spektren können mit der Wavelet-Transformation nur Deformationen an kreisförmigen Objekten detektiert werden, da die Ergebnisse beim Viereck theoretisch auch von einem stark deformierten Kreis stammen können (siehe Kap. 4.2 und 4.3),
- Differenz-Fourierspektren können besser deformierte kreisförmige Objekte aufspüren (vgl. in Kap. 4.4),
- Differenz-Wavelet-Transformationen eignen sich besser bei deformierten viereckigen Objekten (vgl. in Kap. 4.4).

Allgemein ist festzustellen, dass beide Methoden zur Detektion von Deformationen geeignet sind und bei einfachen klar unterscheidbaren Formen auch zur Formerkennung genützt werden können.

Speziell beim Viereck ist die Bestimmung der absoluten Spektren für die Detektion von Deformationen nicht ausreichend, in diesen Fällen muss jedenfalls auf die Berechnung von Differenzspektren zurückgegriffen werden.

Die anspruchsvollere Wavelet-Transformation erweist sich in zwei Aspekten als vorteilhaft:

- die n x m-Datenmenge kann bessere Entscheidungsgrundlagen in Fällen mit geringen Ergebnisunterschieden liefern (vgl. Abb. 4.56 und 4.59),
- da die Wavelet-Transformation auch eine Ortsanalyse beinhaltet, kann auf den Ort der Deformationserscheinung geschlossen werden (z.B. in Abb. 4.27). Allerdings konnte nur bei krassen Formänderungen eine ausreichende Sensibilität festgestellt werden. Bei geringen Formänderungen aufgrund der Deformationserscheinung kann nur auf die Tatsache, dass eine Deformation eingetreten ist, geschlossen werden.

Vorerst wird die Entscheidung getroffen, zuerst immer die Fouriertransformation anzuwenden. Im Anwendungsfall ist dann die weitere Entscheidung zu treffen, ob die Wavelet-Transformation als zweite Methode benötigt wird.

Weiters treten in den oben genannten Regeln einige unscharfe Begriffe wie „hoch", „höher", „klein", „kleiner" „niedrig", „groß", „größer", „Rauschgrenze" auf. Für diese Begriffe müssen Schwellwerte definiert werden. Die Schwellwerte sind aus den Beobachtungsergebnissen (Kap. 4) ableitbar und können anhand der betrachteten Beispiele definiert werden.

Stellen sich scharfe Schwellwerte in weiteren Anwendungsfällen als unzureichend heraus, so könnte die Analyse durch die Anwendung von Fuzzy-Methoden verbessert werden. An dieser Stelle sei an die weiterführende Literatur verwiesen [NF96, Böh93].

Damit ergibt sich eine Grundstufe des Farbsegmentverfahrens bestehend aus 10 Regeln (Tab. 6.1) und 13 Schwellwerten (Tab. 6.2) sowie insgesamt 5 Ergebniskategorien.

Amplituden		< 1
.Amplitude groß		> 3.5
4.Amplitude größer		> 5
niedrige Sequenzen		≤ 6
höhere Amplituden		≥ 1
hohe Amplitude		> 4
Rauschgrenze	Fourier	0.5
	Wavelet	15
.Amplitude höher		> 1
kleine Koeffizienten		≤ 25
hohe Koeffizienten		> 70
hohe Skalierungswerte		>90
höhe		> 25

Tab. 6.2: Schwellwerte der Regelgrößen

Folgende Meldungen (Ergebniskategorien) des Farbsegmentverfahrens können in dieser ersten Stufe an das Gesamtsystem weitergegeben werden:

⇒ Objekt ist kreisförmig
⇒ Objekt ist viereckig
⇒ Objekt ist deformiert

Zusätzlich können auch die beiden Kombinationen vom System gemeldet werden:

⇒ kreisförmiges Objekt ist deformiert
⇒ viereckiges Objekt ist deformiert

Weitere Abstufungen bei den Schwellwerten ermöglichen eine differenzierte Ausgabe der Deformationserscheinung. Dadurch können weitere Attribute dem Ergebnis beigefügt werden:

⇒ geringe Deformationserscheinung
⇒ starke Deformationserscheinung
⇒ sehr starke Deformationserscheinung (Alarmsituation)

Diese Schwellwertstaffelung könnte auch anwendungsspezifisch variiert werden, je nachdem welche Formveränderungen toleriert werden.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Herausforderung angenommen, ausgehend von einem Konzept eines automatischen, wissensbasierenden Theodolitmesssystems ein Messmodul zu entwickeln, das eine qualitative automatische Interpretation eines zu messenden Objekts unter Ausnutzung der Farbinformation in Hinblick auf Überwachungsmessungen ermöglicht.

Dabei wurde in vielfacher Hinsicht anwendungstechnisches Neuland betreten. Anhand einfacher Testszenarien und der vorläufigen Beschränkung auf einfache Objektformen konnte die Konzeption, Umsetzung und Ausführung des Moduls nur exemplarisch gezeigt werden.

Ein Farbsegmentverfahren wurde entworfen, dass automatisch, ausgehend von der Farbinformation verschiedener Teilbereiche des Gesamtobjekts, auf die Formveränderung dieser Teilobjekte schließen kann. Wird eine Formveränderung erkannt, kann auf eingetretene Deformationen des Objekts bzw. Teilobjekts geschlossen werden. Ausgangspunkt war die Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen und die damit gekoppelte Fähigkeit schnell einen qualitativ interpretierten Gesamteindruck einer wahrgenommenen Szene zu bekommen.

In Hinblick auf die Integration in ein Messsystem, welches in einem laufenden Forschungsprojekt entwickelt wird, wurde nun ein qualitatives Messverfahren entwickelt, dass einerseits in gewissem Grade diese besondere Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen nachbildet und anderseits aufgrund des technischen Instrumentariums die Präzision und Aussagekraft einer qualitativen Szenenbewertung steigert.

Für einfache Szenarien und der Beschränkung auf einfache Formen konnte vorerst eine Methodik gefunden werden, die diesen Anspruch erfüllt. Dabei kommen bekannte und vielfach verwendbare mathematische Verfahren zum Einsatz. Die Diskrete Fouriertransformation und die Kontinuierliche Wavelet-Analyse haben sich als geeignet erwiesen, die Interpretation einer Bildinformation zu ermöglichen. Sie stellen damit ein unverzichtbares Bindeglied zwischen dem Segmentierungsergebnis anhand der Farbinformation der aufgenommenen Szene und der Interpretation der segmentierten Objekte dar.

Eine künftige automatische Anwendung wird aufgrund der Komplexität der zu betrachtenden Szenen und der Komplexität verschiedener Störeinflüsse eine große Herausforderung bedeuten. Die Bewältigung dieser Probleme stellt ein enormes Entwicklungspotential dar. Es muss auch festgestellt werden, dass neben der weiteren verfeinerten Definition von Regeln auch andere Verfahren miteinbezogen werden müssen. Es ist zu erwarten, dass die Anwendungen der Ingenieurgeodäsie und die Verfahren der Bildbearbeitung und Bildinterpretation verstärkt zusammenwachsen. Die intensive Zusammenarbeit zwischen Geodäten und Informatikern, die mit dem dieser Arbeit nahestehendem Projekt „Theodolite-based and Knowledge-based Multi-Sensor-System for 3D Object Recognition“ erst einen Anfang nahm, muss weiter intensiviert werden.

Für diese Arbeit sind konkret folgende Entwicklungsmöglichkeiten gegeben:

- Verfeinerung und Erweiterung des Regelwerks:

Darunter versteht man ist in erster Linie die Ausweitung der Interpretation auf zusätzliche Formen.

- Integration von Fuzzy-Methoden:
  Diese schaffen die Möglichkeit ebenfalls in verfeinerter Weise mit unscharfen Begriffen, die in den Regeln enthalten sind, besser umzugehen.
- Verbesserung der verwendeten Hardware:
  Durch den Einsatz von Kameras mit höherer Lichtempfindlichkeit, höherer Auflösung und Steuerung aller Kamerafunktionen per Computer sind Verbesserungen teilweise direkt umsetzbar. Nachhaltige Steigerungen der Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit des Systems sind aber erst bei einer grundsätzlichen Neuentwicklung von einem Sensorsystem bestehend aus Theodolit und CCD-Kamera zu erwarten.
- Anwendung weiterer Bildverarbeitungsalgorithmen:
  Dies bedeutet eine weitere Durchforstung und entsprechende Anwendung bestehender Algorithmen und die Entwicklung neuer Verfahren, die im Bereich der Bildvorverarbeitung und der Bildanalyse einen Qualitätssprung bewirken.

Das vorgestellte Verfahren kann im Rahmen des gesamten automatischen Theodolitmesssystems in vielen Bereichen zum Einsatz kommen, wo jetzt großteils manuelle Theodolitsysteme und photogrammetrische Nahbereichssysteme verwendet werden. Speziell die Überwachungsmessungen von äußeren und inneren Bauwerkstrukturen aller Art, die Kontrolle und Überwachung von Industrieanlagen, sowie die Vermessungs- und Überwachungsanwendungen in Fertigungsprozessen des Verkehrsmittelbaus bieten ein breites Anwendungsfeld.

Grundsätzlich wurde mit dieser Arbeit ein weiterer Schritt gesetzt, der die außerordentliche visuelle Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen und die präzisen technischen Entwicklungen in Messprozessen zu einem automatisierten technischen System zusammenführt.

Literaturverzeichnis

[Böh93] G. Böhme, Fuzzy-Logik, Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen, Springer, Berlin Heidelberg, 1993

[Bri92] E.O. Brigham, FFT, Schnelle Fourier-Transformation, Oldenbourg, München, 1992

[BS93] H. Niedrig (Hrsg.), Bergmann Schaefer - Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 Optik, S.665-754, de Gruyter, Berlin, New York, 1993

[Cha97] U. Chalupa, Kalibrierung von CCD-Kameras in motorisierten Theodoliten, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1997

[Fre88] H. Frey, *Digitale Bildverarbeitung in Farbräumen*, Dissertation, Technische Universität München, 1988

[HDB00] R.-J. Ahlers (Hrsg.), *Das Handbuch der Bildverarbeitung*, expert-verlag, Renningen-Malmsheim, 2000

[KNS01] H. Kahmen, A. Nießner, A. de Seixas, *Digital Image Analysis: Selected Techniques and Applications*, Kap. 17, Springer, New York, 2001

[Lie97] C.-E. Liedtke, *Strategien der wissensbasierten Bildinterpretation*, Proceedings des 44. DVW-Seminar „Hybride Vermessungssysteme", 19.-20.6., UniBwM Neubiberg, 1997

[Maa97] H.G. Maas, *Algorithmen der Bildanalyse und -zuordnung*, Proceedings des 44. DVW-Seminar „Hybride Vermessungssysteme", 19.-20.6., UniBwM Neubiberg, 1997

[MAT01] Matlab 6.1, *online Help*, The MathWorks, 2001

[Mis98] A. Mischke, *Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten*, Dissertation, Technische Universität Wien, 1998

[NF96] D. McNeill, P. Freiberger, *Fuzzy Logic, Die „unscharfe" Logik erobert die Technik*, Knaur, München, 1996

[O3D01] A.Grün, H. Kahmen (Hrsg.), *Optical 3-D Measurement Techniques*, Band I-V, Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, TU Wien, 1987-2001

[Pup91] F. Puppe, *Einführung in Expertensysteme*, Springer, Berlin Heidelberg, 1991

[SDW86] Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung, *Wahrnehmung und visuelles System*, Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1986

[SDW94] Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung, *Gehirn und Bewußtsein*, Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1994

[Sei01] A. de Seixas, *3D-Objektrekonstruktion mittels Gitterlinien-Verfahren*, Dissertation, Technische Universität Wien, 2001

[Ton99] W.B. Tong et al., *Traffic Sign Detection from Image Sequences*, Proceedings of the International Workshop on Mobile Mapping Technology, 21.-23.4., Bangkok, Thailand, 1999

[ÜK00] C. Überhuber, S. Katzenbeisser, *Matlab 6, eine Einführung*, Springer, Wien, 2000

[Wie95] A. Wieser, *Ingenieurgeodätische Überwachungsmessung mit Videotheodoliten*, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1995

Anhang

Ergänzend zu den Betrachtungen in Kap. 5.2 sind hier die Ergebnisse der weiteren Wiederholungsmessungen angeführt. Die einzelnen Ergebnisse sind nach Art des Objekts und der Transformation in Gruppen zusammengefasst. Die Untersuchungen des Rauschverhaltens der CCD-Aufnahme bestätigen die Signifikanz der Testmessungen aus Kap. 4.4 und die Empfindlichkeit des Farbsegmentverfahrens bis zu 0.3% Deformation.

Differenz-Fourierspektrum beim Kreis:

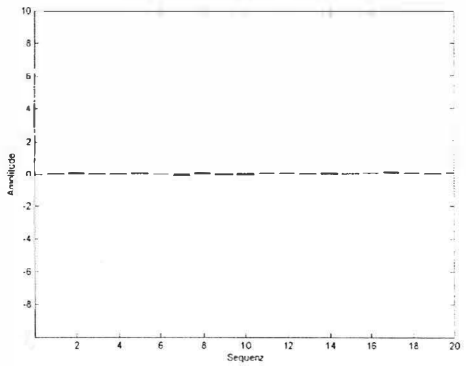


Abb. A.1: zweite Vergleichsmessung

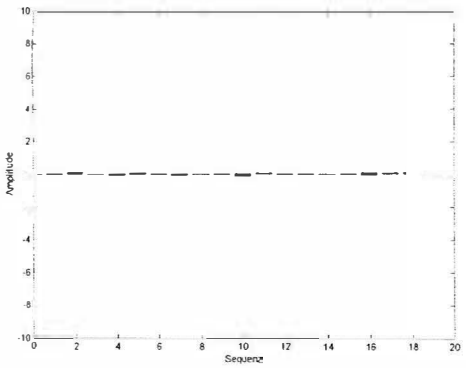


Abb. A.2: dritte Vergleichsmessung

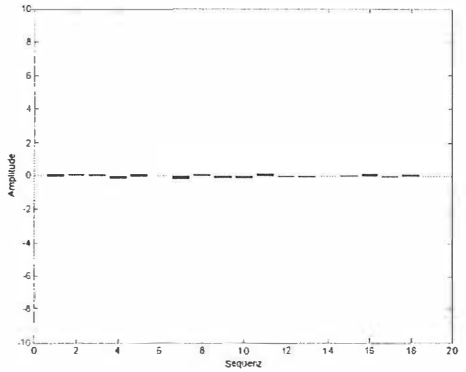


Abb. A.3: vierte Vergleichsmessung

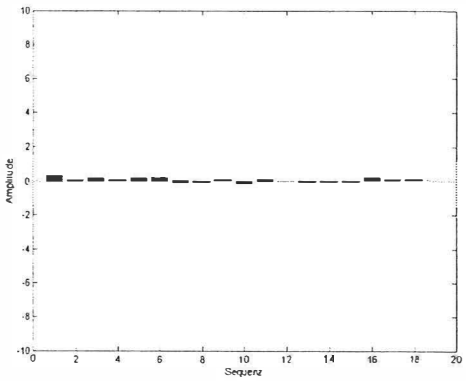


Abb. A.4: fünfte Vergleichsmessung

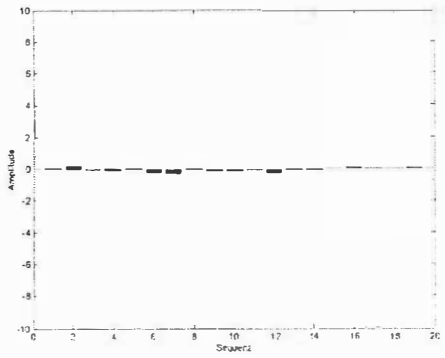


Abb. A.5: sechste Vergleichsmessung

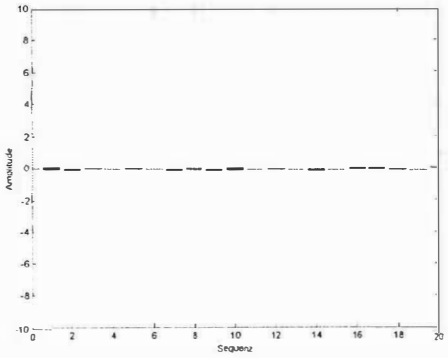


Abb. A.6: siebente Vergleichsmessung

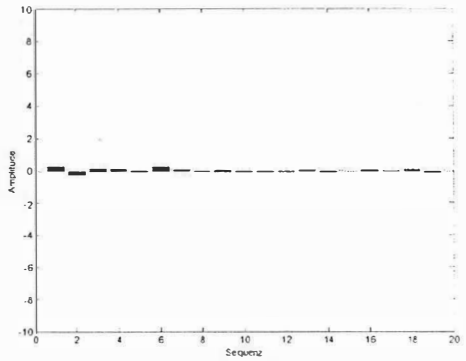


Abb. A.7: achte Vergleichsmessung

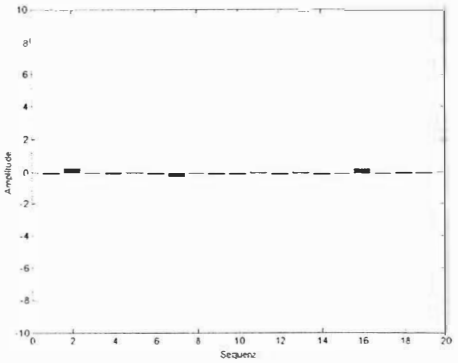


Abb. A.8: neunte Vergleichsmessung

Differenz-Wavelet-Transformation beim Kreis

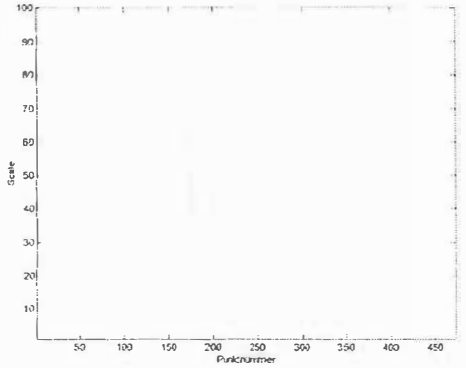


Abb. A.9: zweite Vergleichsmessung in 2D

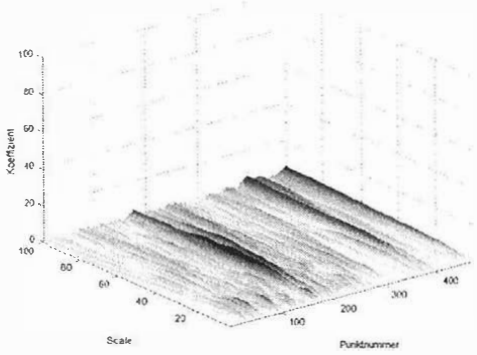


Abb. A.10: zweite Vergleichsmessung in 3D

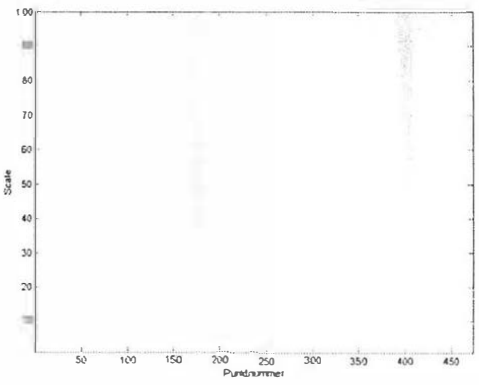


Abb. A.11: dritte Vergleichsmessung in 2D

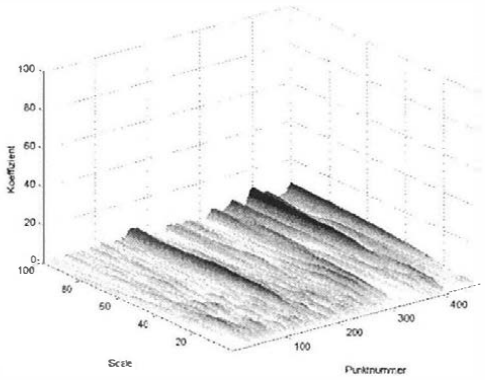


Abb. A.12: dritte Vergleichsmessung in 3D

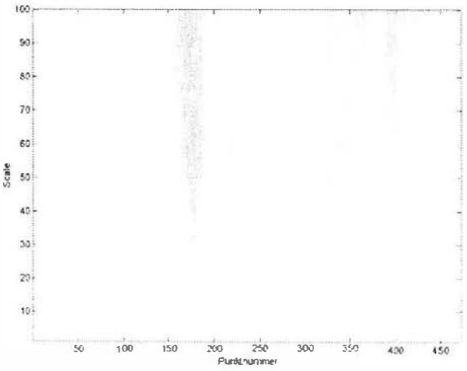


Abb. A.13: vierte Vergleichsmessung in 2D

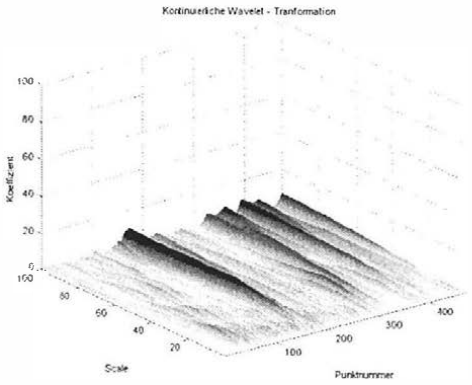


Abb. A.14: vierte Vergleichsmessung in 3D

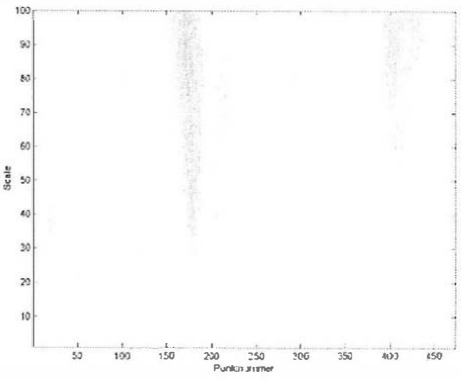


Abb. A.15: fünfte Vergleichsmessung in 2D

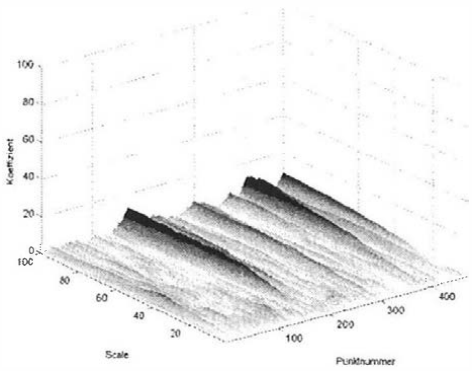


Abb. A.16: fünfte Vergleichsmessung in 3D

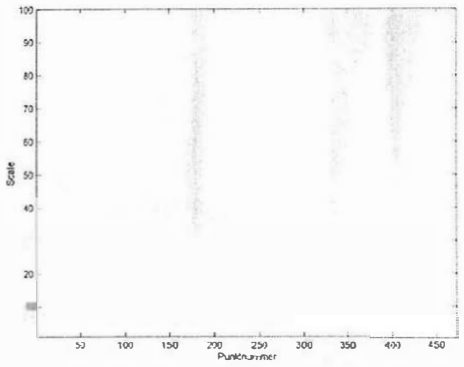


Abb. A.17: sechste Vergleichsmessung in 2D

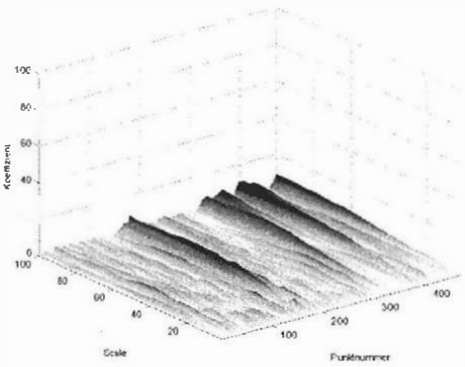


Abb. A.18: sechste Vergleichsmessung in 3D

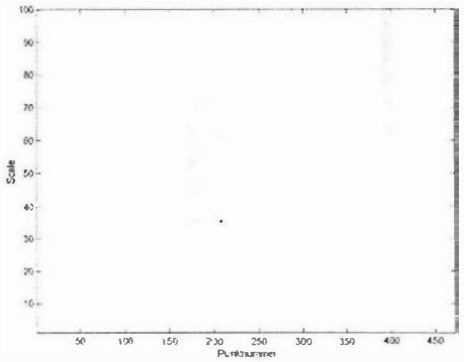


Abb. A.19: siebente Vergleichsmessung in 2D

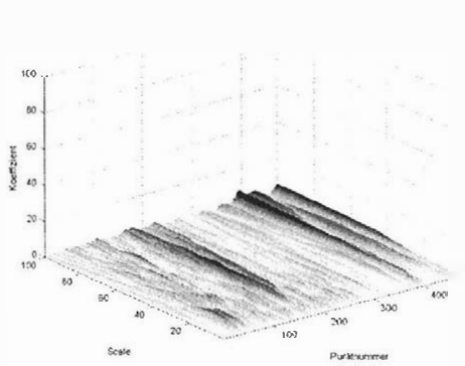


Abb. A.20: siebente Vergleichsmessung in 3D

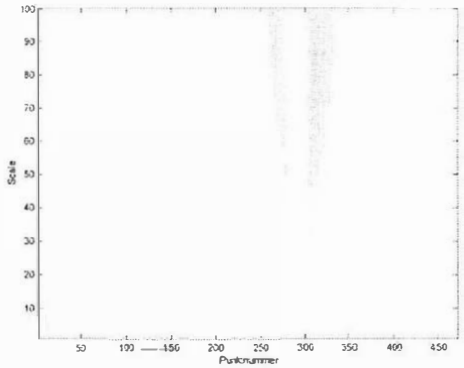


Abb. A.21: achte Vergleichsmessung in 2D

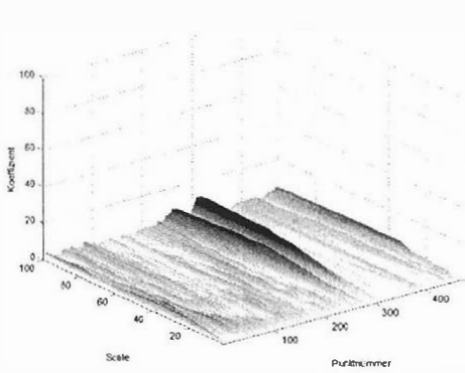


Abb. A.22: achte Vergleichsmessung in 3D

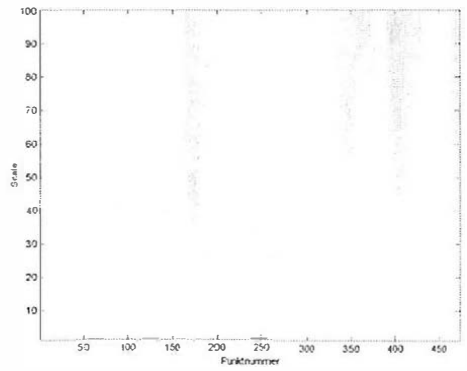


Abb. A.23: neunte Vergleichsmessung in 2D

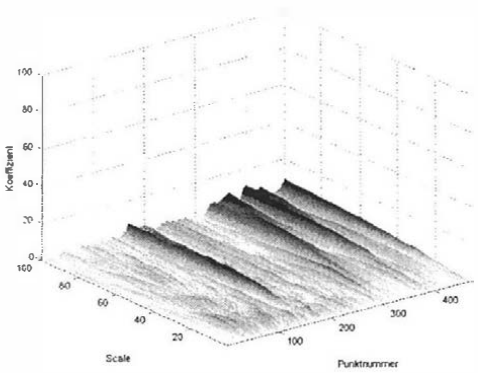


Abb. A.24: neunte Vergleichsmessung in 3D

Differenz-Fourierspektrum beim Viereck

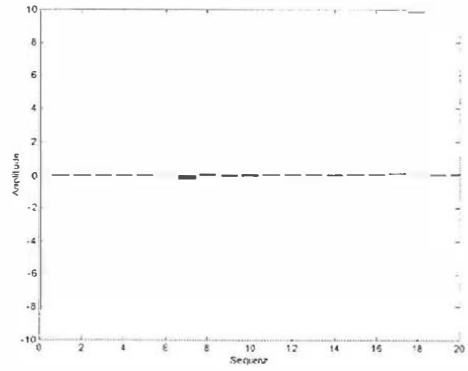


Abb. A.25: zweite Vergleichsmessung

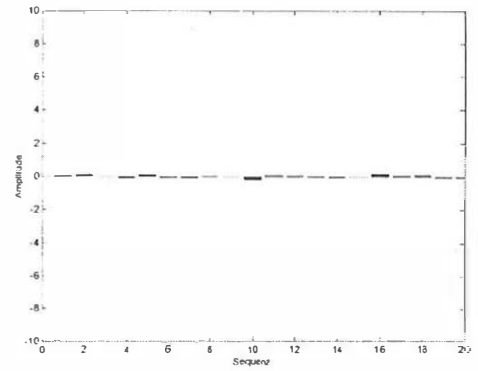


Abb. A.26: dritte Vergleichsmessung

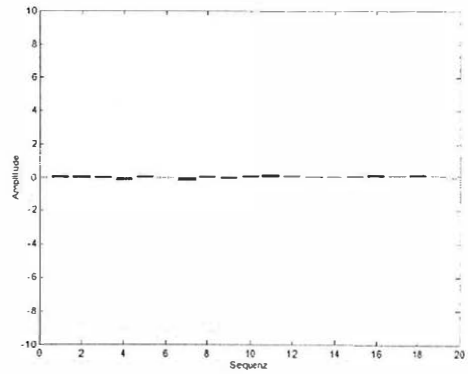


Abb. A.27: vierte Vergleichsmessung

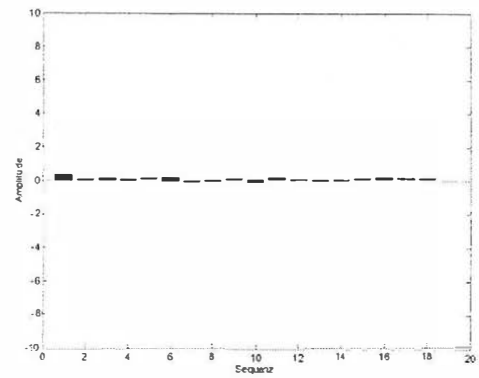


Abb. A.28: fünfte Vergleichsmessung

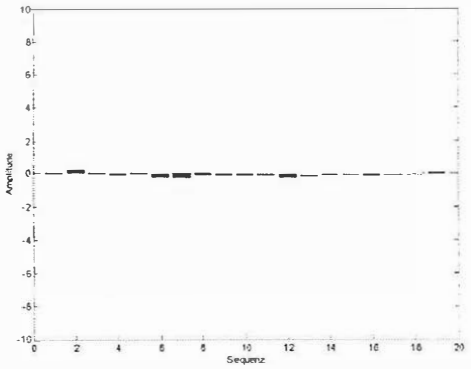


Abb. A.29: sechste Vergleichsmessung

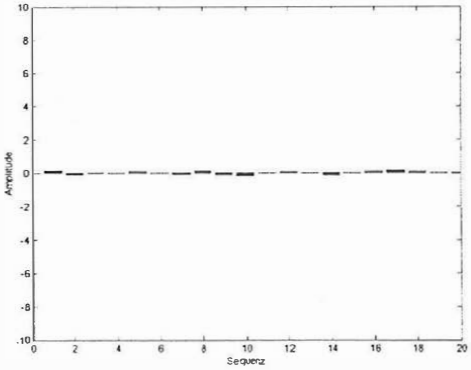


Abb. A.30: siebente Vergleichsmessung

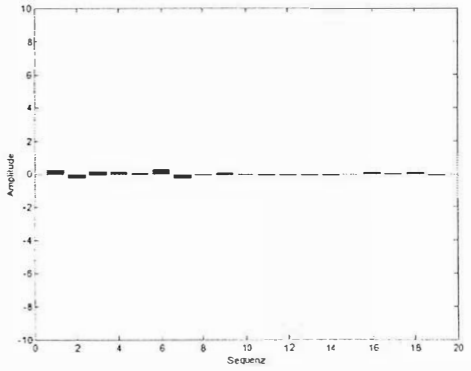


Abb. A.31: achte Vergleichsmessung

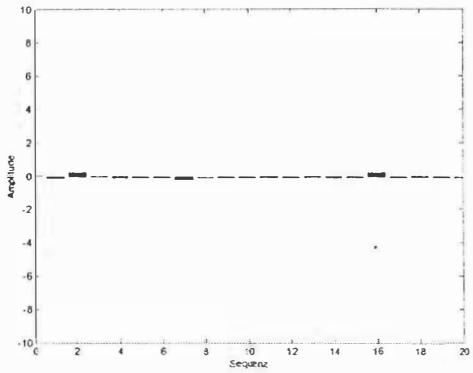


Abb. A.32: neunte Vergleichsmessung

Differenz-Wavelet-Transformation beim Viereck:

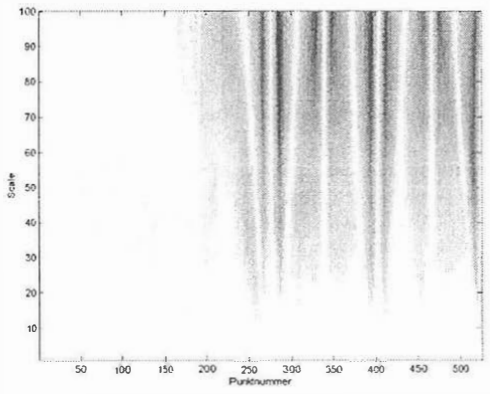


Abb. A.33: zweite Vergleichsmessung in 2D

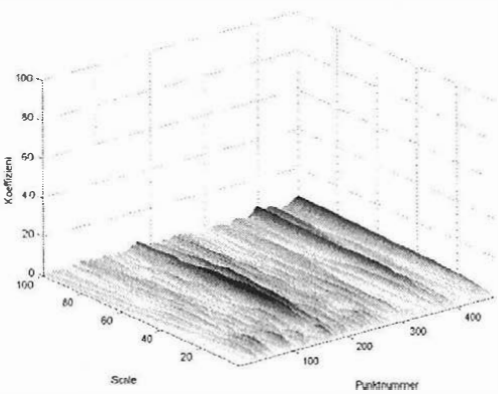


Abb. A.34: zweite Vergleichsmessung in 3D

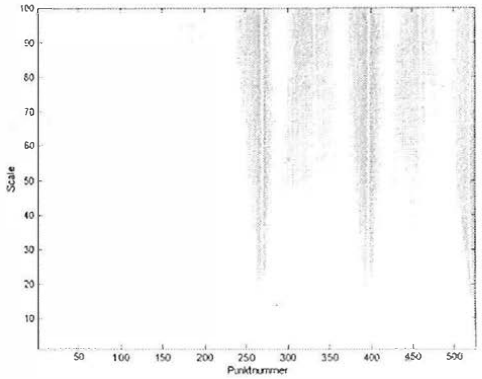


Abb. A.35: dritte Vergleichsmessung in 2D

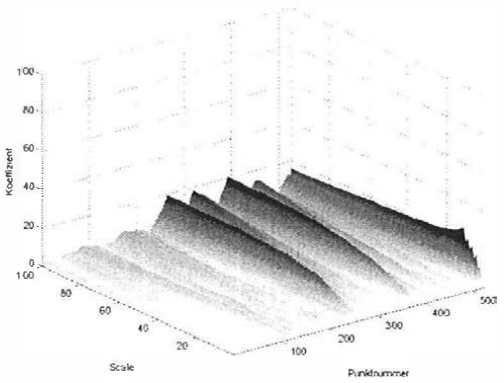


Abb. A.36: dritte Vergleichsmessung in 3D

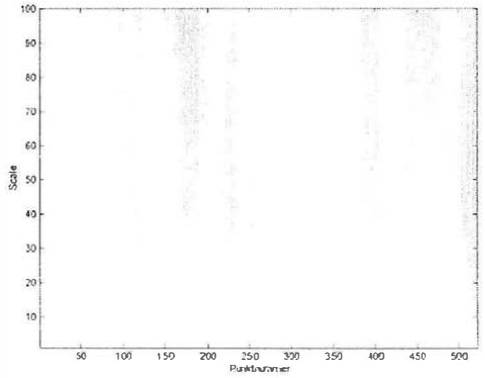


Abb. A.37: vierte Vergleichsmessung in 2D

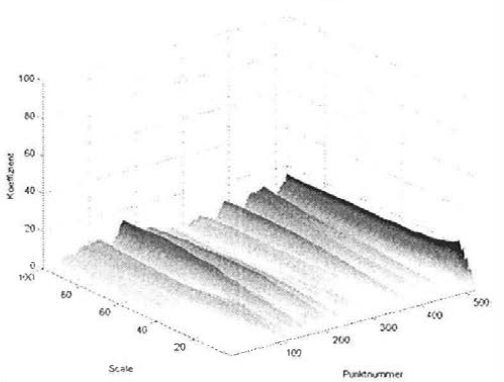


Abb. A.38: vierte Vergleichsmessung in 3D

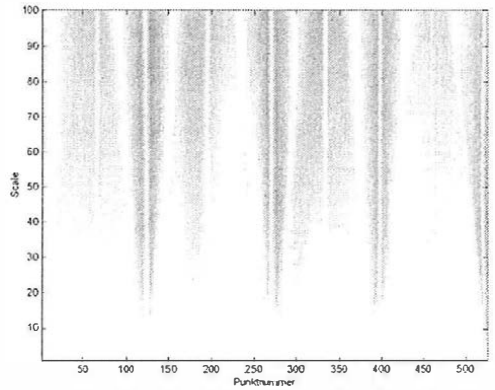


Abb. A.39: fünfte Vergleichsmessung in 2D

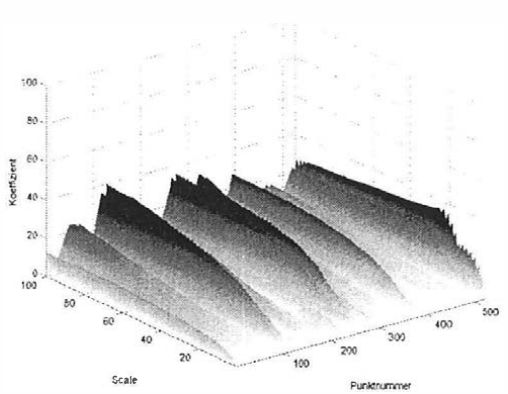


Abb. A.40: fünfte Vergleichsmessung in 3D

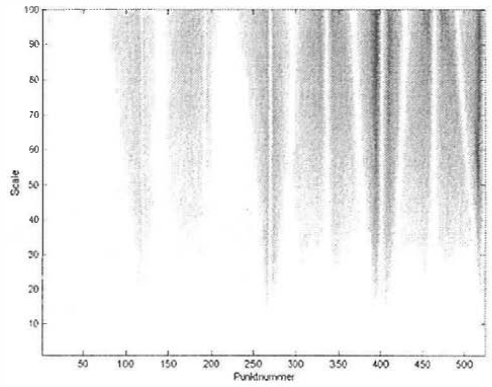


Abb. A.41: sechste Vergleichsmessung in 2D

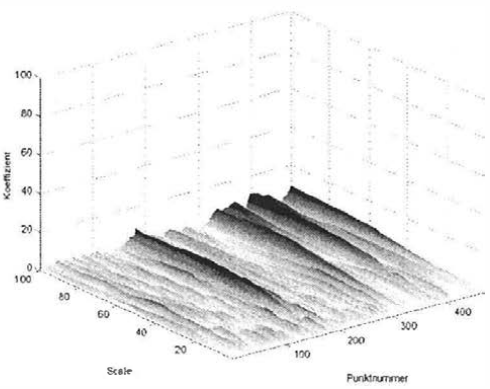


Abb. A.42: sechste Vergleichsmessung in 3D

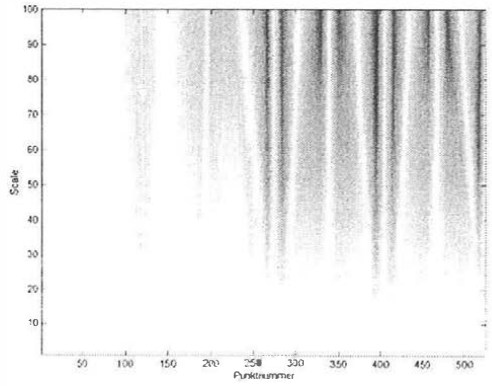


Abb. A.43: siebente Vergleichsmessung in 2D

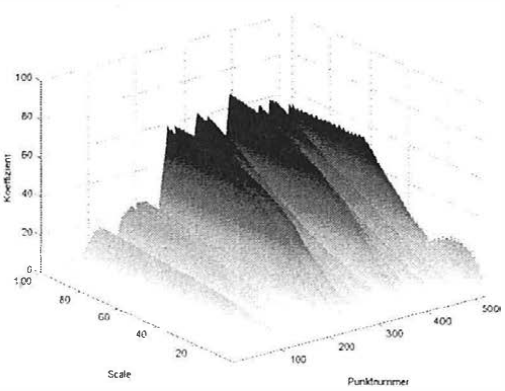


Abb. A.44: siebente Vergleichsmessung in 3D

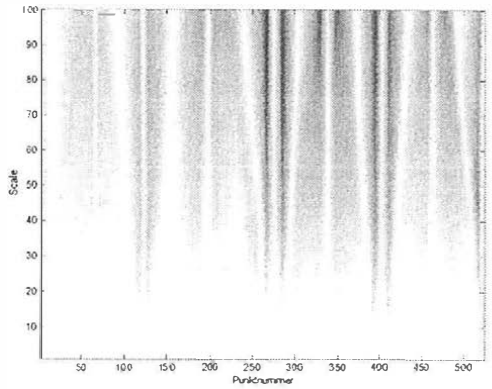


Abb. A.45: achte Vergleichsmessung in 2D

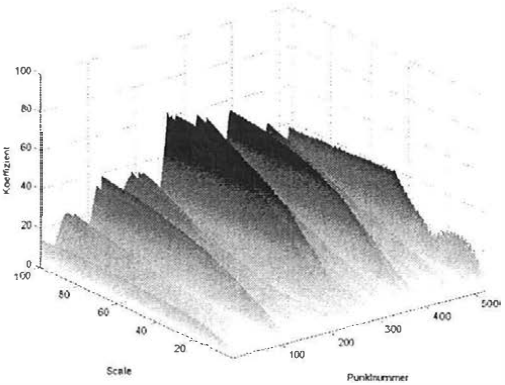


Abb. A.46: achte Vergleichsmessung in 3D

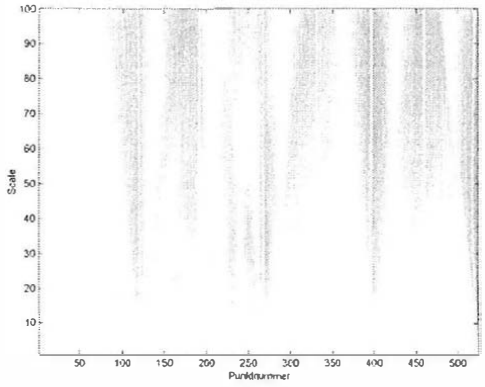


Abb. A.47: neunte Vergleichsmessung in 2D

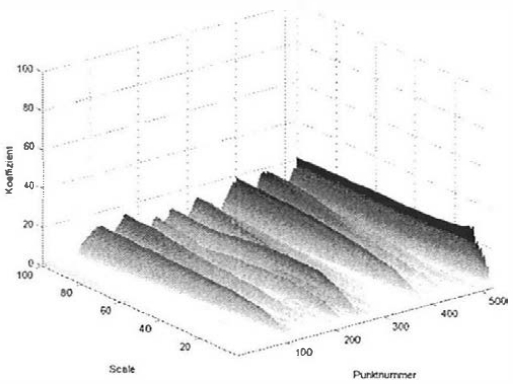


Abb. A.48: neunte Vergleichsmessung in 3D

Lebenslauf

Geburtsdatum:	4.4.1969 in Wien, Österreich
Staatsangehörigkeit:	Österreich
Pflichtschule:	Sept. 1975 - Juni 1984 in 1140 Wien
Schulausbildung:	Sept. 1984 - Juni 1989 Höhere Technische Lehranstalt, Abteilung für Elektrische Nachrichtentechnik und Elektronik in 1100 Wien
Studium:	Okt. 1989 - März 1997 Technische Physik an der Technischen Universität Wien Diplomarbeit am Institut für Experimentalphysik
Berufserfahrung:	Aug. 1987 und 1988 Technische Praktika bei der Fa. GEFAT im Rahmen der Schulausbildung
	Feb. 1990 - Juni 1996 Nachhilfeunterricht in Mathematik, Physik und technischen Fächern neben dem Studium
	Mai 1997 - Dez. 1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im FWF- Forschungsprojekt "Theory and Applications of Digital Image Processing and Pattern Recognition" bei o.Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen, Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien
	seit Jän. 1999 Universitäts-Assistent am Institut für Geodäsie und Geophysik, Abteilung Angewandte Geodäsie und Ingenieurgeodäsie, TU Wien

GEOWISSENSCHAFTLICHE MITTEILUNGEN

Bisher erschienen:

Heft 1 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1970-1973, Dezember 1976.

Heft 2 EGGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Taschenrechner HP 45 und HP 65, Programme und Anwendungen im Vermessungswesen. 1. Auflage, März 1974, Special Edition in English Juli 1974, 2. verbesserte Auflage, November 1974.

Heft 3 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1973-1974, September 1974.

Heft 4 EGGER-PALFINGER-PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Tektronix-Tischrechner TEK 31, Programmbibliothek für den Einsatz im Vermessungswesen, November 1974.

Heft 5 K. LEDERSTEGER, Die horizontale Isostasie und das isostatische Geoid, Februar 1975.

Heft 6 F. REINHART, Katalog von FK4 Horrebow-Paaren für Breiten von +30 bis +60, Oktober 1975.

Heft 7 Arbeiten aus dem Institut für Höhere Geodäsie, Wien, Dezember 1975.

Heft 8 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie zum XIII. Internationalen Kongreß für Photogrammetrie in Helsinki 1976, Wien, Juli 1976.

Heft 9 W. PILLEWIZER, Felsdarstellung aus Orthophotos, Wien, Juni 1976.

Heft 10 PERDICH-PLACH-WAGENSOMMERER, Der Einsatz des programmierbaren Taschenrechners Texas Instruments SR-52 mit Drucker PC100 in der ingenieurgeodätischen Rechentechnik Wien, Mai 1976.

Heft 11 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1974-1976, November 1976.

Heft 12 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1976, Wien, Mai 1976.

Heft 13 Veröffentlichungen des Instituts für Photogrammetrie anläßlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. h.c. K. Neumaier, Wien, Januar 1978.

Heft 14 L. MOLNAR, Self Checking Analytical Relative Orientation and Strip Formation, Wien, Dezember 1978.

Heft 15 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung anläßlich des 80. Geburtstages von Prof. Dr. Alois Bavir, Wien, Januar 1979.

Heft 16 Kolloquium der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen. 1976-1978, November 1979.

Heft 17 E. VOZIKIS, Die photographische Differentialumbildung gekrümmter Flächen mit Beispielen aus der Architekturbildmessung, Wien, Dezember 1979.

Heft 18 Veröffentlichungen des Instituts für allgemeine Geodäsie anläßlich des 75. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Die Höhe des Großglockners, Wien, 1981.

Heft 19 H. KAGER, Bündeltriangulation mit indirekt beobachteten Kreiszentren, Wien, April 1981.

Heft 20 Kartographische Vorträge der Geodätischen Informationstage 1980, Wien, Mai 1982.

Heft 21 Veröffentlichungen des Instituts für Kartographie anläßlich des 70. Geburtstages von Prof. Dr. Wolfgang Pillewizer: Glaziologie und Kartographie, Wien, Dezember 1982.

Heft 22 K. TEMPFLI, Genauigkeitsschätzung digitaler Höhenmodelle mittels Spektralanalyse, Wien, Mai 1982.

Heft 23 E. CSAPLOVICS, Interpretation von Farbinfrarotbildern, Wien, November 1982.

Heft 24 J. JANSA, Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms, Wien, Mai 1983.

Heft 25 Zusammenfassung der Diplomarbeiten, Dissertationen und Habilitationen an den geodätischen Instituten der TU Wien, Wien, November 1984.

Heft 26 T. WUNDERLICH, Die voraussetzungsfreie Bestimmung von Refraktionswinkeln, Wien, August 1985.

Heft 27 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Bedarf und Möglichkeiten in Österreich, Juni 1986.

Heft 28 K. NOVAK, Orientierung von Amateuraufnahmen ohne Paßpunkte, Wien, August 1986.

Heft 29 Veröffentlichungen des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abt. Ingenieurgeodäsie, anläßlich des 80. Geburtstages von Prof. Dipl.-Ing. Dr. F. Hauer, Wien, Oktober 1986.

Heft 30 K.-H. ROCH, Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften, Wien, Februar 1987.

Heft 31 G. HE, Bildverbesserung mittels digitaler Filterung, Wien, April 1989.

Heft 32 F. SCHLÖGELHOFER, Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie, Wien, April 1989.

Heft 33 G. GERSTBACH (Hrsg.), Geowissenschaftliche/geotechnische Daten in Landinformationssystemen - Datenbestände und Datenaustausch in Österreich, Wien, Juni 1989.

Heft 34 F. HOCHSTÖGER, Ein Beitrag zur Anwendung und Visualisierung digitaler Geländemodelle, Wien, Dezember 1989.

Heft 35 R. WEBER, Lokale Schwerefeldmodellierung unter Berücksichtigung spektraler Methoden zur Geländereduktion, Wien, April 1990.

Heft 36 o. Prof. Dr. Hans Schmid zum 70. Geburtstag. Veröffentlichung der Abteilung für Landesvermessung, Wien, Oktober 1990.

Heft 37 G. GERSTBACH, H. P. HÖLLRIEGL und R. WEBER, Geowissenschaftliche Informationsbörse - Eine Nachlese zur GeoLIS II, Wien, Oktober 1990.

Heft 38 R. ECKER, Rastergraphische Visualisierungen mittels digitaler Geländemodelle, Wien, August 1991.

Heft 39 Kartographische Forschungen und anwendungsorientierte Entwicklungen, herausgegeben von W. Stams und F. Kelnhofer zum 80. Geburtstag von Prof. Dr. W. Pillewizer, Wien, Juli 1991.

Heft 39a W. RIEGER, Hydrologische Anwendungen des digitalen Geländemodelles, Wien, Juli 1992.

Heft 40 K. STEINNOCHER, Methodische Erweiterungen der Landnutzungsklassifikation und Implementierung auf einem Transputernetzwerk, Wien, Juli 1994.

Heft 41 G. FORKERT, Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurvenförmiger Elemente, Wien, Juli 1994.

Heft 42 M. SCHÖNER, W. SCHÖNER, Photogrammetrische und glaziologische Untersuchungen am Gsbre (Ergebnisse der Spitzbergenexpedition 1991), Wien, Mai 1996.

Heft 43 M. ROIC, Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Videotheodoliten, Wien, April 1996.

Heft 44 G. RETSCHER, 3D-Gleiserfassung mit einem Multisensorsystem und linearen Filterverfahren, Wien, April 1996.

Heft 45 W. DAXINGER, Astrogravimetrische Geoidbestimmung für Ingenieurprojekte, Wien, Juli 1996.

Heft 46 M. PLONER, CCD-Astrometrie von Objekten des geostationären Ringes, Wien, November 1996.

Heft 47 Zum Gedenken an Karl Killian „Ingenieur" und „Geodät" 1903-1991, Veröffentlichung der Fachgruppe Geowissenschaften, Wien, Februar 1997.

Heft 48 A. SINDHUBER, Ergänzung und Fortführung eines digitalen Landschaftsmodelles mit multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungsaufnahmen, Wien, Mai 1998.

Heft 49 W. WAGNER, Soil Moisture Retrieval from ERS Scatterometer Data, Wien, Dezember 1998.

Heft 50 R. WEBER, E. FRAGNER (Editoren), Prof. Bretterbauer, Festschrift zum 70. Geburtstag, Wien, Juli 1999.

Heft 51 Ch. ÖHRENEDER, A Similarity Measure for Global Image Matching Based on the Forward Modeling Principle, Wien, April 1999.

Heft 52 M. LECHTHALER, G. GARTNER (Hrsg.), Per Aspera ad Astra, Festschrift für Fritz Kelnhofer zum 60. Geburtstag, Wien, Jänner 2000.

Heft 53 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER (Hrsg.), Interaktive Karten (Atlanten) und Multimedia-Applikationen, Wien, März 2000.

Heft 54 A. MISCHKE, Entwicklung eines Videotheodolit-Meßsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten, Wien, Dezember 2000.

Heft 55 Veröffentlichung des I.P.F. anläßlich der Emeritierung von Prof. Dr. Peter Waldhäusl, Wien, September 2001.

Heft 56 F. ROTTENSTEINER, Semi-automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS, Wien, Mai 2001.

Heft 57 D. LEGENSTEIN, Objektrekonstruktion aus perspektiven Bildern unter Einbeziehung von Umrisslinien, Wien, Juli 2001.

Heft 58 F. KELNHOFER, M. LECHTHALER und K. BRUNNER (Hrsg.), Telekartographie und Location Based Services, Wien, Jänner 2002.

Heft 59 K. BRETTERBAUER, Die runde Erde eben dargestellt: Abbildungslehre und sphärische Kartennetzentwürfe, Wien, 2002.

Heft 60 F. KELNHOFER und K. BRUNNER (Hrsg.), Maps and the Internet, Wien, 2002

Heft 61 L. DORFFNER, Erzeugung von qualitativ hochwertigen 3D Photomodellen für internetbasierte Anwendungen mit besonderem Augenmerk auf Objekte der Nahbereichsphotogrammetrie, Wien, 2002

Heft 62 K. CHMELINA, Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau, Wien, 2002

Heft 63 A. NIESSNER, Qualitative Deformationsanalyse unter Ausnutzung der Farbinformation, Wien, 2002