

Einfluss von Bildkompressionsverfahren auf die Qualität der digitalen Punktübertragung

Bei der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Inform. Michael Kiefner

aus Aalen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. D. Fritsch
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Ebner

Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart

1. Mai 2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Bildzuordnung und Bildkompression	7
1.2	Problemstellung und Übersicht	9
1.3	Zielsetzung und Übersicht über die Arbeit	9
2	Kompressionsverfahren	11
2.1	Eigenschaften von Kompressionsverfahren	11
2.2	Die Genauigkeit von Kompressionsverfahren	12
3	Mathematische Grundlagen der Bilddatenkompression	15
3.1	Das Verfahren der JPEG-Kompression	15
3.1.1	Die JPEG-Modi	15
3.1.2	Der Baseline-Modus	16
3.1.3	Ein Beispiel der JPEG-Kodierung	16
3.2	Das Verfahren der Wavelet-Kompression	19
3.2.1	Eigenschaften der Wavelet-Transformation	20
3.2.2	Die Multi-Skalen-Analyse	21
3.2.3	Der Algorithmus der Wavelet-Kompression	21
3.3	Das Verfahren der fraktalen Kompression	23
3.3.1	Iterierte Funktionensysteme	23
3.3.2	Lokale iterierte Funktionensysteme	25
3.3.3	Prinzip der fraktalen Kompression	26
4	Ein Modell zur Erfassung des Kompressionseinflusses	29
4.1	Das Kompressionsrauschen	29
4.1.1	Test auf Gauß'sche Normalverteilung	30
4.1.2	Verteilung der Differenzen bei unterschiedlichen Kompressionsstufen	32
4.2	Kompressionsrauschen und seine Auswirkung	34

5 Die Kleinste-Quadrate-Zuordnung (KQZ)	36
5.1 Die digitale Punktübertragung	36
5.2 Die Theorie der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung	37
5.2.1 Die Methode der kleinsten Quadrate	37
5.2.2 Das mathematische Modell der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung	38
5.2.3 Genauigkeitsabschätzung der Verschiebungsparameter	41
5.3 Eigenschaften und Erweiterungen der KQZ	42
5.3.1 Punktübertragung mit Selbstkontrolle	43
5.3.2 Grob-zu-Fein Strategie	44
5.3.3 Strategie der variablen Fenstergrößen	47
5.3.4 Positionsvorhersage	48
5.3.5 Multi-Image-Matching	49
6 Einfluss der Kompression auf künstlich generierte Stereobilder	51
6.1 Die Bilddaten	51
6.1.1 RMK Top - Bilder	51
6.1.2 DPA - Bilddaten	52
6.1.3 MOMS-2P - Bilddaten	52
6.2 Ziele der Untersuchung	53
6.3 Übertragungsbedingungen	54
6.3.1 Simulierte Bildpaare	54
6.3.2 Übertragungsmethoden	56
6.3.3 Untersuchte Kombinationen, Übertragungsbedingungen	56
6.4 Kompressionsfaktoren und Qualitätsbeurteilung	57
6.4.1 Kompressionsfaktoren als Maß für die Vergleichbarkeit verschiedener Kompressionsverfahren	57
6.4.2 Statistische Analyse des Kompressionseinflusses	59
6.4.3 Qualitätsbeurteilung der komprimierten Bilddaten	61
6.5 Übertragungsquoten	63
6.6 Iterationszahl	65
6.7 Einfluss der Kompression auf die Genauigkeit der Punktübertragung	66
6.7.1 Kompressionsverfahren, Kompressionsfaktor	67
6.7.2 Bildqualität und Punktübertragungsgenauigkeit	71
6.8 Fazit	71

7 Einfluss der Kompression auf reale Stereobilder	73
7.1 Die Bilddaten	73
7.1.1 RMK Top - Bilder	73
7.1.2 DPA - Bilddaten	73
7.1.3 MOMS-2P - Bilddaten	73
7.2 Ziele der Untersuchung	74
7.3 Übertragungsbedingungen	74
7.3.1 Sollwerte für die Überprüfung der Ergebnisse	74
7.3.2 Übertragungsmethoden, untersuchte Kombinationen und Bedingungen	75
7.4 Kompressionsfaktoren und Qualitätsbeurteilung	76
7.4.1 Kompressionsfaktoren als Maß für die Vergleichbarkeit der beiden betrachteten Kompressionsverfahren	76
7.4.2 Statistische Analyse des Kompressionseinflusses	77
7.5 Übertragungsquoten	78
7.6 Iterationszahl	80
7.7 Einfluss der Kompression auf die Genauigkeit der Punktübertragung	80
7.7.1 Kompressionsverfahren, Kompressionsfaktor	81
7.7.2 Bildqualität und Punktübertragungsgenauigkeit	85
7.8 Fazit	86
8 Einfluss der Kompression auf die Höhengenaugigkeit	88
8.1 Voraussetzungen zur Bestimmung der Änderung des Höhenfehlers	88
8.1.1 RMK Top	89
8.1.2 DPA	90
8.1.3 MOMS-2P	91
8.2 Änderung der Höhengenaugigkeit	92
9 Zusammenfassung und Ausblick	95
A Allgemeine Verfahren zur Beurteilung der Bildqualität	102
A.1 Das Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)	102
A.2 Die Entropie	103
B Statistische Größen	104
B.1 Der Root-Mean-Square-Error (RMSE)	104
B.2 Die Standardabweichung (σ)	104
C Bildaufzeichnungssysteme	105
C.1 Satellitengestützte, filmbasierte und digitale Kameras	105
C.2 Luftbildkamera	106
C.3 Photogrammetrischer Scanner	107

D Das World Wide Web	108
Abbildungsverzeichnis	113
Tabellenverzeichnis	115
Dank	116
Lebenslauf	117

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Bildzuordnung und Bildkompression

In den letzten Jahren hat sich der Wandel von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie immer mehr vollzogen. Viele namhafte Hersteller bieten heute Hard- und Software für digitale photogrammetrische Arbeitsstationen an. Beim heutigen Stand der Speichertechnik ergibt sich jedoch für alle Hersteller das gleiche Problem: Wie können die riesigen Datenmengen auf den gängigen Speichermedien sinnvoll untergebracht werden? Festplatten bieten zwar schon Speicherplatz im mehrere Gigabyte umfassenden Bereich, jedoch stellen sie immer nur eine begrenzte Kapazität zur Verfügung. Ein Beispiel für eine Luftbildbefliegung zeigt, wie begrenzt der verfügbare Speicherplatz ist: Werden z.B. nur 36 Bilder mit einer Luftbildkamera aufgenommen, wobei in diesem Fall drei Längsstreifen mit jeweils sieben Bildern und drei Querstreifen mit jeweils fünf Bildern aufgenommen wurden, so ergibt sich folgende Berechnung des Speicherplatzbedarfes:

- 36 Bilder im Bildformat 23 cm * 23 cm, panchromatisch
- Scanvorgang des Grauwertbildes mit 15 μm Pixelgröße

$$\Rightarrow (0,23 / 15 * 10^{-6})^2 [\text{m}/(\text{m}/\text{Pixel})]^2 = 15333^2 [\text{Pixel}^2]$$

$$\Rightarrow \text{Speicherplatzbedarf für ein Bild: } 235100889 \text{ Byte oder ca. } 224 \text{ Megabyte}^1$$

$$\Rightarrow \text{bei 36 Bildern benötigt man also } 224 * 36 = 8064 \text{ Megabyte, also } 7,875 \text{ Gigabyte}^1$$

Würde diese Befliegung in Farbe aufgezeichnet und gescannt, wäre die dreifache Menge an Speicherplatz, also ca. 23,625 Gigabyte nötig. Für Scanner der heutigen Generation ist es zudem kein Problem, die Bilddaten in einer noch höheren Auflösung zu scannen. Würde mit doppelter Auflösung gescannt, also mit 7,5 μm Pixelgröße, so würde sich der benötigte Speicherplatz auf 31,5 bzw. auf 94,5 Gigabyte vervierfachen. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass die heutigen Speichermedien somit nur eine begrenzte Auswertung ermöglichen, da bei größeren Befliegungen, in denen bis zu 1000 Bilder aufgezeichnet werden, nicht alle Bilder zur gleichen Zeit auf dem Rechner zugriffsbereit liegen können.

Das Problem der großen Datenmengen stellt sich jedoch nicht nur bei Luftbildbefliegungen mit herkömmlichen, filmbasierten Kameras. Die Entwicklung von digitalen Kameras bereitet dieselben Probleme. Durch immer höher auflösende Sensoren wächst auch hier der Bedarf an Speicherplatz ständig an. Kameras, wie die flugzeuggestützte DPA-Kamera, oder satellitengestützte Systeme wie Ikonos oder IRS-1C und -1D benötigen aufgrund ihrer Aufnahmemöglichkeiten große Ressourcen zur Datenspeicherung. Bei satellitengestützten Systemen kommt erschwerend hinzu, dass sie durch die kontinuierliche Aufzeichnung von Daten fast unendlich viel Speicherplatz benötigen. Eine Übersicht über derzeit zur Verfügung stehende satellitengestützte Kameras ist in [Petrie 2000] gegeben. Darin sind die Auflösungen und somit die bei der Aufzeichnung eines Gebietes anfallenden Datenmengen der einzelnen Kamerasysteme genau beschrieben.

Ein weiteres Beispiel für die kontinuierliche Datenaufzeichnung über einen längeren Zeitraum hinweg ist mit der Kamera MOMS-2P gegeben. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde die MOMS02-Kamera am

¹ Umrechnungsfaktor: 1 Megabyte entspricht 1048576 Byte und nicht 1000000 Byte, entsprechend 1 Gigabyte = 1073741824 Byte \neq 1000000000 Byte

Priroda-Modul der Weltraumstation Mir installiert. Das Modul selbst wurde 1996 an Mir angedockt. Seitdem konnten flächendeckende Bereiche aus verschiedensten Gebieten der Erde mit Hilfe der MOMS02-Kamera aufgezeichnet werden. In [Fritsch 1996] sind der geschichtliche Werdegang des MOMS-Projektes und die aus ersten Bilddaten abgeleiteten Ergebnisse näher erläutert. Neben der kontinuierlichen Datenaufzeichnung der satellitengestützten Systeme bereitet auch die ständige Weiterentwicklung und Verbesserung der Aufnahmequalität und der damit verbundene, wachsende Platzbedarf für die aufgenommenen Daten Probleme. Waren früher Auflösungen von 10 m pro Pixel gängig, sind heute bereits Kameras entwickelt, die mit einer Bodenpixelauflösung von 1 m aufzeichnen können (z.B. Ikonos). Allein diese Verbesserung erzeugt wiederum einen hundertfachen Zuwachs an benötigter Speicherkapazität.

Für einzelne kleinere Organisationen scheint es daher nicht mehr möglich zu sein, die Daten in herkömmlicher Weise auf den verwendeten photogrammetrischen Arbeitsstationen zu halten bzw. zu speichern. Es stellt sich daher die Frage, wie man dieses Problem beseitigen oder wenigstens verringern kann. Eine Möglichkeit besteht sicherlich darin, dass sich spezielle Organisationen nur noch um die Bereitstellung der Daten unter Verwendung von riesigen Speicherkapazitäten kümmern. Ebenso wäre eine landesweite Bilddatenhaltung denkbar. Solche Strukturen müssen sich jedoch erst im Laufe der nächsten Jahre entwickeln.

Die andere Alternative zur Lösung des Speicherplatzproblems besteht in der Verwendung eines Bildkompressionsverfahrens. In der digitalen Bildverarbeitung gibt es verschiedene solcher Verfahren. Beispiele hierfür sind das bekannte JPEG-Verfahren, die Wavelet und die fraktale Kompression. Ebenso bekannt sind komprimierende Bildformate wie GIF oder TIFF (LZW²). Mit all den genannten Verfahren kann der benötigte Speicherbedarf verringert werden. Mit dem Verfahren der Wavelet-Kompression kann ein Bild z.B. mit einem Kompressionsverhältnis von 1:500 gespeichert werden, ohne dass das menschliche Auge grobe Störungen in der Bildinformation entdeckt. Auch mit den anderen gängigen Verfahren können hohe Kompressionsraten bei geringem visuell sichtbarem Verlust an Bildinformation erzeugt werden.

In der digitalen Photogrammetrie werden jedoch sehr hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit im Bildmaterial gestellt. Durch den Kompressionsvorgang wird die Bildinformation verändert. Eine Folge der Veränderung der Bildqualität ist, dass sich die Lage eines Punktes, z.B. einer Grauwertecke, durch den Einfluss der Kompression verfälscht (siehe auch [Hahn & Kiefner 1998]). Es stellt sich daher die Frage, wie sich die Anwendung eines Kompressionsverfahrens auf Messvorgaben in der digitalen Photogrammetrie auswirkt. So können Einflüsse auf die verschiedenen, abhängig vom verwendeten System auch automatisch durchgeführten Orientierungsverfahren nicht ausgeschlossen werden. So kann die Kompression bei der Messung von Rahmenmarken (innere Orientierung), der Parallaxenmessung zwischen Bildern (DHM) und bei der Signalmessung (absolute Orientierung) durch die Veränderung der Bildinformation Fehler verursachen. Ebenso können dadurch Fehler auf die in der Photogrammetrie häufig verwendete digitale Punktübertragung und die daraus abgeleitete Aerotriangulation und digitale Geländemodellerfassung übertragen werden. In [Hahn, Kiefner, Braun & Dörstel 1998] sind die Anforderungen, die an ein digitales System wie PHODIS³ gestellt werden, näher erläutert, wobei speziell auf die durch eine automatische Punktzuordnung zu erfüllenden Kriterien eingegangen wird.

Um die oben erwähnte Genauigkeit zur Messung in den Bildern zu erhalten, werden in der digitalen Photogrammetrie große Anstrengungen bei der Aufbereitung des verwendeten Bildmaterials unternommen. In [Beyer 1992] ist zum einen die Aufbereitung von Bilddaten einer CCD-Kamera näher beschrieben, zum anderen wird darin auch eine verfeinerte Methode zur automatischen Punktübertragung mittels der Methode der kleinsten Quadrate beschrieben. Bei der Aufbereitung der Bilddaten werden z.B. bei der radiometrischen Kalibrierung Look Up Tables bestimmt, die in der Bildnachbereitung dann zur Normalisierung der aufgezeichneten Daten einzusetzen sind. Durch diesen Schritt werden die unterschiedlichen Lichtempfindlichkeiten der einzelnen CCD-Elemente ausgeglichen. Bei der verfeinerten Methode zur automatischen Punktübertragung handelt es sich um ein Verfahren, welches durch eine geeignet gewählte Überwachungsstrategie alternierende Parameter des iterativen Schätzprozesses erkennt, an einen geeigneten Wert bindet und somit die Übertragung zum erfolgreichen Verlauf führt.

In [Baltsavias & Stallman 1992b] und [Baltsavias & Stallman 1992a] sind Untersuchungsergebnisse zur Genauigkeit von aus SPOT-Bilddaten abgeleiteten digitalen Geländemodellen und Orthophotos näher beschrieben. Auch hier wird ein erheblicher Aufwand zur Gewinnung möglichst genauer Ergebnisse betrieben.

Somit stellt sich ganz allgemein die Frage, wie sich die Verwendung von Bildkompressionsverfahren auf die Qualität der Bilder und somit auch der digitalen, automatischen Punktübertragung und die aus ihr abgeleiteten Produkte, wie ein digitales Geländemodell, auswirkt.

² LZW: Lempel-Ziv-Welch, siehe auch [Netravali & Haskell 1994]

³ PHODIS: Digitales photogrammetrisches Bildverarbeitungssystem der Firma Z/I Imaging GmbH

1.2 Problemstellung und Übersicht

In der digitalen Photogrammetrie stellt die automatische Punktübertragung eine der wichtigsten Methoden zur Automatisierung von Messprozessen dar. Mit ihrer Hilfe werden bei der Auswertung von Luftbilddaten korrespondierende Punkte in aufeinanderfolgenden Bildpaaren erfasst. Diese sogenannten homologen Punktpaare (bzw. Punkttupel bei mehrfacher Überdeckung) werden später für nachfolgende Berechnungen herangezogen. Der klassische Fall der Punktübertragung besteht in der Übertragung eines Punktes in das nachfolgende Bild. Bei Luftbildbefliegungen werden Bilder entlang des Flugweges üblicherweise mit einem Überlappungsbereich von ca. 60% aufgenommen. Dadurch enthalten zwei aufeinanderfolgende Bilder identische Geländeausschnitte, welche durch die Erfassung der homologen Punktpaare in den Bildern identifiziert werden. Je nach Art der Befliegung können Mehrfachüberdeckungen vorhanden sein, wodurch eine Übertragung eines Punktes in N Nachbarbilder (und nicht nur in ein benachbartes Bild) nötig wird.

Werden Bilddaten und somit auch die in den Bildern befindlichen, signalisierten Punkte durch ein Kompressionsverfahren verfälscht, wird auch die Messgenauigkeit zur Lagebestimmung dieser Punkte verschlechtert. In [Hahn, Kiefner, Quednau & Hinz 1996] ist der Einfluss der JPEG-Kompression auf die semi-automatische Passpunkt-messung mittels intensitäts- und flächenbasierter Kleinster-Quadrate-Zuordnung näher beschrieben.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Empfindlichkeit des Bildmaterials bzgl. der Punktübertragung stellt die Art der Datengewinnung dar. Mittels Fernerkundung aufgezeichnete Daten wie MOMS-Daten, die aus einer Höhe von ca. 400 km digital aufgezeichnet werden und eine Bodenpixelaufösung von 6 m bzw. 18 m besitzen, eignen sich sehr gut für die automatische Punktübertragung. Bilddaten, die aus dieser Höhe und mit der genannten Auflösung erfasst werden, enthalten kaum die für Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln typischen aber störenden Umklappeffekte.

Im Gegensatz hierzu sind die Umklappeffekte bei Aufnahmen von Luftbildbefliegungen deutlich stärker ausgeprägt. Dies führt dazu, dass Bildpunkte, welche sich z.B. an Haus- bzw. Dachkanten befinden, in einem Bild sichtbar, und im anderen Bild verdeckt sind. Dadurch wird die erfolgreiche Übertragung eines Punktes an dieser Stelle unmöglich. Durch diese Eigenschaft der Luftbilder sinkt die grundsätzlich mögliche Erfolgsquote der automatischen Punktübertragung. Da zur Erzeugung eines digitalen Geländemodells ein möglichst dichter Punkthaufen benötigt wird, kann durch den Einsatz verlustbehafteter Kompression die Erfolgsquote der Punktübertragung derart stark reduziert werden, dass großflächige Bereiche des DGM keine homologen Punktpaare zur Stützung der DGM-Werte enthalten. Dadurch würde die Genauigkeit des abgeleiteten DGMs zusätzlich verschlechtert.

Somit ist zu untersuchen, ob neben dem Einfluss des Kompressionsverfahrens auch die Art der Aufzeichnung des Datenmaterials Einfluss auf die Genauigkeit der Punktübertragung nimmt.

In [Fritsch, Kiefner, Stallmann & Hahn 1998] und [Fritsch, Kiefner & Stallmann 1998] sind Ergebnisse der MOMS-2P Datenprozessierung dargestellt. Dabei handelt es sich um weiterführende Untersuchungen bei der Erfassung digitaler Geländemodelle, welche mit Hilfe der automatischen Punktübertragung erfasst wurden. Anhand dieser Veröffentlichungen wird der Stellenwert der automatischen Punktübertragung nochmals betont und somit auch indirekt der Einfluss verlustbehafteter Kompressionsverfahren auf die Verfahren der digitalen Photogrammetrie.

1.3 Zielsetzung und Übersicht über die Arbeit

Aufgrund der hohen Ansprüche der Photogrammetrie an die Genauigkeit von Bilddaten wirft der Einsatz von verlustbehafteten Bildkompressionsverfahren einige Fragen auf. Wie stark darf man einen Datensatz komprimieren, bis sich die im Bild enthaltene Information und somit die Messgenauigkeit im Bild um einen zu bestimmenden Faktor verschlechtert hat? Wie wirkt sich der Qualitätsverlust der Bilddaten auf die Ergebnisse der automatischen Punktübertragung aus? Können in den Bildern lediglich weniger homologe Punktpaare identifiziert werden oder verschlechtert sich mit zunehmendem Kompressionsfaktor auch die Genauigkeit der ermittelten Punktpositionen?

Aber auch andere Größen nehmen Einfluss auf die komprimierten Bilddaten. Da zahlreiche Kompressionsverfahren existieren, die auf den verschiedensten Methoden beruhen, muss geklärt werden, ob durch eine geeignete Wahl eines bestimmten Kompressionsverfahrens der Kompressionsfaktor deutlich gegenüber anderen Verfahren erhöht werden kann, ohne dass sich die bei der automatischen Punktzuordnung erzielten

Ergebnisse nicht wesentlich verschlechtern. Einen weiteren Punkt stellt die Abhängigkeit der Ergebnisse vom zu Grunde liegenden Datenmaterial dar. Wie ändert sich – oder ändert sich überhaupt – ein ermittelter Grenzwert, wenn dem gleichen Kompressionsverfahren ein anderer Datensatz übergeben wird?

Die beiden zuletzt aufgezeigten Fragen bezüglich der Unabhängigkeit des Messergebnisses von Kompressionsverfahren und Datenmaterial führt zu einer weiteren Fragestellung: Kann ein Modell gefunden werden, welches mit wenig Rechenaufwand zu einem vorhandenen Datensatz, einem vorgewählten Kompressionsverfahren und einer gewünschten Genauigkeit die zugehörige maximal mögliche Kompressionsrate bestimmt, bei der die genannten Bedingungen gerade noch erfüllt sind?

Ziel dieser Arbeit ist es, Antworten auf die herausgearbeiteten Fragestellungen zu finden. Da nicht alle derzeit gängigen Kompressionsverfahren getestet werden können, beschränkt sich diese Arbeit bei der Untersuchung auf drei der bekanntesten Verfahren, der JPEG-, der Wavelet- und der fraktalen Kompression. Dabei basiert die verwendete JPEG-Kompression⁴ auf dem JPEG-6.0 Standard. Sowohl die Kompression als auch die Dekompression der Daten erfolgte dabei auf einem Unix-basierten System. Zur Anwendung der Wavelet-Kompression kam das Produkt LuraWave Command Line Tool (Version 2.0) der Firma LuraTech⁵ zum Einsatz. Auf Basis des Fractal Imager in der Version 1.6 erfolgte die fraktale Kompression. Bei diesem Programm handelt es sich um ein Produkt der Firma Iterated Systems⁶.

Im folgenden Kapitel gibt die Arbeit eine allgemeine Einführung in die Thematik der Bilddatenkompression. Anschließend sind die Grundlagen der hier getesteten Kompressionsverfahren in einem kurzen Überblick dargestellt. Dabei sind die wesentlichen Arbeitsschritte und Eigenschaften der einzelnen Verfahren näher beschrieben.

In Kapitel 4 ist ein Modell zur Erfassung des Kompressionseinflusses beschrieben. Ebenso untersucht sind in diesem Kapitel die Auswirkungen der einzelnen Kompressionsverfahren auf die Bilddaten und speziell die Verteilung der durch die Kompression entstandenen Fehler.

Die verwendete Kleinste-Quadrate-Zuordnung ist im darauffolgenden Kapitel näher beschrieben. Insbesondere sind die zusätzlichen Eigenschaften der hier verwendeten Implementierung weiter vertieft. Kapitel 6 und 7 beschäftigen sich mit den Einflüssen der Bilddatenkompression auf künstlich generierte und echte Stereobildpaare. Dabei legt die Untersuchung besonderen Wert auf den kompressionsbedingten Verlust an Bildinformation sowie die Auswirkung dieser Verluste auf die Ergebnisse der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung. Ebenso sind neben der Genauigkeit der zugeordneten Punktpaare auch die Übertragungsraten und die durchschnittlich zur Übertragung notwendigen Iterationen berücksichtigt. Diese Untersuchungen bilden den Kern der Arbeit.

Der Einfluss der Kompression auf die Höhengenaugkeit ist in Kapitel 8 dargestellt. Im letzten Kapitel findet sich schließlich die Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse sowie ein Vorschlag für ein Kompressionsverfahren, welches die Belange der Photogrammetrie im Bezug auf die Genauigkeit und Platzersparnis abdecken könnte.

⁴ JPEG: Joint Photographic Expert Group, <http://www.jpeg.org>

⁵ LuraTech: <http://www.luratech.de>

⁶ Iterated Systems: <http://www.iterated.com>

Kapitel 2

Kompressionsverfahren

Wie bereits zuvor beschrieben, gewinnen aufgrund des ständigen Zuwachses von digitalen Bilddaten Kompressionsverfahren immer mehr an Bedeutung. Durch die Benutzung eines Kompressionsverfahrens kann je nach Anwendung zum einen der zur Speicherung der Daten benötigte Speicherplatz reduziert werden. Unter Umständen kann sogar erst durch die Anwendung eines Kompressionsverfahrens der zur Verfügung stehende Speicherplatz für ein durchzuführendes Projekt ausreichen. Zum anderen ist z.B. durch ein auf Hardware implementiertes Kompressionsverfahren die Menge der zum Speichermedium zu übertragenden Daten deutlich zu reduzieren.

2.1 Eigenschaften von Kompressionsverfahren

Kompressionsverfahren werden bereits seit vielen Jahren in der digitalen Datenverarbeitung und speziell der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt. Durch die ständige Verbesserung von Kamerasystemen oder Scannern hat sich die anfallende Datenmenge sehr stark vergrößert. Mit Hilfe von herkömmlichen Kompressionsverfahren wie LZW oder RLE¹ ([Salomon 1998]) wird zwar eine gute Kompressionsrate erzielt, jedoch sind oftmals keine höheren Kompressionsraten möglich. Dies liegt unter anderem auch daran, dass es sich bei den herkömmlichen Kompressionsverfahren zumeist um verlustfreie Verfahren handelt. Typische Beispiele hierfür sind auch in [Topiwala 1998] vorgestellt. In der digitalen Bildverarbeitung wurde daher versucht, verschiedene Verfahren zu entwickeln, mit deren Hilfe ein höherer Kompressionsfaktor erreicht werden kann.

Der wesentliche Unterschied zwischen den herkömmlichen und den neueren Kompressionsverfahren besteht in der Qualität des Kompressionsergebnisses. Bei Kompressionsverfahren wie LZW, RLE oder GIF² handelt es sich um verlustfreie Kompressionsverfahren. Mit diesen Verfahren komprimierte Bilder sind nach der Dekompression identisch mit dem nicht komprimierten Bild; d.h. durch die Kompression bleibt der Bildinhalt unverändert. Erst durch die Inkaufnahme von Informationsverlust, wie durch den Verlust an Schärfe in digitalen Bildern, kann eine höhere Kompressionsrate erreicht werden.

Bei den Kompressionsverfahren JPEG, Wavelet und der fraktalen Kompression handelt es sich um **verlust-behaftete** Verfahren. Mit jedem der genannten Verfahren können deutlich höhere Kompressionsraten erzielt werden, als mit den zuvor beschriebenen Verfahren. Mit der JPEG-Kompression sind Kompressionsverhältnisse bis 1:70, mit der fraktalen Kompressions bis 1:200 oder mehr und mit dem Wavelet-Verfahren noch deutlich höhere Verhältnisse bis in den Bereich von 1:1000 hinein zu erzielen. In [Simon & Berndtgen 1996] werden diese drei Verfahren kurz vorgestellt, wobei in aller Kürze zunächst jedes der drei Verfahren in seiner Funktionsweise dargestellt und zum Abschluss das Zeitverhalten, bevorzugte Bilddaten jedes Verfahrens und die erreichbare Kompressionsrate in tabellarischer Form dargestellt sind.

Der Informationsverlust, den jedes der drei genannten Verfahren mit sich bringt, äußert sich in der Betrachtungsqualität des jeweiligen Bildes. Je nach Verfahren äußert sich dies unterschiedlich. Bei Verwendung der JPEG-Kompression stören Grauwertsprünge (bzw. Farb- und Helligkeitsdifferenzen bei Farbbildern), die an den für dieses Verfahren typischen Blockgrenzen auftreten. Je höher dabei der Kompressionsfaktor gewählt wird, desto stärker werden diese Artefakte sichtbar. Bei der fraktalen Kompression verliert das komprimierte

¹ RLE: Run Length Encoding, siehe auch [Netravali & Haskell 1994]

² Graphics Interchange Format, siehe hierzu <http://www.tronche.com/computer-graphics/gif/gif89a.html>

Bild mit zunehmendem Kompressionsfaktor immer mehr an Details, bis schließlich das ursprüngliche Bild nur noch erahnt werden kann. Bei der Wavelet-Kompression verliert das komprimierte Bild zunächst an Schärfe, bis ab einem bestimmten Kompressionsfaktor ebenfalls Details verloren gehen. Allen Verfahren gemeinsam ist somit der stetige Qualitätsverlust eines Bildes bei zunehmender Kompressionsrate.

Durch die Veränderung des Bildinhalts bei Anwendung verlustbehafteter Kompression verändert sich somit auch der Grauwert eines betrachteten Pixels. Dies kann zur Folge haben, dass in der digitalen Bildverarbeitung verwendete Verfahren andere Ergebnisse liefern, wenn man sie auf ein mit Verlust komprimiertes Bild und das unkomprimierte, originäre Bild anwendet. Dieser Sachverhalt wird später in Kapitel 6 und Kapitel 7 noch näher erläutert. In der jüngeren Vergangenheit wurde daher versucht, durch die Verfeinerung der Kompressionsmethoden den Einfluss bzw. den durch die Kompression entstehenden Verlust an Qualität zu mindern. Ein Beispiel hierfür ist in [Maeder 1995] gegeben. Hier wird versucht, durch die Vorhersage benachbarter Pixelgrauwerte die Qualität eines JPEG komprimierten Bildes zu verbessern. Somit könnte unter Anwendung dieses Verfahrens eine höhere Kompression bei gleichem Informationsverlust erzielt werden. Da der erzielte Erfolg den notwendigen Aufwand jedoch nicht oder noch nicht rechtfertigt, haben sich solche Verfahren bislang in der digitalen Bildverarbeitung nicht durchsetzen können.

Einen weiteren, immer wesentlichen Gesichtspunkt stellt die zur Datenkomprimierung und Dekomprimierung benötigte Zeit dar. Auf den Zeitfaktor wird jedoch in der nachfolgenden Untersuchung nicht im Einzelnen eingegangen. Während den ersten Schritten der Untersuchung hat sich gezeigt, dass die beiden Verfahren JPEG und Wavelet über ein ähnliches Zeitverhalten verfügen. Lediglich die fraktale Kompression fällt mit ihrem Zeitbedarf aus dem Rahmen. Aufgrund der Theorie bzw. des Algorithmus der fraktalen Kompression benötigt dieses Verfahren bei der Kodierung entsprechend viel Zeit. Dies äußert sich in einem Vielfachen der Komprimierungszeit gegenüber der beiden anderen Verfahren. Bei der Dekompression besitzt das fraktale Kompressionsverfahren jedoch den geringsten Zeitbedarf. Dieser ist gegenüber den beiden anderen Verfahren deutlich geringer. Somit würde sich dieses Verfahren sehr gut für Daten eignen, die nur einmal komprimiert und dann nur noch häufig gelesen werden müssen. Ein sehr gutes Anwendungsbeispiel hierfür wäre der Einsatz dieser Methode in einem Archiv. Leider haben die nachfolgend durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass sich das fraktale Kompressionsverfahren nicht für den Einsatz in der digitalen Photogrammetrie eignet.

Wie bereits erwähnt sind die Auswirkungen der verlustbehafteten Kompressionsverfahren auf die Messgenauigkeit in den komprimierten Bildern von Interesse. Diese wird anhand der Änderungen des Bildinhalts mit Hilfe eines speziell ausgewählten und später näher erklärten Messverfahrens genau ermittelt.

2.2 Die Genauigkeit von Kompressionsverfahren

Durch die Anwendung von verlustbehafteten Kompressionsverfahren ändert sich der Bildinhalt zwischen dem originären und dem komprimierten Bild. Betrachtet man hierbei bestimmte Pixel, so kann man in vielen Fällen eine Änderung des Grauwerts erkennen. Selbst bei der Betrachtung größerer Gebiete sind Änderungen festzustellen.

Im Gegensatz hierzu gibt es jedoch auch Pixel bzw. Bereiche, die trotz Benutzung der verlustbehafteten Kompression unverändert bleiben. Mit zunehmender Kompressionsrate steigt natürlich die Anzahl der veränderten Pixel bzw. Gebiete an.

Für den Anwender von Kompressionsverfahren stellt sich somit die Frage, ob solche Änderungen Auswirkungen auf Messungen haben, die in einem oder mehreren Bildern durchgeführt werden. Ebenso ist unklar, in wie weit diese Änderungen von bestimmten Faktoren abhängig sind. Spielt etwa das verwendete Kompressionsverfahren eine wesentliche Rolle dahingehend, dass mit einem bestimmten Verfahren deutlich höhere Kompressionsraten erreicht werden können als mit anderen bei gleicher Genauigkeit? Oder sind die erzielten Ergebnisse nur abhängig von den verwendeten Kompressionsverhältnissen? Ein weiteres Kriterium könnte der Bildinhalt an sich sein, bzw. die Aufnahmeart des Bildes (Kamerasensor oder Aufnahmehöhe). Ein weiterer Punkt besteht in der Beurteilung der Auswirkungen der Änderung im komprimierten Bild. Wann kann ein sicheres Urteil dahingehend gefällt werden, dass die bis zu einem bestimmten Kompressionsfaktor aufgetretenen Änderungen keinen Einfluss auf die nachfolgend durchgeführten Verarbeitungsmethoden haben?

Betrachtet man die Werbung von Softwareherstellern von Kompressionsverfahren, so werden oftmals mit der jeweiligen Software komprimierte Bilddaten den originalen Bilddaten visuell gegenübergestellt. Zusätzlich wird meistens ein weiteres, mit einem anderen Kompressionsverfahren komprimiertes Bild mit ähnlicher Kompressionsrate und schlechterer Bildqualität gegenübergestellt. Betrachtet man z.B. die nachfolgenden Abbildungen,

so kann diese Argumentation leicht nachvollzogen werden. Abbildung 2.1 zeigt, das in der Bildverarbeitung häufig verwendete Bild "Lena" im nicht komprimierten, originalen Zustand mit einer Auflösung von $512 * 512$ Pixeln. Daneben sieht man in Abbildung 2.2 dasselbe mit dem Wavelet-Verfahren komprimierte Bild. Das verwendete Kompressionsverhältnis beträgt hierbei, genau wie bei Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4, 1:43. Man erkennt bereits auf den ersten Blick Unterschiede zwischen dem mit dem Wavelet-Verfahren komprimierten und dem Originalbild. Vergleicht man Abbildung 2.3 mit den Abbildungen 2.2 und 2.4, so stellt man fest, dass das JPEG-Verfahren bei dieser für JPEG relativ hohen Kompressionsrate deutlich mehr Fehler produziert, als die beiden anderen, neueren Verfahren.



Abbildung 2.1: Lena, nicht komprimiert, 512×512 Pixel



Abbildung 2.2: Wavelet komprimiertes Bild, Kompressionsfaktor 1:43



Abbildung 2.3: JPEG komprimiertes Bild, Kompressionsfaktor 1:43



Abbildung 2.4: Fraktal komprimiertes Bild Kompressionsfaktor 1:43

Im Bezug auf die Verwendung digitaler Bilder in der Photogrammetrie sind jedoch Fehler mit einer solchen Intensität nicht tragbar. Betrachtet man etwa die entwickelten automatischen Punktübertragungsmethoden, die im Laufe der letzten 10–15 Jahre entwickelt wurden, so stellt man folgendes fest: Durch die Verfeinerung der

Übertragungsmethoden wurden die aus den homologen Punktetupeln abgeleiteten digitalen Höhenmodelle in ihrer Qualität gesteigert ([Piechel 1991], [Gülch 1994]). Dabei wurden die Genauigkeiten der Punktübertragung im Subpixelbereich betrachtet. So konnte z.B. durch die Verwendung der flächenbasierten Kleinsten-Quadrate-Zuordnung ([Grün 1996]) der zu erwartende Fehler bei der Punktübertragung gegenüber der zuvor verwendeten, merkmalsbasierten Methode von ungefähr 0,3 – 0,4 bis auf 0,1 Pixel gesteigert werden. Eine Untersuchung hierzu wurde in [Fritsch, Kiefner & Schneider 1997] veröffentlicht. Durch den Einsatz der flächen- und intensitätsbasierten Kleinsten-Quadrate-Zuordnung (KQZ) konnte die Genauigkeit des aus MOMS-Daten abgeleiteten digitalen Oberflächenmodells gegenüber dem merkmalsbasierten Ansatz wesentlich gesteigert werden.

Es stellt sich somit die Frage, ob durch den Einsatz von verlustbehafteter Kompression mühsam erarbeitete Genauigkeit wieder verloren geht.

Daher wurden in der jüngeren Vergangenheit erste Versuche durchgeführt, die die Qualität der Bilder nicht mittels den üblichen Methoden, sondern unter dem photogrammetrischen Aspekt der automatischen Punktübertragung betrachten. In [Zeng & Ze-Xun 1996] wurde ein erster Versuch unternommen, den Einfluss der Bilddatenkompression auf die Punktübertragung zu untersuchen. Dabei wurden zur Qualitätsbeurteilung der Bilder, wie i.A. üblich, das PSNR (Point Signal to Noise Ratio) und der RMSE (Root Mean Square Error) verwendet. Im Anhang A ist die Berechnung des PSNR kurz beschrieben.

Um die Qualität der komprimierten Bilder unter dem photogrammetrischen Gesichtspunkt beurteilen zu können, muss auf den komprimierten Bilddaten die Punktübertragung durchgeführt werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Punktübertragung verschiedener Kompressionsstufen mit den Ergebnissen der Punktübertragung der originalen Bilder verglichen. Die dann auftretenden Fehler geben schließlich Auskunft über die Qualität des Kompressionsverfahrens. Ähnliche Untersuchungen wurden in [Heipke 1995] und [Schiewe 1997] durchgeführt. In [Heipke 1995] wurde hierbei jedoch nur das JPEG-Verfahren untersucht. Ebenso findet man hier keinerlei Angaben über die verwendeten Punktemengen, die zur Beurteilung herangezogen wurden. In [Schiewe 1997] und [Schiewe 1998] wurde zwar auch das Wavelet-Verfahren untersucht, jedoch war auch hier die Anzahl der verwendeten Punkte relativ gering. In [Reeves & Hahn 1997] ist ebenfalls eine Untersuchung der Genauigkeit mittels der intensitäts- und flächenbasierten KQZ beschrieben, bei der jedoch ebenfalls nur die JPEG-Methode näher untersucht wird. Eine Untersuchung mit JPEG komprimierten Farbbildern ist in [Lammi & Sarjakoski 1992] dargestellt. Innerhalb dieser Untersuchung kommen die beiden Autoren zu dem Schluss, dass bei einem Kompressionsverhältnis von bis zu 1:10 die Punktgenauigkeit nicht verändert wird. In [Hahn et al. 1996] wird eine Untersuchung präsentiert, die die Änderung der Genauigkeit der Punktübertragung bei signalisierten, und somit für die automatischen Verfahren leichter zu identifizierenden Punkten zeigt. Auch hier kam lediglich das JPEG-Verfahren zum Einsatz.

Des weiteren sollte auch näher geklärt und belegt werden, bis zu welcher Kompressionsrate ein in der Genauigkeit akzeptierbares Ergebnis zu erwarten ist. In [Jaakkola & Orava 1994] etwa werden Kompressionsraten von bis zu 1:10 als akzeptabel erklärt. In [Novak & Shahin 1996] wird gar eine Kompressionsrate von 1:12,5 als zulässige Höchstmarke propagiert.

Kapitel 3

Mathematische Grundlagen der Bilddatenkompression

Im folgenden werden die drei bei der Untersuchung verwendeten Kompressionsverfahren vorgestellt. In [Salomon 1998] sind diese kurz beschrieben. Das Buch bietet jedoch noch eine Vielfalt an Beschreibungen anderer gängiger Kompressionsverfahren und kann daher als Lektüre für jeden, der sich mit Kompressionsverfahren beschäftigen will, empfohlen werden. In [Held 1996] sind ebenfalls viele derzeit gängige Kompressionsverfahren dargestellt, wobei für einige der Verfahren auch eine Demo-Software mitgeliefert ist. [Kou 1995] beschreibt den JPEG- und MPEG-Standard näher.

3.1 Das Verfahren der JPEG-Kompression

Zu Beginn der achtziger Jahre beschäftigte sich eine erste Gruppe mit der Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Kompression digitaler Bilder. 1986 wurden erste Vorschläge zur Definition dieses Standards unterbreitet und festgelegt. Der Name dieses Standards, JPEG entstand aus seiner Entstehungsgeschichte. JPEG ist hierbei ein Akronym für "Joint Photographic Experts Group". Zu dieser Gruppe gehörten im wesentlichen drei Hauptorganisationen, die an der Entwicklung dieses Standards hauptsächlich beteiligt waren; die "International Organization for Standardization (ISO)", die "International Telegraph and Telephone Consultative Committee (CCITT)" und die "International Electrotechnical Commission (IEC)" ([Pennebaker & Mitchell 1993]).

Mittlerweile ist das JPEG-Kompressionsverfahren Standard in der Bildverarbeitung. Viele Programme und Kamerasysteme arbeiten mittlerweile mit diesem Verfahren. Eine weitere Verwendung findet das JPEG-Verfahren in modifizierter Form im MPEG-Verfahren, welches zur Speicherung bewegter Bilder benutzt wird. MPEG steht hierbei für "Motion Picture Experts Group" ([Netravali & Haskell 1994]).

3.1.1 Die JPEG-Modi

Wie bereits erwähnt, wurde das JPEG-Verfahren standardisiert und besteht im wesentlichen aus drei Hauptkomponenten,

- dem Baseline-Algorithmus
- einem Satz von erweiterbaren Eigenschaften und
- der verlustfreien Kompression

Der Baseline-Algorithmus wurde 1989 definiert und in den JPEG-Standard aufgenommen. Er stellt einen einfachen und effizienten Algorithmus zur Bildkodierung zur Verfügung und stellt den Kern der JPEG-Kompression dar. Die erweiternden Eigenschaften dienen dazu die Einsatzmöglichkeit des JPEG-Verfahrens auf einen größeren Bereich auszudehnen. Hierzu zählen u.a. der 12 Bit/Pixel Input, die progressive, sequentielle und hierarchische Methode, sowie eine arithmetische Kodierung. Als zusätzliches Feature bietet der JPEG-Standard noch ein Verfahren zur verlustfreien Kompression, wobei die dabei erzielbaren Kompressionsraten nicht an die des Baseline-Modus heranreichen. Im folgenden wird daher der Baseline-Modus näher erklärt.

3.1.2 Der Baseline-Modus

Der Baseline-Modus besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Schritten, die nachfolgend im Einzelnen dargestellt sind:

1. Der erste Schritt besteht in der Aufteilung des gesamten Bildes in 8*8 Pixelblöcke. Jeder Block wird anschließend unabhängig mit der Discreten Kosinus Transformation (DCT) bearbeitet bzw. transformiert. Dieser Arbeitsschritt resultiert aus der Eigenschaft der DCT. Diese kann zwar eine in einem Bildblock enthaltene Frequenz ermitteln, jedoch nicht die Position dieser Frequenz im Bild genau bestimmen. Durch die Aufteilung in die einzelnen Bildblöcke wird dieser Nachteil, den die fehlende Lokalisierungseigenschaft verursacht, aufgehoben. Gleichzeitig bringt dieses Verfahren jedoch zwei Nachteile mit sich:
 - Zum einen treten bei entsprechend hohen Kompressionsraten harte Grauwertübergänge an den Blockgrenzen auf, die bei der Betrachtung des Bildes stören,
 - zum anderen bringt die Aufteilung einen Schärfeverlust mit sich.
2. Im nächsten Schritt erfolgt die Quantisierung aller aus der DCT erhaltenen Koeffizienten mit Hilfe einer Quantisierungsmatrix. Als Headerinformation können in einem komprimierten Bild bis zu vier verschiedene Quantisierungsmatrizen abgespeichert werden (z.B. um verschiedene Kanäle bzw. Komponenten eines Farbbildes mit verschiedenen Quantisierungsmatrizen zu bearbeiten). Nach Durchführung der Quantisierung werden die einzelnen Koeffizienten auf den nächsten ganzzahligen Wert gerundet. Nach der Durchführung der DCT werden die Koeffizienten in zwei Typen unterschieden. Dieses sind der DC-Koeffizient und die AC-Koeffizienten.
 - Der DC-Koeffizient steht an der oberen linken Ecke des DCT-Koeffizientenfeldes und repräsentiert den mittleren Grauwert bzw. die mittlere Helligkeit des untersuchten Bildblockes. Bei der Kodierung wird die Differenz zwischen dem gerade und dem zuvor bearbeiteten DC-Koeffizienten gebildet, kodiert und gespeichert.
 - Die restlichen Koeffizienten (AC) der DCT-Matrix sind durch die Quantisierung teilweise auf Null gesetzt worden. Dies gilt speziell für die hochfrequenten Anteile des Bildpatches. Durch eine Neusortierung der Koeffizienten, dem sogenannten Zick-Zack-Scanning, wird das 2-dimensionale Feld in einem 1-dimensionalen Vektor gespeichert. Durch diese Neusortierung werden die Koeffizienten mit abnehmender durchschnittlicher Energie gespeichert. Dadurch werden somit die meisten Koeffizienten mit Wert Null ans Ende des Vektors sortiert.
3. Zum Abschluss werden die erhaltenen AC-Koeffizienten kodiert, wobei als Verfahren eine Kombination aus Huffman-Kodierung und Run-Length-Encoding (RLE) zum Einsatz kommt. Das RLE wird verwendet, um die Anzahl an Koeffizienten mit Wert 0 zwischen zwei Koeffizienten mit einem Wert $\neq 0$ zu speichern. Als spezielles Zeichen wird nach dem letzten Koeffizienten $\neq 0$ das EOB-Zeichen verwendet, mit dem angezeigt wird, dass alle noch nachfolgenden, restlichen Koeffizienten des 1-dimensionalen Vektors den Wert 0 enthalten.

3.1.3 Ein Beispiel der JPEG-Kodierung

In [Rabbani & Jones 1991] findet sich das hier dargestellte Beispiel, mit dem die einzelnen Schritte des Baseline-Algorithmus leicht nachvollzogen werden können. Wie in der oben dargestellten Weise erfolgt die Kodierung eines Bildblockes. Im Beispiel wurde folgende DCT-Gleichung zur Berechnung verwendet:

$$F(u, v) = \frac{C(u) C(v)}{4} \sum_{j=0}^7 \sum_{k=0}^7 f(j, k) \cos \left[\frac{(2j+1)u\pi}{16} \right] \cos \left[\frac{(2k+1)v\pi}{16} \right]$$

mit

$$C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{für } x = 0 \\ 1 & \text{für } x = 1, 2, \dots, 7 \end{cases}$$

Zick-Zack-Scanning

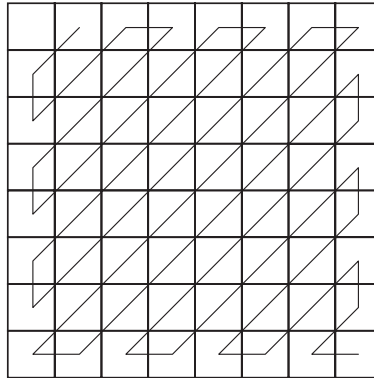


Abbildung 3.1: Darstellung der Sortierreihenfolge der DCT-Koeffizienten

Nun erfolgt die Umsortierung durch Zick-Zack-Scanning. Abbildung 3.1 zeigt die Sortierreihenfolge der Koeffizienten. Für $F^*(u, v)$ erhält man somit

$$\left(79 \ 0 \ -2 \ -1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 0 \ -1 \ \text{EOB} \right)$$

als zu kodierenden 1-dimensionalen Vektor. Abschließend wird mittels Huffman-Kodierung und RLE der eigentliche zu speichernde Code berechnet. Die genaue Beschreibung mit allen notwendigen Tabellen ist in [Rabbani & Jones 1991] zu finden. Durch die Invertierung des Kodiervorgangs kann das Bild wiederhergestellt werden. Dabei erfolgt die Berechnung des zu dekomprimierenden Bildes $\hat{F}(u, v)$ durch

$$\hat{F}(u, v) = F^*(u, v) Q(u, v)$$

Dies entspricht der Rückrechnung der zuvor durchgeführten Quantisierung.

$$\hat{F}(u, v) = \begin{bmatrix} 1264 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -24 & -12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -14 & -13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Mit Hilfe der inversen DCT kann schließlich das Bild endgültig wiederhergestellt werden:

$$\hat{f}(j, k) = \sum_{v=0}^7 \sum_{u=0}^7 \frac{C(u) C(v)}{4} \hat{F}(u, v) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{16}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{16}\right]$$

und

$$C(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{für } x=0 \\ 1 & \text{für } x=1, 2, \dots, 7 \end{cases}$$

$$\hat{f}(j, k) = \begin{bmatrix} 144 & 146 & 149 & 152 & 154 & 156 & 156 & 156 \\ 148 & 150 & 152 & 154 & 156 & 156 & 156 & 156 \\ 155 & 156 & 157 & 158 & 158 & 157 & 156 & 155 \\ 160 & 161 & 161 & 162 & 161 & 159 & 157 & 155 \\ 163 & 163 & 164 & 163 & 162 & 160 & 158 & 156 \\ 163 & 163 & 164 & 164 & 162 & 160 & 158 & 157 \\ 160 & 161 & 162 & 162 & 162 & 161 & 159 & 158 \\ 158 & 159 & 161 & 161 & 162 & 161 & 159 & 158 \end{bmatrix}$$

Um die Genauigkeit des aus der Kompression erhaltenen Bildes zu erhalten, bildet man die Differenz zwischen dem originalen Bild $f(j, k)$ und dem komprimierten und wiederhergestellten Bild $\hat{f}(j, k)$ und erhält für das hier gezeigte Beispiel folgende Fehlermatrix:

$$e(j, k) = \begin{bmatrix} -5 & -2 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ -4 & 1 & 1 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & -1 & 3 & 5 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & -2 & -1 & 0 & 2 & 4 \\ -4 & -3 & -3 & -1 & 0 & -5 & -3 & -1 \\ -2 & -2 & -3 & -3 & -2 & -3 & -1 & 0 \\ 2 & 1 & -1 & 1 & 0 & -4 & -2 & -1 \\ 4 & 3 & 0 & 0 & 1 & -3 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Der mittlere quadratische Fehler (RMSE) berechnet sich somit zu

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{64} \sum_{j=0}^7 \sum_{k=0}^7 e^2(j, k)} = 2,26$$

Ein ähnliches Beispiel kann auch in [Küsters 1995] gefunden werden. Der Autor des Buches beschreibt anschaulich das Verfahren der JPEG-Kompression. Dem Buch ist eine CD mit Testbildern und Testsoftware beigelegt. Ebenso enthalten sind Programme zur MPEG-Kodierung und Abspielung.

3.2 Das Verfahren der Wavelet-Kompression

Bei dem Verfahren der Wavelet-Kompression handelt es sich ähnlich wie bei der JPEG-Kompression um ein Verfahren, welches auf der Analyse der in den digitalen Bildern vorhandenen Frequenzen beruht. Durch eine geeignete Wahl von Filtern kann das zu komprimierende Bild in seine höher- und niederfrequenteren Bestandteile zerlegt werden. Durch eine anschließend in geeigneter Weise durchgeführte Quantisierung und Kodierung der resultierenden Parameter wird die Kompression erreicht. Die Filterung erfolgt dabei mit Hilfe der sogenannten Multi-Skalen-Analyse. Dabei werden die Filter mehrmals auf das zu komprimierende Bild angewendet. Die genaue Beschreibung des Verfahrens erfolgt auf den nachfolgenden Seiten.

Der Ursprung der Wavelet-Kompression findet sich in der Signaltheorie. Mitte der sechziger Jahre hatte Calderón die kontinuierliche Wavelet-Transformation in einer mathematischen Veröffentlichung ([Calderón 1964]) vorgestellt. Die Wavelet-Kompression basiert auf der diskreten Wavelet-Transformation. Diese ist abgeleitet von der kontinuierlichen Wavelet-Transformation. Eine mathematische Beschreibung der Transformation und ihrer Eigenschaften ist in [Louis, Maaß & Rieder 1994] vorhanden. Eine weitere Darstellung der Theorie der Wavelets findet sich in [Erlebacher, Hussaini & Jameson 1996]. Zum einfachen Verständnis der Waveletkompression kann [Salomon 1998] empfohlen werden. Ein Beispiel für die Implementation der Wavelet-Transformation ist in [Press, Teukolsky, Vetterling & Flannery 1992] dargestellt. Anhand eines Daubechies-Wavelets ist die Implementierung in einfacher Weise übersichtlich dargestellt, wodurch die einzelnen, notwendigen Schritte der Verarbeitung sehr gut nachvollzogen werden können.

Die diskrete Wavelet-Transformation wird in der digitalen Bildverarbeitung hauptsächlich zur Bilddatenkompression eingesetzt. Ein weiteres Beispiel, wie die diskrete Wavelet-Transformation in der digitalen Bildverarbeitung

verwendet werden kann, ist in [JIANG 1997] gegeben. Hier wird die in Wavelets implizit enthaltene Bildpyramide für die Punktübertragung verwendet. In [Starck, Murtagh & Bijaoui 1998] ist ebenfalls die Berechnung von Bildpyramiden mit Hilfe von Wavelets beschrieben. Des Weiteren werden in [Starck et al. 1998] weiterführende Methoden der Bildverarbeitung, wie z.B. Objekterkennung unter Anwendung der Wavelet-Transformation näher beschrieben. Die Wavelet-Transformation kann aufgrund ihrer Eigenschaft auch zur Rauschunterdrückung bzw. zum Entfernen eines im Bild enthaltenen Rauschens benutzt werden. In [Yanjun & Schaffrin 1999] wird beschrieben, wie Wavelets zur Rauschunterdrückung in Bildern verwendet werden können.

Im folgenden wird die Funktionsweise der Wavelet-Transformation näher beschrieben.

3.2.1 Eigenschaften der Wavelet-Transformation

In [Goupillaud, Grossmann & Morlet 1984/85] wurde zum ersten Mal eine diskrete Variation der Wavelet-Transformation vorgestellt. Durch die Diskretisierung der Wavelet-Transformation konnte diese nun in den verschiedensten Gebieten zum Einsatz kommen. Die wesentlichen Nachteile der Fourier-Transformation liegen in der

- unzureichenden Auflösung der lokalen Eigenschaft eines Signals
- Zerlegung in trigonometrische Funktionen mit unendlicher Ausdehnung \Rightarrow kein lokaler Charakter
- getrennten Darstellung und Beschreibung von Zeit und Frequenz

Das Wavelet bietet den wesentlichen Vorteil, dass durch die nahezu beliebige Auswahl einer Waveletfunktion ein hohes Maß an Flexibilität erreicht wird. Die gewählte Funktion kann dann zusätzlich noch verschoben und gestaucht werden. In der Literatur finden sich verschiedene Abkürzungen und Symbole für die Definition der Wavelet-Transformation. Die hier kurz dargestellte Theorie lehnt sich an [Louis et al. 1994]. Die kontinuierliche Wavelet-Transformation ist folgendermaßen definiert:

$$L_{\psi}f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{c_{\psi}}} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

Mit dieser Definition können folgende Aussagen getroffen werden:

- Hat f eine starke Änderung in der Umgebung $U(b)$ des Zeitpunkts (Ortes) b , so hat f dort ein hochfrequentes Spektrum.
- Je kleiner a gewählt wird, desto mehr repräsentiert die Schar

$$\{\psi((\cdot - b)/a) \mid a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}\}$$

und somit die zugehörigen Werte der Wavelet-Transformation die hochfrequenten Anteile von f in der Umgebung $U(b)$.

- c_{ψ} und $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$ werden benötigt, um eine Isometrie zwischen L^2 -Räumen zu schaffen, wodurch die direkte Inversionsformel aus der Transformation abgeleitet werden kann. Diese lautet dann:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{c_{\psi}}} \int_{\mathbb{R}} \int_{\mathbb{R}} L_{\psi}f(a, b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da db}{a^2}$$

Mit Hilfe der so definierten Wavelet-Transformation kann zunächst eine Analyse des Eingangssignals durchgeführt und anschließend mit der inversen Funktion das Signal wieder synthetisiert werden. Durch die diskrete Variante der Wavelet-Transformation kann die Idee der Wavelet-Transformation mittlerweile auf verschiedensten Gebieten zum Einsatz kommen.

3.2.2 Die Multi-Skalen-Analyse

Erst durch die Entwicklung der Multi-Skalen-Analyse (MSA) und somit eines schnellen Analyseverfahrens, konnten die Vorteile der Wavelet-Transformation gegenüber der schnellen Fourier-Transformation zum Tragen kommen. Im folgenden wird das Prinzip der MSA kurz am eindimensionalen Fall vorgestellt. Bei der MSA wird das zu untersuchende Signal f , welches einen Unterraum V_{-1} des $L^2(\mathbb{R})$ repräsentiert, in seine hochfrequenten und niederfrequenten Anteile aufgespalten. Dabei repräsentiert der Raum V_0 die niederfrequenten Anteile des untersuchten Signals und W_0 die hochfrequenten. Mit Hilfe der orthogonalen Projektionen P_0f und Q_0f werden die Räume V_0 und W_0 bestimmt. Somit gilt

$$\begin{aligned} V_0 &= P_0f \\ W_0 &= Q_0f \\ V_{-1} &= V_0 \oplus W_0 \end{aligned}$$

und für das Signal f :

$$f = P_0f + Q_0f$$

Im nächsten Schritt wird der Raum V_0 , welcher die glatten Elemente der zuvor aufgespaltenen Funktion enthält, ebenfalls in seine rauhen, hochfrequenten und glatten, niederfrequenten Bereiche zerlegt. Die dabei verwendeten Projektoren lauten P_1 und Q_1 . Somit ergibt sich $P_0f = P_1f + Q_1f$ und somit das analysierte Signal aus:

$$f = P_1f + Q_1f + Q_0f$$

Durch rekursive Fortsetzung kann das Signal nun in weitere hoch- und niederfrequente Anteile zerlegt werden, wobei jeweils die niederfrequenten Anteile im nächsten Schritt weiter untersucht werden.

Die Multi-Skalen-Analyse ist somit eine aufsteigende Reihenfolge von abgeschlossenen Unterräumen $V_m \subset L^2(\mathbb{R})$. Diese Unterräume repräsentieren bestimmte Anteile von f zu bestimmten Frequenzbändern. Aufgrund der Struktur der Analyse enthält somit der Raum Q_0f eine höhere Frequenz als der Raum Q_1f . Somit entspricht der Zerlegungsprozess der MSA der Zerlegung des Originalsignals in Frequenzbänder hoher Frequenzen und ein Frequenzgemisch niedriger Frequenzen. Für die dabei entstehenden Unterräume gilt schließlich:

$$\{0\} \subset \dots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset \dots \subset L^2(\mathbb{R})$$

wobei zusätzlich gilt

$$\overline{\bigcup_{m \in \mathbb{Z}} V_m} = L^2(\mathbb{R})$$

und

$$\bigcap_{m \in \mathbb{Z}} V_m = \{0\}$$

3.2.3 Der Algorithmus der Wavelet-Kompression

Seit Einführung der diskreten Wavelet-Transformation findet diese ihre Anwendung in vielen Bereichen. So kann sie u.a. zur Analyse eines EKG (Untersuchung der Herzrhythmus) eingesetzt werden. Eine weitere Anwendung findet sich z.B. in der Qualitätsbeurteilung von Geweben ([Louis et al. 1994]). Die digitale Bildverarbeitung benutzt die Wavelet-Transformation neben der Kompression auch zur Berechnung bzw. Repräsentation von Bildpyramiden oder zur Kantenerkennung.

Die Wavelet-Kompression besteht im wesentlichen aus drei Schritten:

1. Der erste Schritt der Kompression wendet die Wavelet-Transformation auf das zu analysierende bzw. zu komprimierende Bild an. Nach Durchführung der Transformation sind die Wavelet-Koeffizienten berechnet. Die Berechnung dieser Koeffizienten entspricht einem Basiswechsel. Dadurch wird das untersuchte Bild nicht mehr durch die Grauwerte der einzelnen Pixel repräsentiert, sondern durch die berechneten Koeffizienten.

2. Im zweiten Schritt wird nun eine Quantisierung der berechneten Koeffizienten durchgeführt. Dabei werden die reellwertigen Koeffizienten auf ganzzahlige Werte abgebildet. Die beabsichtigte Kompression wird dabei auf zwei Wegen erreicht. Zum einen werden betragsmäßig kleine Koeffizienten auf den Wert Null gesetzt, zum anderen benötigen ganze Zahlen deutlich weniger Speicherplatz.
3. Der letzte Schritt der Kompression besteht in der geeigneten Kodierung der so erzeugten Koeffizienten. Bei der Wavelet-Kompression kommt hier i.a. die Huffman-Kodierung zum Einsatz. Oftmals ist diese noch kombiniert mit einem RLE-Algorithmus (Run Length Encoding [Köhn 1996] und [Salomon 1998]). Die Huffman-Kodierung ist ein Kodierverfahren, welches mit variablen Wortlängen arbeitet. Bei der Kodierung werden häufig auftretende Werte mit weniger Bits kodiert als seltener auftretende Werte. Dadurch kann eine mittlere Wortlänge erzielt werden, die nahe an die minimal benötigte Wortlänge (siehe A.2) heranreicht.

Anhand des Algorithmus kann man nun auch erkennen, warum es sich bei der Wavelet-Transformation um ein verlustbehaftetes Verfahren handelt. Die Quantisierung der Koeffizienten ist nicht umkehrbar, wodurch zwangsläufig Information verloren geht, die bei der Dekomprimierung nicht mehr zur Verfügung steht. Wie

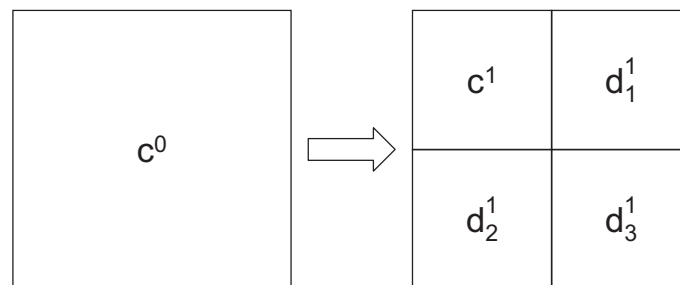


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des ersten Zerlegungsschrittes bei der Wavelet-Transformation (aus [Louis et al. 1994]).

bereits erwähnt, handelt es sich bei der schnellen Wavelet-Transformation um eine Multi-Skalen-Analyse. Aufgrund des hierarchischen Charakters der Transformation kann auf eine Aufteilung des gesamten Bildes in mehrere zu betrachtende Bildblöcke verzichtet werden, wie dies z.B. bei der diskreten Kosinus-Transformation notwendig ist (siehe 3.1). Die Transformation wird daher auf das gesamte Bild angewendet. Dabei kommen eindimensionale Wavelets zum Einsatz, die abwechselnd auf die Zeilen und Spalten des Bildes angewendet werden.

Abbildung 3.2 zeigt schematisch den ersten Zerlegungsschritt des zu komprimierenden Bildes. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Berechnung der Teilbilder durch Operatoren, die jeweils nur auf die Zeilen bzw. Spalten angewendet werden. Mit den Glättungsoperatoren H_Z für die Zeilen und H_S für die Spalten, sowie G_Z und G_S für die hochfrequenten Anteile in Zeilen- bzw. Spaltenrichtung ergeben sich die folgenden aus der Transformation berechneten Teilbilder aus dem Originalbild c^0 :

$$\begin{array}{ll}
 c^1 = H_S H_Z c^0 & : \quad \text{Geglättete Version des Originalbildes} \\
 d_1^1 = H_Z G_S c^0 & : \quad \text{Senkrechte Kanten des Originalbildes} \\
 d_2^1 = G_Z H_S c^0 & : \quad \text{Waagrechte Kanten des Originalbildes} \\
 d_3^1 = G_Z G_S c^0 & : \quad \text{Diagonale Kanten des Originalbildes}
 \end{array}$$

Durch erneute Anwendung derselben Filterfunktionen auf c^1 ergeben sich erneut vier weitere Teilbilder. Mit jeder durchgeführten Stufe der Reduktion viertelt sich die Anzahl der noch verbleibenden Pixel. Abbildung 3.3 zeigt das Ausgangsbild nach 3 Rekursionsschritten. Der Algorithmus kann solange angewandt werden, bis schließlich nach m Wiederholungen nur noch ein einziger Pixel im Bild c^m vorhanden ist. Dieser repräsentiert dann den mittleren Grauwert des Bildes. Im allgemeinen wird der Algorithmus jedoch schon vorher beendet, da bei der Wiederherstellung des Bildes dann eine bessere Qualität erreicht wird.

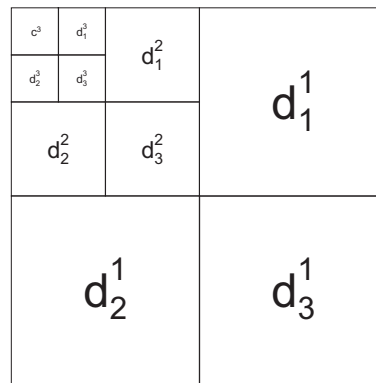


Abbildung 3.3: Darstellung der ersten drei Zerlegungsschritte bei der Wavelet-Transformation (aus [Louis et al. 1994]).

3.3 Das Verfahren der fraktalen Kompression

Dr. Michael F. Barnsley hatte gemeinsam mit Dr. Alan Sloan Mitte der achtziger Jahre die Idee, dass auf iterierten Funktionensystemen basierend ein Kompressionsverfahren für Bilddaten entwickelt werden kann. Das abgeleitete Verfahren benutzt dann die in Bildern enthaltene Selbstähnlichkeit.

Iterierte Funktionensysteme werden z.B. zur Berechnung des allgemein bekannten Sierpinski-Dreiecks benutzt. Durch die wiederholte Anwendung der im Funktionensystem enthaltenen Abbildungen entsteht das Bild; d.h. ein Bild wird iterativ ausgehend von einem beliebigen Startwert erzeugt. Schon nach wenigen Iterationen ist im allgemeinen das Bild berechnet. Die für die Berechnung des Sierpinski-Dreiecks benötigten Abbildungen lassen sich leicht definieren.

Für das Verfahren der fraktalen Kompression stellte sich somit die Frage nach der Lösung des inversen Problems. Wie kann man eine oder mehrere Funktionen finden, die einen ähnlichen Bildbereich repräsentieren, mit dessen Hilfe man ein Bild wieder erzeugen könnte. 1989 fand Arnaud Jaquin eine mögliche Lösung für dieses Problem. Er schlug vor, nicht nach einem oder mehreren Bereichen zu suchen, die das gesamte Bild repräsentieren, sondern nur nach Bereichen, die Teilbereiche des darzustellenden Bildes repräsentieren. Dies bedeutete den Durchbruch in der fraktalen Kompression. Das inverse Problem, das Auffinden geeigneter Abbildungsfunktionen, wurde dadurch gelöst, dass ein Bild in gleichgroße Teilbereiche, sogenannte Range-Blöcke zerlegt wird, und anschließend für jeden Range-Block nach einem Domain-Block gesucht wird, der durch eine geeignet gewählte Transformation den Range-Block bestmöglich repräsentiert. Die somit entstehende Menge an Abbildungsfunktionen repräsentiert dann schließlich das zu komprimierende Bild.

Im folgenden wird das Verfahren und die zugrunde liegenden lokalen iterierten Funktionensysteme kurz erklärt. Weiterführende Erklärungen können in [Barnsley & Hurd 1993b] bzw. [Barnsley & Hurd 1993a], [Rauhut & Riegel 1997] und [Saupe & Hartenstein 1996] gefunden werden. Für die durchgeführten und in den vorigen Kapiteln vorgestellten Untersuchungen wurde der Fractal Imager in der Version 1.6 von Iterated Systems Incorporation verwendet. Diese Firma wurde von Barnsley gegründet und vertreibt u.a. auch dieses Tool zur fraktalen Kompression. Vergleiche, über die in [Rauhut & Riegel 1997] berichtet wird, haben gezeigt, dass dieses Programm gegenüber anderen fraktalen Kompressionsprogrammen führend in der erzeugten Bildqualität ist.

3.3.1 Iterierte Funktionensysteme

Da dem Verfahren der fraktalen Kompression die iterierten Funktionensysteme zugrunde liegen, wird hier zunächst deren Grundprinzip (in Anlehnung an [Barnsley & Hurd 1993b]) beschrieben. Zunächst die Definition von iterierten Funktionensystemen nach Barnsley:

Ein iteriertes Funktionensystem (IFS) besteht aus einem vollständigen metrischen Raum (X, d) zusammen mit einer endlichen Menge von kontrahierenden Abbildungen

$$w_n : X \rightarrow X \quad \text{mit den zugehörigen Kontraktionsfaktoren } s_n, \\ \text{mit } n = 1, 2, \dots, N.$$

Mit

$$s = \max\{s_n : n = 1, 2, \dots, N\} \text{ wird der zum IFS gehörende Kontraktionsfaktor bezeichnet.}$$

Erfüllt ein IFS noch die Eigenschaft des Hausdorff-Raums H (siehe [Barnsley & Hurd 1993b]), so gilt folgende Definition:

Gegeben ist ein IFS mit $\{X; w_n, n = 1, 2, \dots, N\}$. Dann ist die Transformation

$$w : H(X) \rightarrow H(X) \\ \text{mit } W(B) = \bigcup_{n=1}^N w_n(B)$$

eine kontraktive Abbildungsfunktion über den gesamten metrischen Raum $(H(X), H(d))$ mit dem Kontraktionsfaktor s . Eine Abbildung, die diese Eigenschaften erfüllt, besitzt einen einheitlichen Fixpunkt

$$A \in \lim_{n \rightarrow \infty} W^{\circ n}(B) \\ \text{für jedes beliebige } B \in H(X) \text{ berechnet.}$$

Der Beweis hierzu kann in [Barnsley 1988] (Fractals Everywhere) nachgelesen werden.

Der hier beschriebene Fixpunkt wird im Zusammenhang mit den IFS als Attraktor des IFS bezeichnet. Ein Beispiel für ein IFS stellt das folgende in R^2 definierte System dar. Sei das IFS im R^2 mit $R^2; w_1, w_2, w_3$ durch die folgenden affinen Transformationen definiert:

$$w_1 : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ w_2 : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 100 \\ 0 \end{pmatrix} \\ w_3 : \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 50 \\ 50 \end{pmatrix}$$

Der Attraktor dieses Systems ist das bekannte Sierpinski-Dreieck.

Um den Attraktor eines IFS zu berechnen, kann der sogenannte "Photocopy Machine" Algorithmus verwendet werden. Ausgehend von einem Zustand $A_0 \subset R^2$ wird durch Anwendung aller Transformationen des IFS auf A_0 der erste Schritt zur Berechnung des Attraktors durchgeführt. Auf das Ergebnis A_1 wird anschließend wieder das gesamte IFS angewendet. Für ein IFS, welches z.B. mit $\{R^2; w_1, w_2, \dots, w_N\}$ definiert ist, kann man ausgehend von $A_0 \subset R^2$ den Attraktor

$$A_n = W^{\circ n}(A) \\ \text{durch } A_{n+1} = \bigcup_{j=1}^N w_j(A_n) \\ \text{mit } n = 1, 2, \dots; \text{ berechnen.}$$

Abbildung 3.4 zeigt, wie durch diesen Algorithmus das Sierpinski-Dreieck berechnet werden kann. Als Basisset A_0 (Ausgangsbild) dient hierbei ein Kreis.

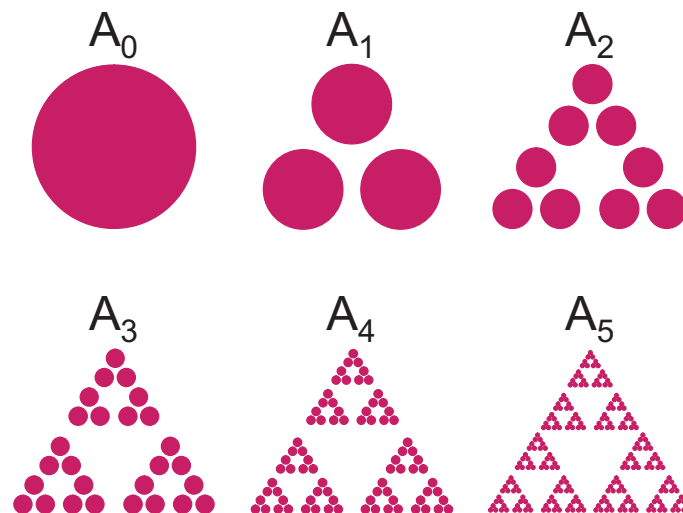


Abbildung 3.4: Darstellung des Photokopieralgorithmus am Beispiel des Sierpinski-Dreiecks. Als Basisset A_0 wurde ein Kreis verwendet.

3.3.2 Lokale iterierte Funktionensysteme

Um zu verdeutlichen, wie das Verfahren der fraktalen Bildkompression funktioniert, wird hier in Anlehnung an [Barnsley & Hurd 1993b] zunächst gezeigt, wie mit Hilfe eines lokalen iterierten Funktionensystems (LIFS) ein Binärbild dargestellt werden kann. Ein LIFS ist auf ähnliche Weise definiert, wie ein IFS. Die Definition nach [Barnsley & Hurd 1993b] lautet:

Sei (X, d) ein metrischer Raum und R eine nicht leere Untermenge von X . Dann ist

$$\begin{aligned} w & : R \longrightarrow X \text{ eine lokale kontraktive Abbildung, wenn} \\ & 0 \leq s < 1 \text{ und} \\ d(w(X), w(Y)) & \leq s * d(x, y) \quad \forall x, y \in R. \end{aligned}$$

Für die LIFS gilt dann folgende Definition:

(X, d) sei ein metrischer Raum, $w_i : R_i \longrightarrow X$ sei eine lokale kontraktive Abbildung auf (X, d) mit Kontraktionsfaktor s_i für $i = 1, 2, \dots, N$ (N positiver Integerwert). Dann ist

$$\begin{aligned} \{w_i & : R_i \longrightarrow X : i = 1, 2, \dots, N\} \\ & \text{ein lokales iteriertes Funktionensystem und} \\ s & = \max\{s_i : 1, 2, \dots, N\} \\ & \text{der Kontraktionsfaktor dieses LIFS.} \end{aligned}$$

Für die LIFS kann ebenfalls ein Attraktor gefunden werden. Dieser repräsentiert alle Attraktoren, die durch einen Teil der im LIFS enthaltenen Transformationen gebildet werden können. Er stellt somit die Vereinigung aller Attraktoren dar. Mit Hilfe eines LIFS können Transformationen definiert werden, die einen Attraktor, also z.B. ein Bild erzeugen. Das Problem, welches sich nun bei der fraktalen Kompression ergibt, besteht in dem Auffinden dieser kontraktiven Abbildungen und wird als das inverse Problem bezeichnet. Abbildung 3.5 aus [Barnsley & Hurd 1993b] zeigt ein einfaches Beispiel für ein LIFS. Ein Bild soll durch ein LIFS beschrieben werden. Zunächst erfolgt die Aufteilung des gesamten Bildes in gleichgroße Range-Blöcke (D_i , Bildblöcke). Zu jedem dieser Bildblöcke D_i wird nun ein geeigneter, doppelt so großer Domainblock (Urbildblock) R_i gesucht, der durch Verwenden des Kompressionsfaktors $\frac{1}{2}$ und einer geeignet gewählten Symmetrie auf einen Bildblock transformiert werden kann. Die dabei möglichen Symmetrien sind in Tabelle 3.1 (entnommen aus [Barnsley & Hurd 1993b]) dargestellt. Sie repräsentieren die acht grundsätzlich nur möglichen Transformationen, mit denen ein Quadrat auf ein Quadrat abgebildet werden kann. Für das in Abbildung 3.5 dargestellte Beispiel genügt für die vier Bildblöcke D_i ein Urbildblock R_i . Um das gesamte Bild aus diesem Urbildblock zu erzeugen, muss lediglich zu jedem Bildblock dessen Position und die gewählte Symmetrie, sowie die Position des Urbildblocks gespeichert werden. Das kodierte LIFS ist ebenfalls in Abbildung 3.5 dargestellt.

Symmetrie	Matrix	Beschreibung
0	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	Identität
1	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	Spiegelung an der y-Achse
2	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	Spiegelung an der x-Achse
3	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	Drehung um 180°
4	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	Spiegelung an der Geraden $y = x$
5	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$	Drehung um 90°
6	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	Drehung um 270°
7	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$	Spiegelung an der Geraden $y = -x$

Tabelle 3.1: Darstellung der verwendeten Symmetrien und zugehörigen Matrizen. Entnommen aus [Barnsley & Hurd 1993b]

Die bislang dargestellten Algorithmen können lediglich zur Komprimierung von binären Bildern verwendet werden. Zur Komprimierung von Grauwertbildern sind zusätzliche Erweiterungen der Transformationen notwendig. Diese sind in [Barnsley & Hurd 1993b] aufgeführt. Hier sei der Vollständigkeit halber lediglich die erweiterte Form der affinen Transformation kurz dargestellt:

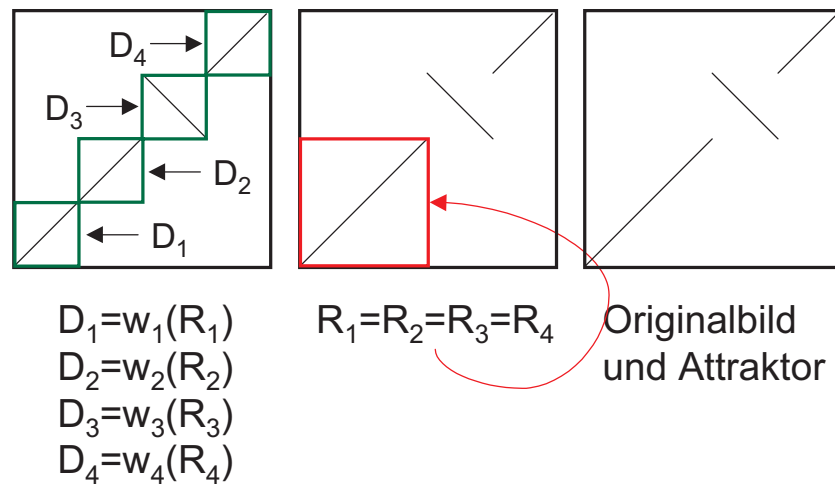
$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} a_i & b_i & 0 \\ c_i & d_i & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R^{(x)} \\ R^{(y)} \\ Q_i \end{pmatrix},$$

mit a_i, b_i, c_i und d_i so gewählt, dass die affine Transformation nur in der x-y-Ebene arbeitet und die Symmetrien aus Tabelle 3.1 verwendet. Ebenso gilt weiterhin, dass der Kontraktionsfaktor mit $s = \frac{1}{2}$ gewählt ist. Für den Koeffizienten P gilt $0 < P \leq s$ und ferner gilt $v_i(z) = Pz + Q_i$.

3.3.3 Prinzip der fraktalen Kompression

Um ein Bild fraktal komprimieren zu können, müssen die zuletzt aufgeführten Erweiterungen zusätzlich zu den Eigenschaften der LIFS eingeführt werden. Diese können in [Barnsley & Hurd 1993b] im Detail nachgelesen werden. Im weiteren erfolgt die Beschreibung des Algorithmus der fraktalen Kompression.

- Der erste Schritt besteht in der Aufteilung des gesamten Bildes in Bildblöcke (Range-Blöcke). Dabei gilt: Je kleiner die Bildblockgröße gewählt wird, desto höher ist die Qualität des komprimierten Bildes und desto kleiner ist der erreichte Kompressionsfaktor und umgekehrt. Alle Bildblöcke sind aneinandergrenzend und nicht überlappend.
- Der nächste Schritt besteht im Auffinden der Urbildblöcke. Zu jedem Bildblock muss der ideale Urbildblock gefunden werden. Die Urbildblöcke sind über das gesamte Bild verteilt und überlappend, d.h. beginnend in der linken, oberen Ecke des Bildes wird der Urbildblock während der Suche nach dem optimalen Urbildblock pixelweise in x- und y-Richtung verschoben, bis alle möglichen Urbildblöcke zum gerade bearbeiteten Bildblock untersucht wurden. Urbildblöcke sind dabei immer doppelt so groß wie die Bildblöcke,



Index(w_i)	Koordinaten				Symmetrie
	D_x	D_y	R_x	R_y	
1	0	0	0	0	0
2	4	4	0	0	0
3	8	8	0	0	2
4	12	12	0	0	0

Abbildung 3.5: Beispiel für ein einfaches LIFS. Entnommen aus [Barnsley & Hurd 1993b]

und werden geometrisch und radiometrisch transformiert. Bei der radiometrischen Transformation findet zusätzlich eine Quantisierung statt, um möglichst wenig Platz für die Speicherung der Daten zu benötigen. Nach durchgeführter Quantisierung und der radiometrischen und geometrischen Transformation des Urbildblocks wird zu dem gerade untersuchten Bildblock der entstehende Fehler berechnet. Diese Fehlerberechnung findet für jeden Urbildblock statt.

- Sind alle Urbildblöcke untersucht wird derjenige Urbildblock gespeichert, der den geringsten Fehler zum Bildblock aufweist. Die Parameter dieses Urbildblocks werden dann gespeichert (Transformationsparameter (radiometrisch, geometrisch), Position des Bildblocks, Position des Urbildblocks).

Es sei hier nicht verschwiegen, dass die Bestimmung des Urbildblocks sehr zeitintensiv ist. Abhilfe schaffen hier neuere Verfahren, wie z.B. das Einbinden eines Quadtree-Verfahrens (siehe auch [Saupe, Hamzaoui & Hartenstein 1996]). Um ein Bild zu dekomprimieren, muss nun lediglich für ein beliebiges Ausgangsbild jede der berechneten Transformationen iterativ durchgeführt werden; d.h. auf das Ausgangsbild wird zunächst jede Transformation durchgeführt. M.a.W. , jeder Bildblock wird aus dem Ausgangsbild und seiner zugehörigen Transformation berechnet. Sind alle Bildblöcke berechnet, d.h. jede gespeicherte Transformation des LIFS wurde einmal ausgeführt, erfolgt im darauffolgenden Iterationsschritt die erneute Berechnung der Bildblöcke. Dabei dient als Grundlage das im vorangegangenen Iterationsschritt berechnete Bild. Fährt man auf diese Art und Weise fort, so erhält man schon nach sieben Iterationen den Attraktor bzw. Fixpunkt des LIFS, das zuvor komprimierte Bild. Es sei nochmals betont, dass lediglich die Positionen der Urbildblöcke, nicht aber deren Bildinhalt im LIFS gespeichert sind. Der Inhalt dieser Urbildblöcke ist für die Rekonstruktion des Bildes nicht relevant. Ebenso ist bei der Dekomprimierung der Inhalt des Startbildes nicht von Bedeutung (siehe [Ohm 1995]), da das LIFS immer zum Attraktor hin konvergiert. Abbildungen 3.6 - 3.9 verdeutlichen dies. Sie zeigen für eine Bildblockgröße von 64 Pixeln (bei Komprimierung), das Startbild der Dekomprimierung, das resultierende Bild nach einer Iteration und schließlich den Attraktor des Systems, das zuvor komprimierte Bild. Die Bildblockgröße wurde so groß gewählt, um erkennbar zu machen, dass das Startbild zur Berechnung des Lena-Bildes verwendet wurde. Dies hatte natürlich einen hohen Verlust bei der Bildqualität zur Folge. Abbildung 3.9 zeigt für eine Bildblockgröße von 16 Pixeln das gleiche Bild.



Abbildung 3.6: Startbild bei Dekomprimierung



Abbildung 3.7: Ergebnis nach einer Iteration



Abbildung 3.8: Ergebnis nach sieben Iterationen (Bild zuvor mit 64 Pixeln Range-Block-Größe komprimiert, Kompressionsfaktor 1:246)



Abbildung 3.9: Mit 16 Pixeln Range-Block-Größe komprimiertes Bild (Startbild wie oben), Kompressionsfaktor 1:43

Kapitel 4

Ein Modell zur Erfassung des Kompressionseinflusses

Mit einem geeigneten Maß zur Beurteilung des Einflusses der Kompression auf die zu erwartende Genauigkeit der Punktübertragung könnte eine Vorhersage für den maximal zulässigen Kompressionsfaktor bestimmt werden. Durch die Untersuchung des Rauschens, welches durch das jeweilige Kompressionsverfahren entsteht, könnte die Grenze berechnet werden, bei der die geforderte Genauigkeit von z.B. 0,1 Pixel der Punktübertragung nicht mehr erreicht werden kann. Der Vorteil eines solchen Maßes ergibt sich in der zur Bestimmung des Kompressionsfaktors benötigten Zeit. Die Berechnung der durch die Kompression entstehenden Fehler bedeutet nur einen sehr geringen Zeitaufwand.

Die Alternative zur Bestimmung des maximal zulässigen Kompressionsfaktors ist dagegen sehr zeitintensiv und daher nicht für den allgemeinen Gebrauch anwendbar. Um das Maximum zu bestimmen, müsste man sich iterativ an den maximalen Faktor herantasten, indem immer zunächst die Bilder mit einem bestimmten Kompressionsfaktor und -verfahren komprimiert und daran anschließend die Punktübertragung durchgeführt wird. Für jede Übertragung muss dann die erreichte Genauigkeit berechnet werden. Je nach Ergebnis muss man anschließend den Kompressionsfaktor erhöhen oder verringern. Sowohl das Erzeugen der komprimierten Bilder, als auch die Berechnung der homologen Punktpaare durch die Punktübertragung benötigen sehr viel Zeit. Außerdem muss dieses Verfahren bei jedem Bild erneut angewendet werden.

Aus den aufgeführten Gründen resultiert die Notwendigkeit, eine Darstellung zu finden, mit deren Hilfe der maximale Kompressionsfaktor aufgrund der durch die Anwendung der Kompression entstandenen Veränderung des Bildinhaltes bestimmt werden kann. Daher wurde untersucht, ob zwischen der Genauigkeit der Punktübertragung und den im Bild enthaltenen Informationen (Grauwerte und Gradienten) ein linearer Zusammenhang gefunden werden kann.

4.1 Das Kompressionsrauschen

Durch den Einsatz der verlustbehafteten Kompressionsverfahren entstehen in den komprimierten Bildern Veränderungen gegenüber dem Originalbild. Diese Veränderungen entsprechen Grauwertdifferenzen an bestimmten Positionen im Bild. Abhängig vom gewählten Kompressionsverfahren und Kompressionsverhältnis sind diese Fehler unterschiedlich stark ausgeprägt und im Bild verteilt. Entspricht diese Verteilung nicht der Gauß'schen Normalverteilung, so dürfte die im nächsten Abschnitt beschriebene Methode nicht verwendet werden, da diese auf der Theorie beruht, dass die im komprimierten Bild entstehenden Fehler normalverteilt sind.

Um diese Verteilung zu ermitteln und somit den Einfluss der verschiedenen Kompressionsverfahren auf die komprimierten Bilder darzustellen, wurde am Beispiel eines MOMS-Datensatzes zu jedem komprimierten Bild das Differenzbild zum Originalbild berechnet und ein Histogramm dieser Differenzen¹ bestimmt.

Da diese Differenzen zur Darstellung in einem Grauwertbild derselben Auflösung (8-Bit Wertebereich) gespeichert werden sollten, wurde der Bereich von [-128..127] der Differenzen auf das Intervall [0..255] abgebildet. Der Grauwert 128 im Differenzbild repräsentiert den Differenzwert 0. Eine Differenzänderung um einen Grauwert entspricht somit im Histogramm ebenfalls einer Differenz von 1. Differenzen größer 127 bzw. kleiner -128 sind beim entsprechenden Maximalwert (127) bzw. Minimalwert (-128) gespeichert.

¹ Auftreten können Werte im Intervall [-255..255].

In den nachfolgenden Diagrammen wird daher der höchste Ausschlag und somit die größte Häufigkeit bei diesem Grauwert im Histogramm erwartet. Des weiteren erhofft man sich von den Kompressionsverfahren, dass bei einem geringen Kompressionsverhältnis (z.B. 1:2) fast keine Fehler auftreten, d.h. die Histogramme sollten sehr schmal sein und nur einen Peak beim neutralen Grauwert von 128 enthalten.

Mit zunehmender Kompression darf dann das dargestellte Histogramm breiter werden. Dies entspricht einer Zunahme der Differenzen und somit der Zunahme der im komprimierten Bild enthaltenen Fehler. Durch die Verbreiterung des Histogramms (entspricht der Zunahme der Standardabweichung) nimmt gleichzeitig die Häufigkeit der um den Nullpunkt (Grauwert 128) befindlichen Werte ab.

4.1.1 Test auf Gauß'sche Normalverteilung

Wie bereits einleitend erwähnt ist für die nachfolgenden Untersuchungen vorausgesetzt, dass die durch den Einfluss der Kompressionsverfahren entstehenden Differenzen bzw. Fehler normalverteilt sind. Um beobachtete Verteilungen auf die Gauß'sche-Verteilung zu testen, sind verschiedene Testmethoden bekannt. In [Kreyszig 1988] bzw. [Sachs 1999] sind jeweils der χ^2 -Anpassungstest und der Kolmogoroff-Smirnoff-Test beschrieben. Beide Verfahren können als Testmethode für die Normalverteilung einer Stichprobe verwendet werden.

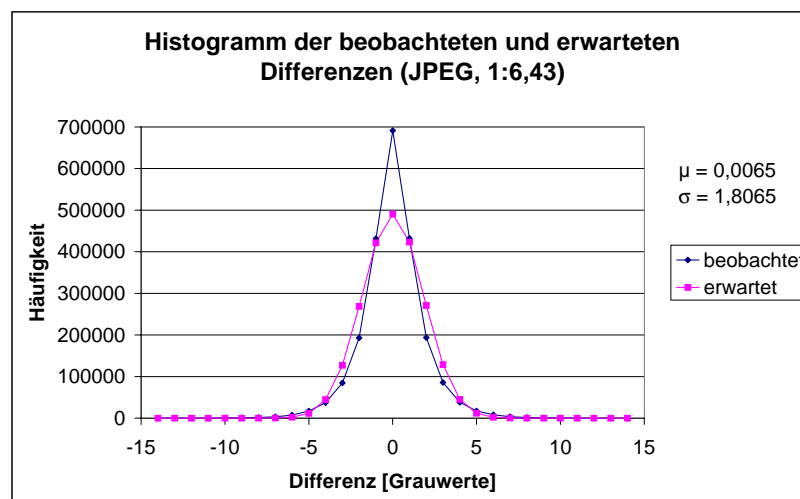


Abbildung 4.1: Darstellung der Histogramme beobachteter und erwarteter Häufigkeiten am Beispiel der JPEG-Kompression

Sowohl der χ^2 -Anpassungstest als auch der Kolmogoroff-Smirnoff-Test wurden auf die beobachteten Differenzen der einzelnen Kompressionsverfahren bei verschiedenen Kompressionsfaktoren angewandt. Beide Testverfahren lieferten für alle getesteten Verteilungen der einzelnen Kompressionsverfahren bzw. -verhältnisse das gleiche Resultat: Die zur Bestätigung des normalverteilten Verhaltens einzuhaltenen Schranken wurden überschritten. Somit sind alle untersuchten Differenzen nicht normalverteilt. Generell folgen also die im komprimierten Bild entstandenen Fehler bzw. Differenzen nicht der Gauß'schen-Verteilung. Insbesondere gilt dies für jedes der getesteten Kompressionsverfahren.

Eine genauere Betrachtung der Differenzen anhand von Diagrammen zeigt jedoch, dass die entstandenen Fehler sich ähnlich der Normalverteilung verhalten. Abbildung 4.1 – 4.3 zeigen jeweils die beobachtete Verteilung überlagert mit der erwarteten Verteilung bei einem Kompressionsverhältnis von 1:6,43.

Während im gezeigten Beispiel das JPEG- und das Wavelet-Verfahren eine ähnliche Verteilung (kaum Unterschiede zwischen Mittelwert μ und Standardabweichung σ) besitzen, erzeugt das fraktale Verfahren eine deutlich höhere Standardabweichung und einen systematischen Fehler. Dennoch besitzen alle drei Verfahren eine gemeinsame Eigenschaft: Die Differenzen im Bereich des Intervalls $[-2..2]$ treten wesentlich häufiger auf,

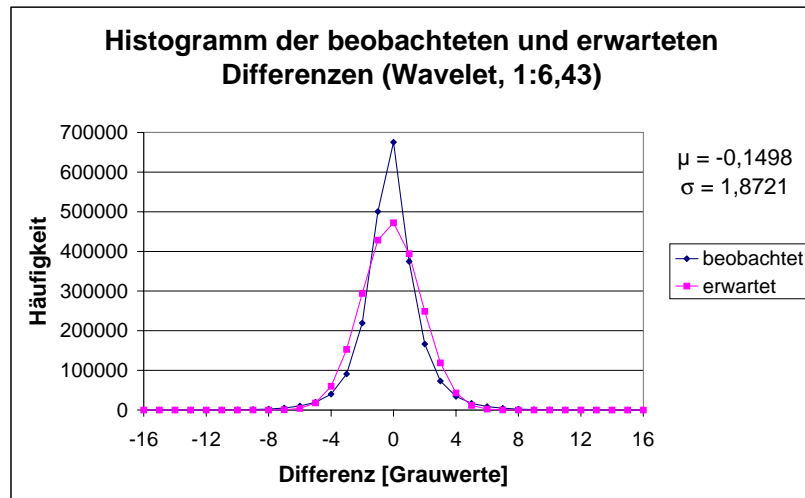


Abbildung 4.2: Darstellung der Histogramme beobachteter und erwarteter Häufigkeiten am Beispiel der Wavelet-Kompression

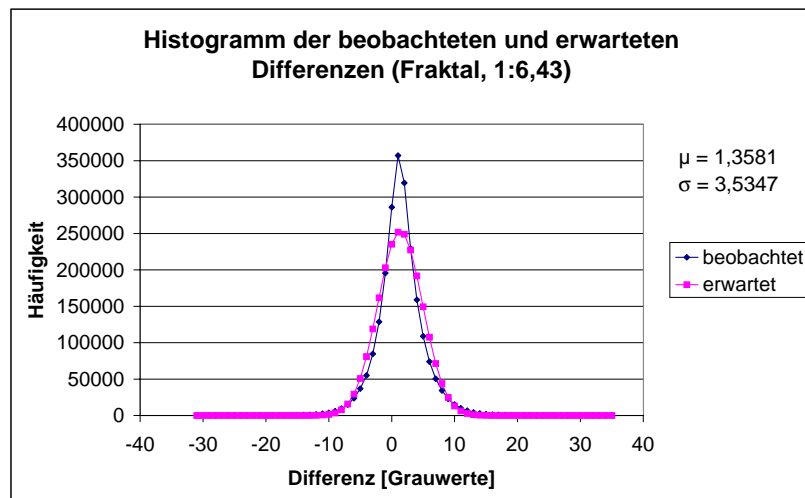


Abbildung 4.3: Darstellung der Histogramme beobachteter und erwarteter Häufigkeiten am Beispiel der fraktalen Kompression

als dies für die Gauß'sche-Verteilung notwendig wäre. Abbildung 4.4 zeigt die Differenz zwischen der jeweiligen Normalverteilung und den beobachteten Häufigkeiten.

Auch hier zeigt sich, dass die beobachteten Werte der Gauß'schen-Verteilung folgen. Die entstandenen Differenzen enthalten eher weniger Fehler als durch die Normalverteilung zulässig wären. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird daher vorausgesetzt, dass eine Normalverteilung ähnliche Verteilung vorliegt.

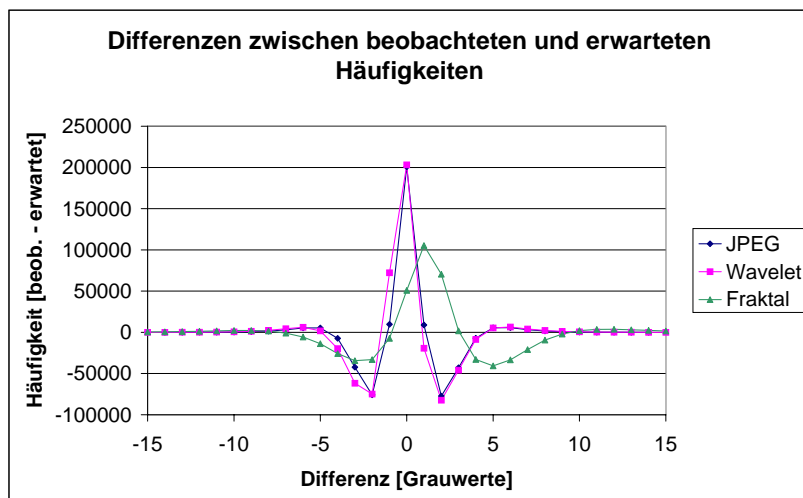


Abbildung 4.4: Darstellung der Differenzen zwischen beobachteten und jeweils erwarteten Häufigkeiten bei einem Kompressionsverhältnis von 1:6,43.

4.1.2 Verteilung der Differenzen bei unterschiedlichen Kompressionsstufen

Wie die obige Untersuchung zeigt, unterscheiden sich die Histogramme der Differenzen zwischen den verschiedenen Kompressionsverfahren. Daher wurde am Beispiel der MOMS-Daten untersucht, wie sich die Histogramme über den Kompressionsbereich hinweg verändern.

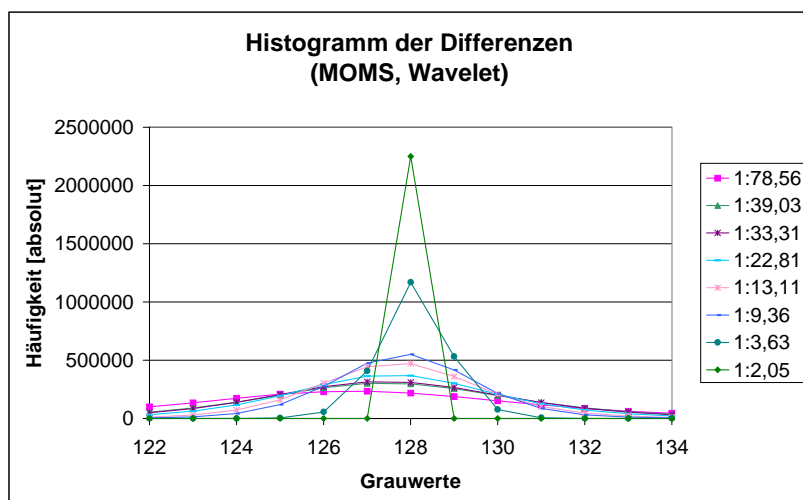


Abbildung 4.5: Histogrammdarstellung der Differenzen verschiedener Kompressionsverhältnisse am Beispiel der Wavelet-Kompression mit MOMS-Daten

Abbildung 4.5 zeigt die Fehlerverteilung, wie sie gleichermaßen für das JPEG-Verfahren und das Wavelet-Verfahren Gültigkeit besitzt. Bei einem Kompressionsverhältnis von 1:2,05 entsteht lediglich ein großer Ausschlag an der erwarteten Stelle, nämlich beim Grauwert 128, welches den Nullpunkt, also keine Differenz, repräsentiert. Mit zunehmendem Kompressionsverhältnis nehmen auch die durch die Kompressionsverfahren erzeugten Fehler in erwarteter Weise zu. Anhand von Abbildung 4.5 kann man auch erkennen, dass die erzeugten Fehler normalverteilt sind.

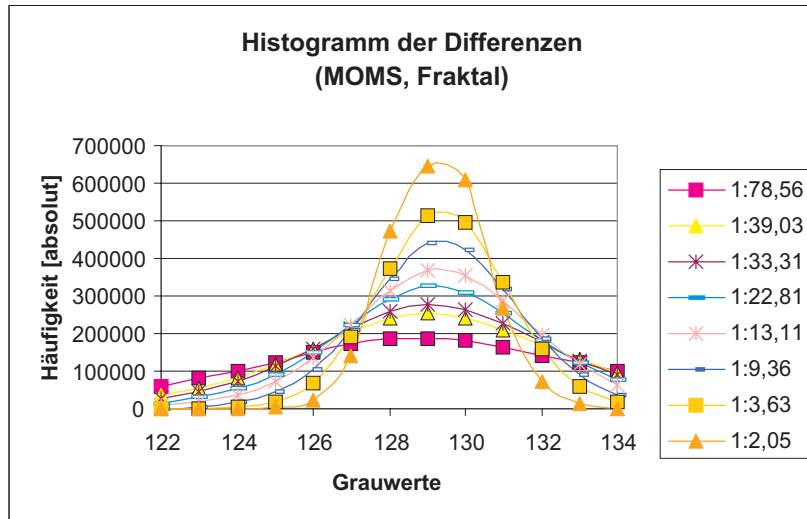


Abbildung 4.6: Histogrammdarstellung der Differenzen verschiedener Kompressionsverhältnisse am Beispiel der fraktalen Kompression mit MOMS-Daten

Bereits zu diesem Zeitpunkt zeigt sich jedoch, dass dem fraktalen Kompressionsverfahren ein anderer Algorithmus zugrunde liegt als den beiden anderen Verfahren. Während die JPEG- und die Wavelet-Kompression die in den Bildern enthaltenen Frequenzen während des Kompressionsvorgangs analysiert, sucht das fraktale Verfahren nach in einem Bild enthaltenen Selbstähnlichkeiten (siehe hierzu auch Kapitel 3.3). Die Ergebnisse der fraktalen Kompression weichen stark von denen der JPEG- bzw. Wavelet-Kompression ab. Bereits bei voller Qualität, also geringster Kompression, sind die durch das Verfahren erzeugten Fehler deutlich im Differenzenhistogramm zu erkennen.

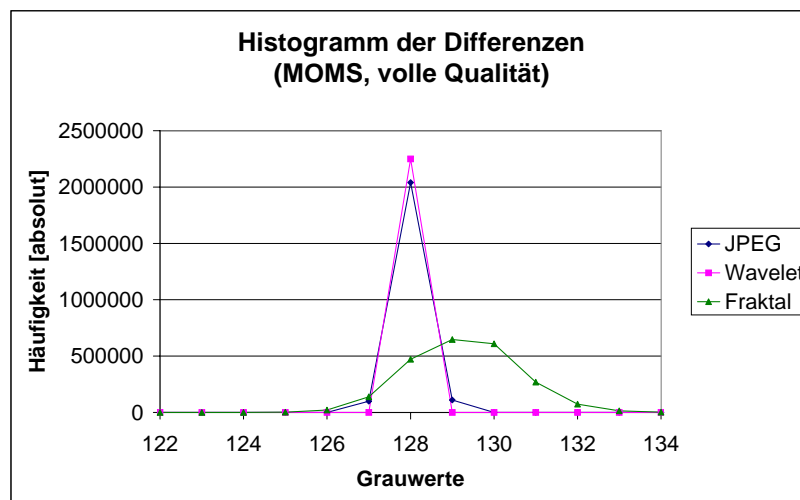


Abbildung 4.7: Histogrammdarstellung der Differenzen bei einem Kompressionsverhältnis von ca. 1:2 am Beispiel der MOMS-Daten für jedes getestete Kompressionsverfahren

In Abbildung 4.6 sieht man, dass bei voller Qualität und geringster Kompression das Histogramm bereits sehr gespreizt ist. Dies entspricht einer von Beginn der Kompression an gegenüber den beiden anderen Verfahren deutlich größeren Standardabweichung. Somit sind im Fall der fraktalen Kompression bereits bei voller Qualität (Kompressionsverhältnis ca. 1:2) Fehler enthalten.

Ferner erkennt man, dass ein systematischer Fehler in dem fraktal komprimierten Bild entsteht. Dies äußert sich in der Verschiebung des höchsten Peaks im Diagramm zum Grauwert 129. Abbildung 4.7 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Während die JPEG- und die Wavelet-Kompression nahezu die gleichen Werte bei voller Qualität erzeugen, enthält das Histogramm der fraktalen Kompression bei gleichem Kompressionsverhältnis deutlich mehr Fehler.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die durch das jeweilige Verfahren erzeugten Fehler normalverteilt sind. Somit darf das im folgenden Abschnitt dargestellte Modell auf die hier getesteten Kompressionsverfahren angewendet werden.

4.2 Kompressionsrauschen und seine Auswirkung

Im nun folgenden Abschnitt wird ein Modell zur Erfassung des Einflusses der Kompression beschrieben. Dabei wird die Auswirkung des Kompressionsrauschens auf die Punktübertragung näher beschrieben.

Nach [Förstner 1993] gilt für die bei der Punktübertragung zu erwartende Genauigkeit der Verschiebungsparameter folgende Gleichung (siehe auch Kapitel 5.22):

$$K_{\hat{x}\hat{x}} = \frac{\hat{\sigma}_n^2}{m} \begin{pmatrix} \sigma_{f_r}^2 & \sigma_{f_r f_c} \\ \sigma_{f_r f_c} & \sigma_{f_c}^2 \end{pmatrix}^{-1} \quad (4.1)$$

wobei

- m = Anzahl Beobachtungen im Zuordnungsfenster
- $\hat{\sigma}_n^2$ = In den Bildern vorhandenes Rauschen
- f_r, f_c = Gradientenwerte der untersuchten Bilder

Für die nachfolgend durchgeführten Untersuchungen werden für die einzelnen Werte folgende Vereinbarungen getroffen:

1. $\sigma_n^2 = \sigma_{kr}^2$, Rauschen, welches durch die verlustbehaftete Kompression entsteht.
2. Für die Genauigkeiten $\sigma_{f_r f_c}$ wird angenommen, dass ihre Werte nahe bei Null liegen. Somit ist auch $\sum_{i=1}^m f_r f_{c_i}$ zu vernachlässigen.
3. Unter der Voraussetzung, dass der Mittelwert aller im Fenster enthaltenen Gradienten bei 0 liegt, gilt für

$$\sigma_{f_r}^2 := \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_r^2$$

und für

$$\sigma_{f_c}^2 := \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_{c_i}^2$$

Mit dem Maximalfehlermodell

$$\sigma_{maxrc}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_c^2$$

ergibt sich für die zu erwartende Genauigkeit der Verschiebung in r- und c-Richtung daher die folgende Gleichung:

$$\sigma_{r,c}^2 = \frac{\sigma_{kr}^2}{m} \begin{pmatrix} \sigma_{fr}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{fc}^2 \end{pmatrix}^{-1} \quad (4.2)$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{maxrc} = \sqrt{\frac{\sigma_{kr}^2}{m} \cdot \left(\frac{1}{\sigma_{fr}^2} + \frac{1}{\sigma_{fc}^2} \right)} \quad (4.3)$$

Die Berechnung der Genauigkeit der übertragenen Punkte kann mit Hilfe der Ergebnisse der Punktübertragung ohne Kompressionseinfluss erfolgen. Für die Veränderung der Grauwerte wird ebenfalls das unkomprimierte Bild als Referenz herangezogen und der RMSE berechnet.

Kapitel 5

Die Kleinste-Quadrate-Zuordnung (KQZ)

In den folgenden Abschnitten wird das Verfahren der flächenbasierten Kleinste-Quadrate-Zuordnung (KQZ oder auch Least Squares Matching (LSM)) näher erklärt. Dabei wird auf die allgemein bekannte Theorie dieser Methode eingegangen. Anerkanntermaßen kann mit Hilfe der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung die Punktübertragung sehr genau durchgeführt werden. Bei der Übertragung gibt es jedoch verschiedene limitierende Faktoren. Im folgenden sind die Besonderheiten der hier implementierten und für die Untersuchungen verwendeten Version hervorgehoben, wobei es sich dabei im wesentlichen um strategische Aspekte handelt.

Die Zuordnung der einzelnen Punkte erfolgt theoretisch im Mittel mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 Pixel, jedoch sind in einer Menge von homologen Punktpaaren immer einige falsch zugeordnete Punkte (sog. "Ausreißer") enthalten. Die Zuverlässigkeit des hier implementierten Verfahrens ist durch die Einführung einer Selbstkontrolle verbessert. Einen weiteren limitierenden Faktor stellt der Konvergenzradius des Verfahrens dar. Dieser beträgt ungefähr ± 2 Pixel, d.h. um einen Punkt mittels LSM übertragen zu können, muss ein Start- bzw. Näherungswert existieren, der nicht mehr als 2 Pixel in x- und y-Richtung von der richtigen Lösung abweicht. Da die meisten Näherungswerte diesen Qualitätsanspruch nicht erfüllen können, erweitert man das LSM-Verfahren dahingehend, dass es auch schlechtere Näherungswerte verarbeiten kann. Um dies zu ermöglichen, wird i.A. ein Grob-zu-Fein Ansatz gewählt. Dieser ist im folgenden noch näher erläutert. Einen ebenso wichtigen Aspekt der automatischen Punktübertragung stellt die Erfolgsquote dar. Diese sollte sich auf einem möglichst hohen Niveau für jede Art von Bilddaten befinden. Zu diesem Zweck wurde das hier vorgestellte Verfahren um die Strategie der variablen Fenstergrößen erweitert.

Die Einführung einer Positionsvorhersage reduzierte die insgesamt zur Übertragung eines Punkthaufens benötigte Rechenzeit. Dies ist ein nicht zu unterschätzender Faktor, da es sich bei der Punktübertragung mittels LSM um ein sehr rechenzeitintensives Verfahren handelt. Die letzte Erweiterung des hier verwendeten Verfahrens besteht in der Möglichkeit der Übertragung eines Punktes in mehrere Bilder. Um auch hier eine möglichst hohe Erfolgsquote zu erzielen, wurde die eigentliche Übertragung des Punktes strategisch gelenkt.

Die nächsten Abschnitte erklären den theoretischen Ansatz zur Punktübertragung mittels Kleinsten-Quadrate-Zuordnung und die verschiedenen Eigenschaften des hier implementierten LSM-Verfahrens.

5.1 Die digitale Punktübertragung

Wie in den einleitenden Kapiteln erwähnt, spielt die automatische Punktübertragung in der digitalen Photogrammetrie eine wesentliche Rolle. Um diese Punktübertragung zu automatisieren, wurden verschiedene Modelle entwickelt und realisiert. Bei den Verfahren des Feature Based Matching (FBM) und des intensitätsbasierten Least Squares Matching (LSM) handelt es sich um zwei der bekanntesten Vertreter der automatischen Punktübertragung. Ein Beispiel für die Integration der digitalen Punktzuordnung in der Photogrammetrie ist in [Ebner, Fritsch, Gillessen & Heipke 1987] gegeben.

Mit beiden zuvor genannten Verfahren erfolgt die Zuordnung der Punkte sehr genau, wobei die Qualität der mit dem LSM-Verfahren übertragenen Punkte deutlich die der mit dem FBM-Verfahren zugeordneten Punkte übersteigt. Erreicht man mit Hilfe des FBM eine theoretische Genauigkeit von ca. 0,3 – 0,4 Pixel, so liegt dieser Wert für das LSM-Verfahren bei 0,1 Pixel. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Verfahren besteht in der Art und Weise, wie die Übertragung der Punkte zustande kommt. Beim FBM werden mit Hilfe

eines Operators, z.B. dem Interestoperator von [Förstner 1985] zunächst einzelne Punkte (auffällige Merkmale) in den Bildern in denen die Punktübertragung stattfinden soll, extrahiert. Bei diesen Punkten handelt es sich um Punkte mit großem Informationswert, die durch einen hohen Grauwertgradienten, den sie enthalten, ermittelt werden können. Bei diesen Interestpunkten handelt es sich daher oftmals um Feldgrenzen / -ecken, Dachkanten an Häusern oder z.B. um Kanten bei Fahrbahnmarkierungen. Mit Hilfe einer Grob-zu-Fein Strategie und durch den Einsatz einer grauwertbasierten Korrelation erfolgt die Zuordnung der einzelnen Punkte zueinander. Der Erfolg der Zuordnung hängt somit stark von der Qualität der gefundenen Interestpunkte ab. Außerdem kann immer nur dann ein Gebiet erfasst und zugeordnet werden, wenn es einen entsprechenden Interestpunkt enthält.

Hierin besteht ein wesentlicher Vorteil des LSM-Verfahrens. Es besitzt die Möglichkeit grundsätzlich auf jeder beliebige Position im Bild einen Punkt zu übertragen. Bei der Zuordnung werden alle Beobachtungen (Grauwerte der Pixel) eines zuvor festgelegten Bereiches (Fenster) erfasst und mit den Werten / Beobachtungen des anderen Bildes verglichen. Die Kleinste-Quadrate-Schätzung verschiebt dann die gesuchte Zielposition solange bis der Fehler der Ausgleichung kleiner ist als eine zuvor festgelegte Schranke. Aufgrund dieser Beschreibung kann man bereits erkennen, dass es sich bei diesen Verfahren um einen iterativen Prozess handelt. Wie bei jedem iterativen Prozess gibt es daher auch hier das Problem des divergenten Verhaltens; d.h. führt der Schätzprozess nicht zu einem Minimum des Fehlers, terminiert der Schätzprozess nicht. Für diesen Fall muss daher ein Maximum für die Anzahl an Iterationen vorgegeben werden.

Aufgrund der höheren Genauigkeit des LSM-Verfahrens und der Einsatzmöglichkeit auf beliebigen Punkten (\Rightarrow Berechnung auf regelmäßigem Raster möglich) wurde das LSM-Verfahren für diese Untersuchung bevorzugt. Der Nachteil des Verfahrens gegenüber dem FBM soll hier jedoch nicht vernachlässigt werden. Da es sich beim LSM-Verfahren um einen iterativen Prozess handelt, geht die Zunahme der Genauigkeit und der Variabilität zu Lasten der Zeit. Um Punkte mittels LSM zuzuordnen, wird deutlich mehr Zeit benötigt. Im folgenden ist die Theorie des LSM sowie das implementierte LSM-Modul und seine Funktionalität näher beschrieben.

5.2 Die Theorie der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung

Die Theorie des LSM-Verfahrens ist im nächsten Abschnitt in kurzen Abrissen erklärt. Das Verfahren basiert auf der Methode der kleinsten quadratischen Fehler nach Gauß. In [Koch 1997] ist eine ausführliche Beschreibung der Methode der kleinsten Quadrate vorhanden. Beim Least Squares Matching werden die Grauwerte eines zuvor definierten Operatorfensters als Beobachtungen in die Parameterschätzung aufgenommen. Die Mitte des Operatorfensters definiert den zu übertragenden Punkt im Ausgangsbild, der im Stereopartner gefunden und in seiner Position subpixelgenau bestimmt werden soll.

5.2.1 Die Methode der kleinsten Quadrate

Da das intensitätsbasierte Zuordnungsverfahren auf der Ausgleichung nach ermittelnden Beobachtungen (Gauß–Markov–Modell) basiert ist diese zunächst kurz dargestellt. Der Erwartungswert der Beobachtungen I ist im funktionalen Modell definiert mit

$$E(I) = Ax \quad (5.1)$$

Für das stochastische Modell gilt die Kovarianzmatrix

$$D(I) = \sigma_0^2 \cdot P^{-1} \quad (5.2)$$

Der in der Ausgleichung zu schätzende Parametervektor x ist definiert durch

$$\begin{aligned} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}) \hat{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} I &= 0 \\ \Leftrightarrow \hat{x} &= (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} I \end{aligned} \quad (5.3)$$

Die Genauigkeit dieses Vektors ergibt sich aus der Kovarianzmatrix, wobei

$$\mathbf{K}_{\hat{x}\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad (5.4)$$

Auf Basis der hier in aller Kürze beschriebenen Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen erfolgt die im nächsten Abschnitt beschriebene Kleinste-Quadrate-Zuordnung.

5.2.2 Das mathematische Modell der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung

Im ersten Schritt ist das Modell für die Kleinste-Quadrate-Zuordnung mittels intensitäts- und flächenbasierter Methode auf der Basis von Grauwertbildern zu definieren. Die KQZ ist bereits seit längerer Zeit in der digitalen Bildverarbeitung bekannt und wird zur Punktübertragung innerhalb eines Bildpaares (oder mehrerer Bilder bei entsprechender Implementierung) verwendet. In [Förstner 1993] ist die KQZ für den 1-dimensionalen Fall beschrieben. Die nachfolgende Beschreibung zeigt das Modell für den 2-dimensionalen Fall. Das funktionale Modell ist dabei definiert durch den nicht linearen Ansatz:

(a) Nur radiometrischer Ausgleich

$$g_2(x_i, y_i) = r_1 \cdot g_1(x_i, y_i) + r_0 \quad (5.5)$$

mit

- g_1 : Grauwert im Bild 1 an der Stelle x_i, y_i
- g_2 : Grauwert im Bild 2 an der Stelle x_i, y_i
- r_1 : skalarer Anteil der radiometrischen Korrektur
- r_0 : Offset der radiometrischen Korrektur

(b) Radiometrischer und geometrischer Ausgleich

$$g_2(x_i, y_i) = r_1 \cdot g_1(u_i, v_i) + r_0 \quad (5.6)$$

mit

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 \\ a_2 & a_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}$$

$$\Leftrightarrow g_2(x_i, y_i) = \underbrace{r_1 \cdot g_1(a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)}_{h(r_0, r_1, g_1)} + r_0 \quad (5.7)$$

Für das stochastische Modell sind dabei folgende Annahmen getroffen: es wird vorausgesetzt, dass das in den Bildern enthaltene Rauschen dem weißen Gaußschen-Rauschprozess folgt; d.h. jeder im Bild enthaltene Grauwert ist normalverteilt mit der Varianz σ_n^2 und die einzelnen Grauwerte sind nicht korreliert. Somit darf man für die nachfolgende Betrachtung die Gewichtsmatrix P des stochastischen Modells aus Gleichung 5.2 der Einheitsmatrix gleichsetzen, also $P = E$. Ferner gilt für das in Gleichung 5.2 enthaltene σ_0 :

$$\sigma_0^2 = \sigma_n^2$$

Der Standardweg zur Lösung des in Gleichung 5.7 definierten nicht linearen Modells erfolgt mittels der Linearisierung nach Taylor. Allgemein gilt für eine Linearisierung stets:

$$f(x, y) = f(x, y)|_0 + \frac{1}{1!} \left[\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_0 dx + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_0 dy \right] + \text{Glieder höherer Ordnung} \quad (5.8)$$

Die Glieder höherer Ordnung werden stets vernachlässigt, um ein lineares Gleichungssystem zu erhalten. Für den Fall der KQZ folgt somit:

$$\begin{aligned} h(r_0, r_1, g_1) &= h(r_0, r_1, g_1)|_0 + \left[\left. \frac{\partial h}{\partial r_0} \right|_0 dr_0 + \left. \frac{\partial h}{\partial r_1} \right|_0 dr_1 + \left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \right|_0 dg_1 \right] \\ &= r_{1_0} g_1(u_{i_0}, v_{i_0}) + r_{0_0} + dr_0 + g_1(u_{i_0}, v_{i_0}) dr_1 \\ &\quad + \left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_0} \right|_0 da_0 + \left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_1} \right|_0 da_1 \\ &\quad + \left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial a_2} \right|_0 da_2 + \left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial a_3} \right|_0 da_3 \\ &\quad + \left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_4} \right|_0 da_4 + \left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial a_5} \right|_0 da_5 \end{aligned} \quad (5.9)$$

mit z.B.:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial g_1} \frac{\partial g_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_0} \right|_0 da_0 = \frac{\partial h(r_{0_0}, r_{1_0}, g_1(u_{i_0}, v_{i_0}))}{\partial g_1(u_{i_0}, v_{i_0})} \frac{\partial g_1(u_{i_0}, v_{i_0})}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_0} \Big|_0 da_0$$

und

$$\frac{\partial u}{\partial a_0} = x_{i_0}$$

Für die Beobachtungen i mit Grauwert $g_1(x_i, y_i)$ ergibt sich somit die Designmatrix A der Größe $n \times 8$. Beispiel $A_{i,3}$ zeigt eine ausführliche Darstellung der Herleitung. Bei allen anderen Spalten ist lediglich das Ergebnis angegeben.

$$\begin{aligned} A_{i,1} &= 1 \\ A_{i,2} &= g_1(u_{i_0}, v_{i_0}) \\ A_{i,3} &= \underbrace{\frac{\partial h(r_{0_0}, r_{1_0}, g_1(u_{i_0}, v_{i_0}))}{\partial g_1(u_{i_0}, v_{i_0})}}_{r_{1_0}} \underbrace{\frac{\partial g_1(u_{i_0}, v_{i_0})}{\partial u}}_{g_{1u}(u_{i_0}, v_{i_0})} \underbrace{\frac{\partial u}{\partial a_0}}_{x_{i_0}} \\ &= r_{1_0} \cdot g_{1u}(u_{i_0}, v_{i_0}) \cdot x_{i_0} \\ A_{i,4} &= r_{1_0} \cdot g_{1u}(u_{i_0}, v_{i_0}) \cdot y_{i_0} \\ A_{i,5} &= r_{1_0} \cdot g_{1v}(u_{i_0}, v_{i_0}) \cdot x_{i_0} \\ A_{i,6} &= r_{1_0} \cdot g_{1v}(u_{i_0}, v_{i_0}) \cdot y_{i_0} \\ A_{i,7} &= r_{1_0} \cdot g_{1u}(u_{i_0}, v_{i_0}) \\ A_{i,8} &= r_{1_0} \cdot g_{1v}(u_{i_0}, v_{i_0}) \end{aligned} \quad (5.10)$$

In Gleichung 5.9 erfolgte die Linearisierung und somit die Berechnung der Koeffizienten nur mit Hilfe des Bildes g_1 . Dadurch stammen die zum Aufbau der Designmatrix A verwendeten Grauwerte ausschließlich vom Bild g_1 ab. Die Erfahrung im Umgang mit der Methode hat gezeigt, dass durch die Hinzunahme der Grauwerte des zweiten Bildes die KQZ effizienter arbeitet. Durch die zusätzlichen Grau- bzw. Gradientenwerte des Bildes g_2 beim Aufbau der Designmatrix profitiert das Konvergenzverhalten der KQZ. Im folgenden gilt somit der Ansatz:

$$\begin{aligned} g_1(x_i, y_i) - n_1(x_i, y_i) &= f(x_i, y_i) \\ g_2(x_i, y_i) - n_2(x_i, y_i) &= \underbrace{r_1 \cdot f(u_i, v_i)}_{h(r_0, r_1, f)} + r_0 \end{aligned} \quad (5.11)$$

mit

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 \\ a_2 & a_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}$$

Bei der Linearisierung ergibt sich dann:

$$\begin{aligned} h(r_0, r_1, f) &= h(r_0, r_1, f)|_0 + \left. \frac{\partial h}{\partial r_0} \right|_0 dr_0 + \left. \frac{\partial h}{\partial r_1} \right|_0 dr_1 \\ &+ \left. \frac{\partial h}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_0} \right|_0 da_0 + \left. \frac{\partial h}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_1} \right|_0 da_1 \\ &+ \left. \frac{\partial h}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial a_2} \right|_0 da_2 + \left. \frac{\partial h}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial a_3} \right|_0 da_3 \\ &+ \left. \frac{\partial h}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial a_4} \right|_0 da_4 + \left. \frac{\partial h}{\partial f} \frac{\partial f}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial a_5} \right|_0 da_5 \end{aligned}$$

Zum Aufstellen der Designmatrix A benötigt man jetzt die Funktionswerte $f(u_i, v_i)$ sowie deren Gradienten $f_u(u_i, v_i)$ bzw. $f_v(u_i, v_i)$. Bislang entstand der Funktionswert von f aus den Grauwerten des Bildes g_1 (siehe

Gleichung 5.11). Sind beide Bilder in die Berechnung der Designmatrix A einbezogen besteht die Möglichkeit den Wert der Funktion f auf zwei Möglichkeiten zu berechnen:

$$f(u_i, v_i) = \frac{g_2(x_i, y_i) - r_0}{r_1} \quad (5.12)$$

oder

$$f(u_i, v_i) = g_1(u_i, v_i) \quad (5.13)$$

Zur Berechnung des Grauwertes von f an der Stelle (u_i, v_i) bietet sich somit das arithmetische Mittel an. Der Funktionswert f ist somit definiert durch:

$$f(u_i, v_i) = \frac{1}{2} \left(g_1(u_i, v_i) + \frac{g_2(u_i, v_i) - r_0}{r_1} \right)$$

Für die Berechnung der Gradienten f_u bzw. f_v benötigt man somit noch die Grauwerte der Gradienten im Bild g_2 . Aus Gleichung 5.12 folgt:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(u_i, v_i)}{\partial u} &= \frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{g_2(x_i, y_i) - r_0}{r_1} \right) \\ \Leftrightarrow \frac{\partial f}{\partial u} &= \frac{1}{r_1} \cdot \frac{\partial g_2(x_i, y_i)}{\partial u} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Aus

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 \\ a_2 & a_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}$$

folgt

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \frac{1}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \begin{pmatrix} a_3 & -a_1 \\ -a_2 & a_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_i - a_4 \\ v_i - a_5 \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

Zur Berechnung von $\frac{\partial g_2}{\partial x}$ benötigt man noch $\frac{\partial x}{\partial u}$ und entsprechend die restlichen Ableitungen:

Mit

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \cdot (a_3 u_i - a_1 v_i - a_3 a_4 + a_1 a_5) \\ y &= \frac{1}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \cdot (-a_2 u_i - a_0 v_i - a_2 a_4 + a_0 a_5) \end{aligned}$$

folgt

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial u} &= \frac{a_3}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \\ \frac{\partial y}{\partial u} &= \frac{-a_2}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \\ \frac{\partial x}{\partial v} &= \frac{-a_1}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \\ \frac{\partial y}{\partial v} &= \frac{a_0}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \end{aligned} \quad (5.16)$$

Für $\frac{\partial f}{\partial u}$ ergibt sich mit Gleichung 5.14 und 5.16:

$$\frac{\partial f}{\partial u} = \frac{1}{r_1} \cdot \left[\frac{\partial g_2(x_i, y_i)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial u} + \frac{\partial g_2(x_i, y_i)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial u} \right]$$

Also

$$f_u(u_i, v_i) = \frac{1}{r_1} \cdot \frac{a_3 g_{2x}(x_i, y_i) - a_2 g_{2y}(x_i, y_i)}{a_0 a_3 - a_1 a_2}$$

entsprechend

(5.17)

$$f_v(u_i, v_i) = \frac{1}{r_1} \cdot \frac{-a_1 g_{2x}(x_i, y_i) + a_0 g_{2y}(x_i, y_i)}{a_0 a_3 - a_1 a_2}$$

Mit Gleichung 5.17 und Gleichung 5.13 gilt für $f(u_i, v_i)$, $f_u(u_i, v_i)$ und $f_v(u_i, v_i)$ somit

$$\begin{aligned} f(u_i, v_i) &= \frac{1}{2} \left(g_1(u_i, v_i) + \frac{g_2(u_i, v_i) - r_0}{r_1} \right) \\ f_u(u_i, v_i) &= \frac{1}{2} \left(g_{1u}(u_i, v_i) + \frac{1}{r_1} \cdot \frac{a_3 g_{2x}(x_i, y_i) - a_2 g_{2y}(x_i, y_i)}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \right) \\ f_v(u_i, v_i) &= \frac{1}{2} \left(g_{1v}(u_i, v_i) + \frac{1}{r_1} \cdot \frac{-a_1 g_{2x}(x_i, y_i) + a_0 g_{2y}(x_i, y_i)}{a_0 a_3 - a_1 a_2} \right) \end{aligned} \quad (5.18)$$

mit

$$\begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 \\ a_2 & a_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_4 \\ a_5 \end{pmatrix}$$

Zum Aufbau der Designmatrix wird in Gleichung 5.11 g_1 , g_{1u} und g_{1v} durch die entsprechenden Werte von f , f_u und f_v ersetzt. Der Schätzprozess ist somit unter Verwendung der Bilder g_1 und g_2 durchführbar.

5.2.3 Genauigkeitsabschätzung der Verschiebungsparameter

Für die Betrachtung der Genauigkeitsänderungen der Punktübertragung unter dem Einfluss der Kompression benötigt man einen speziellen Fall des soeben aufgeführten Schätzprozesses. Setzt man in der obigen Gleichung alle Parameter außer a_4 und a_5 auf neutrale Werte fest (0 für r_0 , a_1 und a_2 , bzw. 1 für r_1 , a_0 und a_3), so erhält man einen Schätzprozess, der lediglich die Verschiebungen bestimmt. Die geometrische Transformation dieses Matching-Prozesses lautet nach [Förstner 1993] folgendermaßen:

$$\begin{aligned} u_i &= x_i - a_4 \\ v_i &= y_i - a_5 \end{aligned}$$

Zwischen zwei betrachteten Zuordnungsfenstern wird somit eine Verschiebung (a_4 , a_5) berechnet. Die Normalgleichung ergibt sich in diesem Fall zu

$$\mathbf{N} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{h}$$

mit der Normalgleichungsmatrix

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m f_{x_i}^2 & \sum_{i=1}^m f_{x_i} f_{y_i} \\ \sum_{i=1}^m f_{x_i} f_{y_i} & \sum_{i=1}^m f_{y_i}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{12} & N_{22} \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

und der rechten Seite (\mathbf{h})

$$\mathbf{h} = - \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m f_{x_i} \cdot \Delta g_i \\ \sum_{i=1}^m f_{y_i} \cdot \Delta g_i \end{pmatrix}$$

Für

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \Delta \hat{a}_4 \\ \Delta \hat{a}_5 \end{pmatrix}$$

ergibt sich die Kofaktorenmatrix der Unbekannten zu

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}^{-1} = \frac{1}{N_{11}N_{22} - N_{12}N_{21}} \begin{pmatrix} N_{22} & -N_{12} \\ -N_{12} & N_{11} \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

Ebenso erhält man einen geschätzten Wert für die Varianz der Unbekannten¹.

$$\hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{m-2} \cdot \sum_{i=1}^m [g(x_i, y_i) - f(x_i - \hat{a}_4, y_i - \hat{a}_5)]^2$$

Mit Gleichung 5.19 und 5.20 kann die Kovarianzmatrix der Unbekannten berechnet werden:

$$\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_n^2 \cdot \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\sigma}_n^2 \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m f_{x_i}^2 & \sum_{i=1}^m f_{x_i} f_{y_i} \\ \sum_{i=1}^m f_{x_i} f_{y_i} & \sum_{i=1}^m f_{y_i}^2 \end{pmatrix}^{-1} \quad (5.21)$$

Unter der Annahme, dass der erwartete Mittelwert der Gradienten für die x- bzw. y-Richtung gleich Null ist, ergeben sich die folgenden Varianzen:

$$\begin{aligned} \sigma_{f_x}^2 &:= \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m f_{x_i}^2 = \frac{N_{11}}{m} \\ \sigma_{f_y}^2 &:= \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m f_{y_i}^2 = \frac{N_{22}}{m} \end{aligned}$$

und

$$\sigma_{f_x f_y} := \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m f_{x_i} f_{y_i} = \frac{N_{12}}{m}$$

Für Gleichung 5.21 ergibt sich dann

$$\mathbf{K}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \frac{\hat{\sigma}_n^2}{m} \begin{pmatrix} \sigma_{f_x}^2 & \sigma_{f_x f_y} \\ \sigma_{f_x f_y} & \sigma_{f_y}^2 \end{pmatrix}^{-1} \quad (5.22)$$

Diese Gleichung wird in Kapitel 4 vorausgesetzt.

5.3 Eigenschaften und Erweiterungen der KQZ

Bei der hier für die Untersuchungen verwendeten Kleinsten-Quadrate-Zuordnung handelt es sich um ein in einigen Punkten erweitertes Verfahren. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben diese Erweiterungen im Einzelnen. Neben der Grob-zu-Fein Strategie, der Strategie der variablen Fenstergrößen, der Positionsvorhersage und der gewählten Methode zur Mehrfach-Bildübertragung ist auch die implementierte Selbstkontrolle des Verfahrens näher erklärt. Die Standardbedingungen, welche grundsätzlich bei jeder Übertragung getestet werden, sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit jeden dieser Parameter zum Zeitpunkt der Ausführung der KQZ zu setzen.

¹ Die Varianz der Unbekannten ist hier identisch mit der Varianz des Rauschens.

Parameter	Wert	
Fenstergröße des Matchingverfahrens	21 * 21	Pixel
Maximale Iterationszahl	25	Iterationen
Konvergenzbedingung der zu schätzenden Parameter	0,01	Pixel
Minimalwert der Korrelation	0,5	
Maximale Abweichung bei Selbstkontrolle	0,1	Pixel

Tabelle 5.1: Standardparameter der KQZ

5.3.1 Punktübertragung mit Selbstkontrolle

Bei der Übertragung eines Punktes kann i.A. mit einer theoretischen Genauigkeit von ca. 0,1 Pixel der Stereopartner identifiziert werden. Durch die unterschiedlichsten Einflüsse, die innerhalb eines Bildpaares auftreten können, wird die Übertragung eines Punktes ungenauer und kann schließlich sogar unmöglich werden. Diese Einflüsse können von den verschiedensten Ursachen herrühren:

- So kann bereits das in den Bildern enthaltene Rauschen die Übertragung derart stören, dass die Übertragung in der Qualität leidet oder überhaupt unmöglich wird.
- Werden Bilder zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen, können Unterschiede der Lichtverhältnisse zu differenten Bildinhalten (Grauwertdifferenzen, z.B. Schattenbereiche entstehen oder dunkle Bereiche werden ausgeleuchtet) führen, die dann ebenfalls eine korrekte Übertragung verhindern.
- Eine weitere Ungenauigkeit kann durch das Messen an einer 3D-Diskontinuität, z.B. einer Dachkante entstehen. Normalerweise kann das LSM-Verfahren aufgrund der sehr verschiedenen Bildinhalte (entstanden aus den verschiedenen Blickwinkeln der Aufnahmen) einen solchen Punkt nicht zuordnen. Erfolgt dennoch die Übertragung, liegt der gemessene Punkt meistens weder am Boden noch direkt an der Dachkante. Durch das Verfahren wird ein solcher Punkt meistens in die mittlere Höhe, d.h. die Position des Punktes wird deutlich neben die richtige, erwartete Pixelposition gesetzt.

Alle aufgezählten Beispiele weisen darauf hin, dass die tatsächlich erreichte Messgenauigkeit deutlich hinter der aus theoretischer Sicht erwarteten Genauigkeit zurückbleiben kann. Um nun das Übertragungsergebnis sicherer zu gestalten, wird eine Hin- und Rückübertragung des gesuchten Punktes durchgeführt. Abbildung 5.1 zeigt den Algorithmus der sogenannten KQZ mit Selbstkontrolle.

Zunächst erfolgt die Übertragung eines Punktes ausgehend vom Start-Bild (Master-Bild) in herkömmlicher Weise. Der dann im Stereopartner (Slave-Bild) berechnete Punkt muss alle Standard-LSM-Bedingungen erfüllen; d.h. der Wert des Kreuzkorrelationskoeffizienten muss einen Mindestwert überschritten haben. Das Abbruchkriterium für die geschätzten Parameter muss erfüllt sein. Normalerweise würde ein solcher Punkt jetzt in die Liste der zugeordneten Punktpaare aufgenommen werden. In dem neuen Verfahren mit Selbstkontrolle wird der im Slave-Bild berechnete Punkt in das Master-Bild zurückübertragen. Auch diese Übertragung unterliegt erneut den üblichen Abbruchkriterien. Wird auch dieser Schritt erfolgreich absolviert, greift die letzte Bedingung dieses hier verwendeten Verfahrens. In diesem letzten Schritt werden die Koordinaten des Start- und des rückübertragenen Punktes im Master-Bild verglichen; d.h. die Startkoordinaten der Übertragung werden mit den aus der Rückübertragung erhaltenen Koordinaten verglichen. Weichen die betrachteten Koordinaten entweder in x- oder y-Richtung um einen Wert größer als eine zuvor festgelegte Schranke ab, so wird dieser Punkt und somit dieses homologe Punktpaar nicht in die Liste der erfolgreich übertragenen Punkte aufgenommen, obwohl jede Einzelübertragung (Hin- bzw. Rückübertragung) an sich erfolgreich durchgeführt wurde. Für die erwähnte Schranke wird die theoretische Genauigkeit des LSM-Verfahrens, also 0,1 Pixel, gefordert. Somit werden nur Punkte in die Liste der homologen Punkte aufgenommen, deren rückübertragene Koordinaten weniger als 0,1 Pixel von den Startkoordinaten abweichen. Abbildung 5.2 veranschaulicht das Kriterium der Selbstkontrolle. Es sei hier noch erwähnt, dass durch die Einführung dieser Kontrolle die Qualität der homologen Punktpaare steigt, jedoch kann auch mit diesem Verfahren nicht jede Fehlzuordnung erkannt und eliminiert werden. In Kapitel 6 und 7 kann bei Betrachtung der Übertragungsquoten und -genauigkeit sehr gut nachvollzogen werden, dass durch den Einsatz der Selbstkontrolle auf Kosten der Übertragungsquote die Qualität der homologen Punktpaare gesteigert wird. Zusätzlich zeigt Tabelle 5.2, dass bereits eine Erhöhung

/* KQZ mit Selbstkontrolle */

/* Standardübertragung */

```

Übertrage Punkt( $X_M, Y_M$ ) vom Masterbild in das Slavebild;
if [( $Iter \leq Iter_{Max}$ ) && (Abbruchkriterien erfüllt) && (Korrelation  $\geq$  Korrelation $_{Min}$ )]
{
    Speichere das Ergebnis in Punkt( $X_S, Y_S$ );
}
else
{
    Abbruch der Übertragung  $\Rightarrow$  nächster Punkt;
}

```

/* Selbstkontrolle, Teil 1 */

```

Übertrage Punkt( $X_S, Y_S$ ) vom Slavebild in das Masterbild;

```

/* Rückübertragung erfolgreich? */

```

if [( $Iter \leq Iter_{Max}$ ) && (Abbruchkriterien erfüllt) && (Korrelation  $\geq$  Korrelation $_{Min}$ )]
{

```

/* Selbstkontrolle, Teil 2 */

```

    Speichere das Ergebnis in Punkt( $X_{M'}, Y_{M'}$ );

```

/* Ermittle Genauigkeit */

```

 $\Delta X_M = |X_M - X_{M'}|;$ 

```

```

 $\Delta Y_M = |Y_M - Y_{M'}|;$ 

```

```

if [( $\Delta X_M \leq Schranke$ ) && ( $\Delta Y_M \leq Schranke$ )]
{

```

/* Übertragung mit Selbstkontrolle erfolgreich */

```

    Speichere das Punktpaar [( $X_M, Y_M$ ), ( $X_S, Y_S$ )];
}
else
{

```

/* fehlerhafte Übertragung */

```

    nächster Punkt;
}
}

```

Abbildung 5.1: Algorithmus der KQZ mit Selbstkontrolle

der Toleranz bei der Rückübertragung zu einer deutlichen Verschlechterung der Qualität führt. Durch die Verringerung der geforderten Genauigkeit von 0,1 auf 0,3 Pixel nimmt auch die dargestellte Höhengenaugkeit deutlich ab. So verdoppelt sich z.B. der Mittelwert der berechneten Höhendifferenz nahezu.

5.3.2 Grob-zu-Fein Strategie

Ein sehr beschränkender Faktor ist der mit ± 2 Pixel sehr klein ausfallende Konvergenzradius des LSM-Verfahrens. Da im allgemeinen die vorhandenen Näherungswerte diesen Qualitätsanspruch nicht erfüllen können, muss der Konvergenzradius durch den Einsatz einer geeigneten Methode erweitert werden. Hierzu wird üblicherweise die Grob-zu-Fein Strategie verwendet. Mit Hilfe von Bildpyramiden kann der Konvergenzradius erweitert werden. Abbildung 5.3 veranschaulicht die Methode. Zunächst wird zu jedem Stereobild die zugehörige

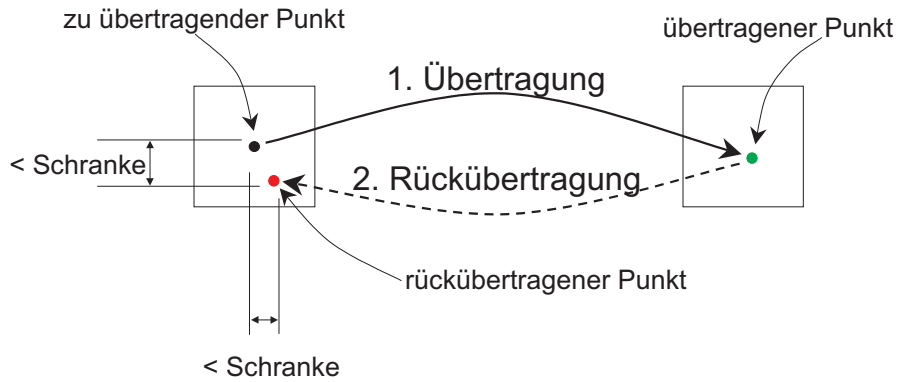


Abbildung 5.2: Das Prinzip der Selbstkontrolle

Bedingung	DHM - Differenz [m]			
	Maskengröße	Mittelwert	RMSE ²	STDABW ³
0.1	21x21	0,30	0,53	0,44
	41x41	0,40	0,65	0,52
0.3	21x21	0,78	1,44	1,22
	41x41	0,86	1,36	1,05

Tabelle 5.2: Veränderung der Genauigkeit bei Lösen der Rückübertragungsbedingung

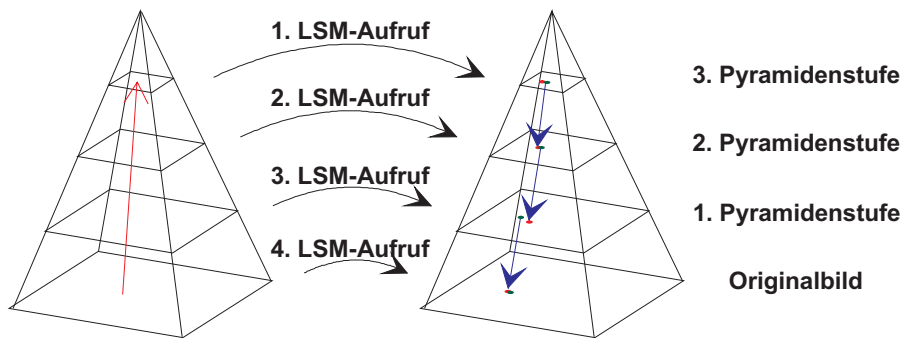


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Grob-zu-Fein Prinzips

Pyramide berechnet. Ausgehend vom Originalbild wird zunächst das erste Bild der Pyramide berechnet, indem die Auflösung in x- und y-Richtung halbiert wird⁴. Vor der Reduktion wird üblicherweise noch ein Tiefpassfilter (z.B. Gauß-Filter) auf das zu reduzierende Bild angewandt. Dadurch wird zum einen das hochfrequente Rauschen unterdrückt, und zum anderen wird die Information der benachbarten Pixel in das reduzierte Bild einbezogen. Ist die erste Bildpyramide bestimmt, erfolgt aus dieser die Berechnung des zweiten Pyramidenbildes analog. Mit jeder erzeugten Pyramidenstufe erweitert sich der Konvergenzradius des LSM-Verfahrens um den Faktor 2. Die Anzahl der benötigten Pyramidenstufen berechnet sich somit folgendermaßen: Beträgt die Qualität der zur Verfügung stehenden Näherungswerte z.B. ± 30 Pixel, werden zur korrekten Ausführung des LSM-Verfahrens das Originalbild und vier Pyramidenbilder benötigt. Diese ergeben dann einen Konvergenzradius von $2 \cdot 2^4 = 2^5 = 32$ Pixel. Mit anderen Worten, der Konvergenzradius beträgt 2^n Pixel, wobei n die Anzahl der Bilder darstellt, die die Bildpyramide enthält [Baltasvias 1991].

² RMSE: Root Mean Square Error, mittelwertbehaftete Abweichung (RMSE biased, siehe auch Anhang B.1)

³ STDABW: mittelwertfreie Standardabweichung (RMSE unbiased, siehe auch Anhang B.2)

⁴ Üblicherweise wird der Reduktionsfaktor r mit 2,0 gewählt. Grundsätzlich sind auch andere Reduktionsfaktoren möglich.

Dabei ist zu beachten, dass die oberste Pyramidenstufe noch eine ausreichende Größe besitzt. Die Bilder dieser Stufe sollten noch eine Größe von mindestens $150 * 150$ Pixel haben, da ansonsten nicht mehr sinnvoll mit ihnen gearbeitet werden kann.

/* Die Grob-zu-Fein Strategie */

```

/* Näherungswerte im Master- und Slave-Bild berechnen */
for (i = Grundstufe; i < höchste Stufe - 1; i++)
{
    /* Koordinaten  $X_M(i)$  bzw.  $Y_M(i)$  berechnen */

    
$$X_M(i + 1) = \frac{X_M(i)}{\text{Reduktionsfaktor;}}$$


    
$$Y_M(i + 1) = \frac{Y_M(i)}{\text{Reduktionsfaktor;}}$$

}

/* Beginne in oberster Stufe und rechne bis zur Grundstufe */
for (i = höchste Stufe - 1; i ≥ Grundstufe; i--)
{
    Übertrage Punkt ( $X_M(i), Y_M(i)$ ) in das Slave - Bild
    mit Näherungswert Punkt ( $X_S(i), Y_S(i)$ );
    if (Übertragung korrekt)
    {
        if (i > höchste Stufe)
        {
            
$$X_S(i - 1) = X_S(i) * \text{Reduktionsfaktor;}$$

            
$$Y_S(i - 1) = Y_S(i) * \text{Reduktionsfaktor;}$$

        }
    }
    else
    {
        Abbruch;
    }
}
if (letzte Übertragung erfolgreich)
{
    SpeicheredasPunktpaar [( $X_M(0), Y_M(0)$ ), ( $X_S(0), Y_S(0)$ )];
}
nächsterPunkt;

```

Abbildung 5.4: Algorithmus der Grob-zu-Fein Strategie

Wie erfolgt nun die Übertragung eines Punktes mit Hilfe der Grob-zu-Fein Strategie? Zunächst werden die gegebenen Startpositionen des Master- und Slave-Bildes in die oberste Pyramide projiziert. Dabei gilt für die Änderung eines Näherungswertes unter Verwendung eines Reduktionsfaktors von 2,0 folgendes: Beträgt z.B. der Abstand in x-Richtung eines Näherungswertes 30 Pixel in der originalen Auflösung, so beträgt er in der ersten Pyramidenstufe bereits nur noch halb soviel, also 15 Pixel. Setzt man dies fort, so folgt für die zweite Pyramide ein Abstand von 7,5 Pixel, für die dritte 3,75 Pixel und für die vierte und hier letzte Pyramide schließlich ein Abstand von 1,875 Pixel. In der vierten Pyramidenstufe kann somit mit Hilfe des LSM-Verfahrens dieser Punkt übertragen und bis auf ca. ein zehntel Pixel genau an die richtige Lösung herangeführt werden. Anschließend wird die auf dieser Pyramidenebene gefundene Position im Slave-Bild auf die darunterliegende Pyramide transformiert, d.h. bei dem hier gewählten Reduktionsfaktor von 2,0 werden nun die x- und y-Koordinatenwerte einfach verdoppelt. War in der Ausgangssituation der Näherungswert noch 3,75 Pixel von der Lösung entfernt, so liegt er nun im Idealfall nur noch wenige zehntel Pixel von der richtigen Lösung entfernt. Nun wird erneut das LSM-Verfahren durchgeführt. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis man bei der Originalauflösung, al-

so dem untersten Bild der Pyramiden angekommen ist und ein abschließender Aufruf des LSM-Verfahrens die Position des gesuchten Punktes berechnet hat. Der Algorithmus dieser Vorgehensweise ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

5.3.3 Strategie der variablen Fenstergrößen

Setzt man das LSM-Verfahren z.B. zur Berechnung eines dichten Punktnetzes für die DGM-Generierung ein, benötigt man zum einen eine sehr hohe Übertragungsquote, zum anderen müssen die erfolgreich übertragenen Punkte flächendeckend über das Bild verteilt liegen. Die Höhe der Übertragungsquote hängt zunächst entscheidend von der Art und Qualität des verwendeten digitalen Bildmaterials ab. In Luftbildern, die in üblicher Flughöhe aufgenommen wurden, fällt die Übertragungsquote niedriger aus als in Bildern, die z.B. per Satellit aufgezeichnet wurden. Der Grund für diesen Unterschied liegt in der Bodenauflösung der Bilder. Im Luftbild kann die Pixelgröße durchaus 50 cm am Boden oder noch weniger entsprechen, während Bilder, die per Satellit oder Raumstation vom Weltraum aus aufgenommen wurden, derzeit noch eine deutlich geringere Auflösung besitzen (z.B. bei MOMS-2P 18 m bzw. 6 m pro Pixel). Somit enthalten diese Satellitenbilder noch deutlich weniger detaillierte Bildinformation. Hinzu kommt, dass durch die sehr hohe Fluglage die 3D-Information am Boden nur sehr gering ins Gewicht fällt. Aufgrund der hohen Flugposition wirkt sich der Umklappeffekt z.B. an Gebäuden nur sehr gering in den Bildern aus. Daher liefert das LSM-Verfahren eine höhere Erfolgsquote bei den Satellitenbildern. Seit dem 24. 9. 1999 (Start von Ikonos-2) können bereits Bodenauflösungen von 1 m vom Satellit erzielt werden, weitere hochauflösende Systeme werden folgen. Wie sich diese Bilder auf das Übertragungsergebnis des LSM-Verfahrens auswirken, bleibt abzuwarten, jedoch werden vermutlich auch mit diesen Bildern recht hohe Übertragungsquoten zu erreichen sein.

Unabhängig von der Art des Bilddatensatzes besteht nun das Ziel in der Steigerung der Quote der erfolgreich übertragenen Punkte. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einer Operatorgröße von $21 * 21$ Pixeln das LSM-Verfahren die genauesten Ergebnisse liefert; kombiniert mit einer sehr hohen Übertragungsquote (siehe auch Tabelle 5.3). Durch die Variation des Operatorfensters (z.B. auf $11 * 11$ Pixel) und die erneute Anwendung des LSM-Verfahrens auf zuvor nicht übertragene Punkte können weitere homologe Punktpaare zugeordnet werden. Verändert man nun ein weiteres Mal die Größe des benutzten Operatorfensters, so können erneut Punkte gefunden bzw. übertragen werden, die zuvor noch verworfen wurden. Abbildung 5.5 zeigt die Strategie nochmals schematisch. Ein Nachteil dieses Verfahrens liegt jedoch in der

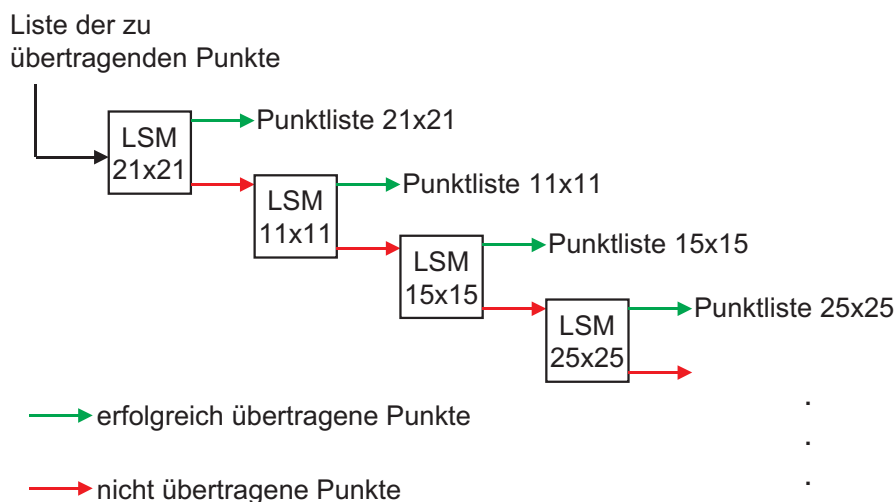


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Verwendung variabler Fenstergrößen

Qualität der gefundenen Punkte. Während die Verringerung des Fensters auf $11 * 11$ Pixel kleine Verluste in der Genauigkeit mit sich bringt, bewirkt die Vergrößerung des Operatorfensters auf z.B. $41 * 41$ Pixel eine deutliche Verschlechterung der Übertragungsqualität. Abbildung 5.3 zeigt die Genauigkeit in Abhängigkeit von der Größe des verwendeten Operatorfensters. Die dargestellten Genauigkeiten beziehen sich auf die Höhe in Metern der aus den homologen Punktpaaren berechneten Objektpunkte.

Maskengröße	DHM - Differenz [m]		
	Mittelwert	RMSE	STDABW
11x11	0,355	0,608	0,493
15x15	0,366	0,596	0,492
21x21	0,304	0,531	0,435
25x25	0,352	0,645	0,541
31x31	0,376	0,659	0,542
35x35	0,407	0,771	0,655
41x41	0,397	0,652	0,518

Tabelle 5.3: Veränderung der Übertragungsgenauigkeit bei Änderung des Operatorfensters

5.3.4 Positionsvorhersage

Verwendet man das LSM-Verfahren flächendeckend, so benutzt man oftmals ein regelmäßiges Raster mit einer zuvor festgelegten Maskenweite. Da es sich beim LSM-Verfahren um einen rechenintensiven Algorithmus handelt, wird durch den Einsatz der Grob-zu-Fein Strategie der Zeitaufwand nochmals deutlich erhöht. Dieser zusätzliche Zeitaufwand kann jedoch reduziert werden, indem der nächste benachbarte Punkt des Rasters näherungsweise im Stereopartner berechnet wird. Diese Berechnung kann mit den geschätzten Parametern der zuvor durchgeführten Punktübertragung erfolgen. Der daraus resultierende Näherungswert besitzt normalerweise eine Qualität, die im Bereich $\leq \pm 1$ Pixel liegt. Dies hat zur Folge, dass die Berechnung der endgültigen Position direkt auf den Originaldaten, ohne die Verwendung der Grob-zu-Fein Strategie durchgeführt werden kann. Dadurch kann eine hohe Zahl an LSM-Aufrufen (keine Pyramiden) und somit an Zeit eingespart werden. Abbildung 5.6 zeigt das Schema der Positionsvorhersage. Kann ein Punkt aufgrund eines zu schlechten

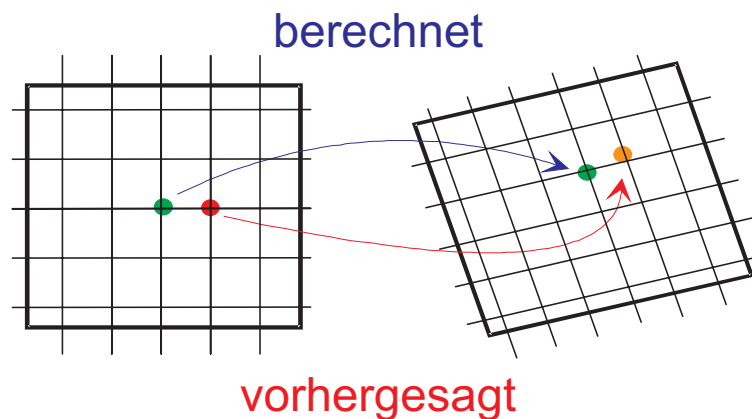


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Positionsvorhersage

Näherungswertes nicht übertragen werden, versucht man durch die Verwendung der Grob-zu-Fein Strategie den Punkt auf herkömmliche Weise zu übertragen. Schlägt auch dieser Versuch fehl, so kann aus der Übertragungsliste die vorgegebene Näherung verwendet und erneut der Versuch der Zuordnung gestartet werden. Gibt es aufgrund zuvor nicht übertragbarer Punkte keine berechneten Näherungswerte, wird ebenfalls der benötigte Wert aus der Startliste entnommen.

5.3.5 Multi-Image-Matching

Eine weitere Besonderheit des Verfahrens liegt in der Strategie der Mehrbildzuordnung. Ein Punkt muss nicht nur in seinen Stereopartner, sondern auch in andere Aufnahmen (Überlappung, Querbefliegung) übertragen werden können. Ebenso ist denkbar, dass durch eine Aufnahme zu einem anderen Zeitpunkt dasselbe Gebiet überflogen wurde. Auch dann ist es von Vorteil, wenn das Punktübertragungsverfahren über die Möglichkeit der Mehrbildzuordnung verfügt. Abbildung 5.7 zeigt den ersten Teil des strategischen Konzepts. Zunächst wird ausgehend vom Masterbild T der gesuchte Punkt paarweise in die anderen Bilder übertragen. Jede der Übertragungen erfolgt unabhängig von den anderen Übertragungen, d. h. jede Schätzung der Parameter des aktuell bearbeiteten Bildpaares erfolgt unabhängig von den übrigen Bildern. Kann in einzelnen Bildern die Übertra-

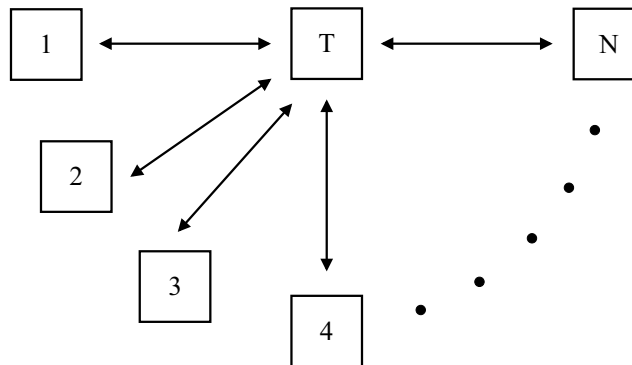


Abbildung 5.7: Ablaufschema der Multi-Image-Funktion

gung nicht erfolgreich beendet werden, erfolgt die Übertragung alternativ zwischen den bereits gefundenen homologen Punkten. Dies ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Hier sind aus der ersten Übertragung die zum Startpunkt gehörenden Punkte in den Bildern 1, 3 und N bereits erfolgreich identifiziert. Der noch nicht gefundene Punkt in Bild 2 wird nun durch die alternative Übertragungsmethode bestimmt, d. h. es wird versucht, die im ersten Lauf gefundenen Punkte aus den Bildern 1, 3 und N in das Bild 2 zu übertragen. Bei jeder erfolgreich durchgeführten Alternativübertragung wird die im Bild 2 gefundene Position gespeichert. Da bei dieser Methode durchaus mehrere verschiedene, jedoch sehr nahe beieinander liegende Punkte gefunden werden können, wird zum Abschluss der Übertragung der Mittelwert aus allen erfolgreich durchgeführten Hilfsübertragungen berechnet. Der so erhaltene Wert ergibt die Position des in Bild 2 gesuchten Punktes. Ist jede der alternativen Übertragungen erfolglos, so kann der Punkt in diesem Bild nicht identifiziert werden, und die Übertragung wird abgebrochen. Anhand des Ergebnisses kann genau nachvollzogen werden, in welches Bild bzw. welche Bilder der Punkt nicht übertragen werden konnte. Eine algorithmische Beschreibung der Mehrbildzuordnung zeigt Abbildung 5.9.

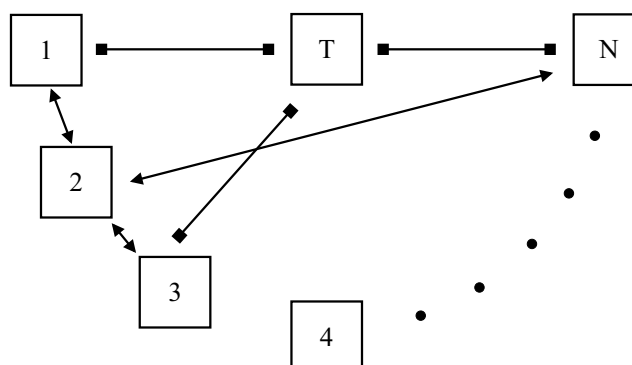


Abbildung 5.8: Alternative Suche des zu übertragenden Punktes

```

/* Multi-Image-Matching */

/* erster Übertragungsversuch */
for(i = 0; i < N - 1; i++)
{
    Übertrage Punkt (XMaster, YMaster) in das Bild(i);
    if (erfolgreiche Übertragung)
    {
        speichere Punkt (XSlave(i), YSlave(i));
    }
    else
    {
        kennzeichne Bild(i) als fehlerhaft übertragen;
    }
}

/* versuche restliche Bilder zu übertragen */
if (nicht alle Bilder erfolgreich übertragen)
{
    for(j = 0; j < N - 1; j++)
    {
        if (Bild(j) nicht erfolgreich übertragen)
        {
            zähler = 0; tempx = 0; tempy = 0;
            for(i = 0; i < N - 1; i++)
            {
                if (Bild(i) erfolgreich übertragen)
                {
                    ÜbertragePunkt (XSlave(i), YSlave(i)) in Bild(j);
                    if (erfolgreich übertragen)
                    {
                        tempx += XErgebnis;
                        tempy += YErgebnis;
                        zähler++;
                    }
                }
            }
            if (zähler > 0)
            {
                XSlave(j) =  $\frac{\text{temp}_x}{\text{zähler}}$ ;

                YSlave(j) =  $\frac{\text{temp}_y}{\text{zähler}}$ ;

                kennzeichne Bild(j) als erfolgreich übertragen;
            }
        }
    }
}

```

Abbildung 5.9: Algorithmus des Multi-Image-Matching

Kapitel 6

Einfluss der Kompression auf künstlich generierte Stereobilder

In diesem Kapitel soll der Einfluss der verschiedenen Kompressionsverfahren auf die Genauigkeit der digitalen Punktübertragung näher untersucht werden. Bei den Verfahren handelt es sich um die JPEG-, Wavelet- und fraktale Kompression. Jedes dieser Verfahren wird dabei auf drei verschiedene Typen von Bilddaten angewandt. Dadurch soll untersucht werden, ob das Ergebnis eines einzelnen Verfahrens von dem verwendeten Bildmaterial abhängig ist. Ebenso soll festgestellt werden, ob sich ein bestimmtes Kompressionsverfahren besser für ein bestimmtes Bildmaterial eignet, oder ob die Ergebnisse der einzelnen Verfahren völlig unabhängig vom gewählten Bildmaterial sind.

6.1 Die Bilddaten

Für die durchgeführte Untersuchung standen Bilddaten aus drei unterschiedlichen Aufnahmesystemen zur Verfügung. Bei diesen Systemen handelt es sich um die filmbasierte Kamera RMK Top der Firma Z/I Imaging, die DPA (Digitale Photogrammetrie Ausstattung) der DASA und die Kamera MOMS02 (Modularer Optoelektronischer Multispektraler Stereo Scanner), die seit April 1996 an der russischen Raumstation Mir am Modul Priroda installiert ist. Bei den beiden erstgenannten Systemen handelt es sich um Kameras, wie sie bei Luftbildbefliegungen verwendet werden. Allerdings unterscheiden sich die beiden Kameras in der Art der Speicherung des aufgenommenen Bildes und der Aufnahmegeometrie. Während die RMK Top in üblicher Weise einen Film belichtet, der später mit Hilfe eines hochauflösenden Scanners in digitale Form konvertiert wird, zeichnet die DPA mit Hilfe eines Zeilenscanners direkt zum Aufnahmezeitpunkt das Bild digital auf. Der bei der RMK Top notwendige Scanvorgang entfällt somit für die DPA-Daten. Die MOMS02-Kamera schließlich erfasst die Bilder in einer ähnlichen Art und Weise wie die DPA-Kamera, jedoch hat sie aufgrund ihrer Flughöhe eine deutlich geringere Bodenpunktauflösung als die beiden anderen verwendeten Kameras.

Am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart wurde zur Bewertung der DPA-Kamera ein Testgebiet sowohl mit der DPA-Kamera also auch mit einer RMK Top befliegen. Für die nachfolgende Untersuchung standen aus dieser Befliegung die Bilddaten beider Kameras zur Verfügung. Da für dieses Testgebiet keine MOMS-Bilddaten zur Verfügung standen, wurde für die Untersuchung ein Testgebiet in Bayern verwendet. Für die Ergebnisse der nachfolgenden Untersuchung ist die Verwendung eines anderen Testgebietes bei der MOMS02-Kamera nicht von Belang.

6.1.1 RMK Top - Bilder

Bei den verwendeten Bilddaten handelt es sich um ein Gebiet bei Mühlacker-Vaihingen in der Nähe von Stuttgart. Die Flughöhe zum Aufnahmezeitpunkt betrug ca. 2000 m über Grund, die verwendete Brennweite 153 mm. Das Bildmaterial (schwarz/weiß Film) wurde anschließend mit einem hochpräzisen Scanner (PS1 von Carl Zeiss) mit einer Auflösung von 15 μm digitalisiert. Somit ergibt sich eine Bodenpixelauflösung¹ von 20 cm.

¹ Auch bekannt unter ground sampling distance (GSD).

Um den Aufwand der Untersuchung zu begrenzen, wurde das Bildmaterial auf eine Auflösung von $60 \mu\text{m}$ reduziert und anschließend Ausschnitte mit $1500 * 1500$ Pixel Auflösung ausgewählt. Abbildung 6.1 zeigt einen kleinen Bereich eines verwendeten Bildes.



Abbildung 6.1: Bildausschnitt RMK Top

6.1.2 DPA - Bilddaten

Die Bilddaten der DPA und die Bilder der RMK Top stammen aus derselben Befliegung. Somit betrug die Flughöhe auch hier 2000 m über Grund. Die Kamera besitzt eine Auflösung von $10 \mu\text{m}$ pro Pixel und eine Brennweite von 80 mm . In diesem Fall beträgt die Auflösung am Boden 25 cm . Um gleiche Bedingungen für die Untersuchung zu erhalten, wurde auch hier die Auflösung auf $60 \mu\text{m}$ reduziert. Obwohl für die Untersuchung nicht von Bedeutung, wurde nahezu derselbe Ausschnitt mit $1500 * 1500$ Pixel verwendet. Abbildung 6.2 zeigt den gleichen Bereich wie Abbildung 6.1, jedoch wurde Abbildung 6.2 mit der DPA-Kamera aufgenommen.

6.1.3 MOMS-2P - Bilddaten

Die Bilddaten der MOMS02-Kamera² unterscheiden sich von den Daten der beiden anderen Kameras erheblich. Da die MOMS02-Kamera aus einer Höhe von $380 \text{ km} - 400 \text{ km}$ ihre Daten aufzeichnet, ist die Auflösung der Bilder deutlich reduziert gegenüber der RMK Top bzw. DPA-Kamera. MOMS02 verfügt über verschiedene Aufzeichnungsmodi, wobei hier nur Bildmaterial verwendet wird, das im Mode A aufgezeichnet wurde. Bei diesem Modus handelt es sich um den sogenannten Stereomodus, bei dem ein höher auflösender Nadir-Kanal und zwei weniger gut auflösende vorwärts- bzw. rückwärtsblickende Kanäle zum Einsatz kommen. Für die Untersuchung wurde nur das Bildmaterial des vorwärtsblickenden Kanals verwendet. Diese Kanäle besitzen eine Brennweite von 237 mm . Die Pixelgröße der Kamera beträgt $10 \mu\text{m}$. Somit ergibt sich eine Bodenpixelauflösung von ca. 17 m . Bei den aufgenommenen Daten handelt es sich um ein Gebiet nördlich der Städte Augsburg, München und Salzburg mit einer Ausdehnung von $178 \text{ km} * 50 \text{ km}$. Wie schon bei den beiden anderen Bilddatensätzen wurde auch hier ein Ausschnitt mit $1500 * 1500$ Pixel verwendet. Der in Abbildung 6.3 dargestellte Bereich des Testbildes zeigt den Flughafen München-Erding.

² Eine Zusammenstellung über weltraumgestützte Kameras ist in [Petrie 1998] gegeben.



Abbildung 6.2: Bildausschnitt DPA



Abbildung 6.3: Bildausschnitt MOMS, Flughafen München-Erding

6.2 Ziele der Untersuchung

Bei der nachfolgend beschriebenen Untersuchung soll der Einfluss der verschiedenen Kompressionsverfahren bzw. generell der Einfluss verlustbehafteter Kompression auf die Bildqualität und die damit verbundene Qualität der Punktübertragung aufgezeigt werden. Folgende zwei grundsätzlichen Modelle wurden verwendet:

Die Zuordnung erfolgt

1. zwischen dem Originalbild und der durch die verlustbehaftete Kompression veränderten Kopie.
2. unter Verwendung eines simulierten Stereo-Bildpaares. Dabei ist die geometrische Verschiebung der beiden Bilder zueinander bekannt. Auf beide Bilder wurde die verlustbehaftete Kompression angewandt.

Mit den beiden genannten Zuordnungsvoraussetzungen kann zum einen getestet werden, ob durch die Anwendung verlustbehafteter Kompression Strukturänderungen im Bild entstehen, die sich auf die geometrische Lagemessung auswirken (1.). Zum anderen kann mit Hilfe des simulierten Stereobildpaares der Einfluss der Kompressionsverfahren auf die Punktübertragung genau ermittelt werden (2.). Da hier nur eine bekannte geometrische Verschiebung zwischen den beiden Bildern vorhanden ist – im Gegensatz zum echten Stereobildpaar existieren keine projektiven Unterschiede – kann der Einfluss der Kompression auf die Genauigkeit der Übertragung bestimmt werden. Hier werden beide Bilder der Kompression unterzogen, wie dies auch bei Bildpaaren eines Luftbildblockes der Fall wäre.

Ein weiteres wichtiges Ziel stellt die maximale Größe des Kompressionsfaktors dar. Dabei bezieht sich in diesem Fall "maximal" nicht auf den maximal erreichbaren Kompressionsfaktor des jeweiligen Kompressionsverfahrens, sondern auf den größtmöglichen Kompressionsfaktor, bei dem noch die gewünschte Genauigkeit erreicht wird. Die Untersuchung wird sich daher auf den noch zu bestimmenden Bereich beschränken, bei dem die geforderte Genauigkeit bzw. der maximale Fehler bei der Punktübertragung nicht mehr als ca. 0,5 Pixel beträgt.

Für alle Kompressionsverfahren wird auch die Qualität der komprimierten Bilder beurteilt. Hierzu werden Differenzbilder für verschiedene Kompressionsfaktoren des jeweiligen Verfahrens erzeugt und der mittlere Fehler berechnet. Zusätzlich wird mit Hilfe des PSNR die Qualität der Bilder bestimmt. Aufgrund dieser Ergebnisse erfolgt dann die Bestimmung des Kompressionsbereiches, der für die Untersuchung verwendet wird.

6.3 Übertragungsbedingungen

Um den Einfluss der Kompressionsverfahren auf das Punktübertragungsergebnis zu überprüfen bzw. nachzuweisen, wurden simulierte Bildpaare für die Übertragung verwendet. Eventuell auftretende Fehler können somit nur aufgrund des Einflusses der Kompression in Form von Artefakten (z.B. bei JPEG: 8 * 8 Blöcke) oder in Form von Rauschen entstehen. Die Zuordnung erfolgte mit dem in Kapitel 5.2 und 5.3 beschriebenen LSM-Verfahren.

6.3.1 Simulierte Bildpaare

Die Punktübertragung wurde bei der Untersuchung mit zwei verschiedenen Bildpaarkombinationen durchgeführt. Dabei handelt es sich um die folgenden zwei Kombinationstypen:

Durchführung der Punktübertragung zwischen

- I dem unveränderten Bild I_1 und dem mit dem jeweiligen Verfahren zunächst komprimierten (C) und anschließend wieder dekomprimierten (D) Bild I_2 :

$$I_2 = DC(I_1)$$

- II dem Bild I_2 und dem um einen Pixel versetzt ausgeschnittenen und anschließend ebenfalls komprimierten und dekomprimierten Bild I_4 :

$$I_4 = DC(I_3), \text{ mit } I_3 = I_1(x + d), (y + d)$$

Zur Verdeutlichung der beiden Kombinationstypen dienen die nachfolgenden Abbildungen. Abbildung 6.4 zeigt die Übertragungsmethode für Fall I. Ausgehend von einem nicht komprimierten Bild I_1 wird der Punkt in das durch die Kompression aus I_1 erzeugte Bild I_2 übertragen. Anschließend wird der dann erhaltene Punkt vom Bild I_2 wieder zurück in das Bild I_1 übertragen (vgl. Kapitel 5.3.1 Übertragungsmodul, Eigenschaften). Da es sich beim Bild I_1 um das unveränderte Originalbild handelt, kann der Einfluss des jeweiligen Kompressionsverfahrens auf die Genauigkeit der Punktübertragung (Lage des Bildpunktes) ermittelt werden. Bei zunehmender Kompressionsrate wird auch eine Zunahme des Fehlers bei der Übertragung erwartet.

Um diesen Einfluss auf die Bildpaarzuordnung sichtbar zu machen, erfolgt die Punktübertragung mit der zweiten verwendeten Bildkombination. Abbildung 6.5 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Das in der Abbildung mit I_3 gekennzeichnete Bild ist um genau ein Pixel³ in vertikaler und horizontaler Richtung versetzt gegenüber Bild

³ Dadurch befindet sich die gesuchte Position innerhalb des Konvergenzbereiches der kleinsten Quadrate Zuordnung.

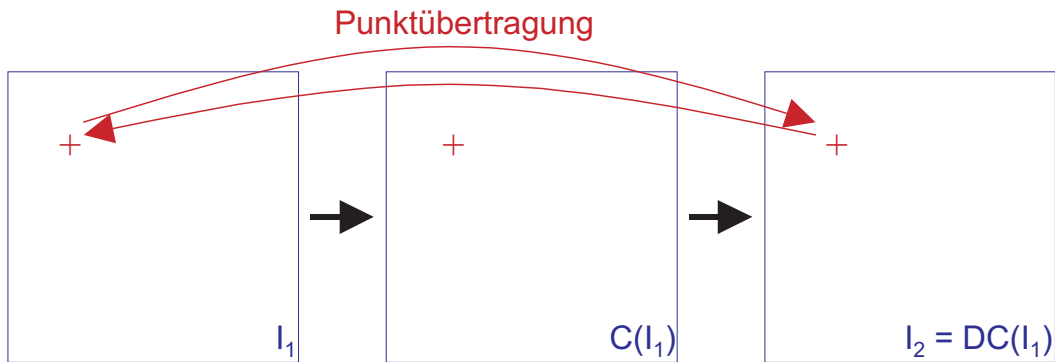


Abbildung 6.4: Übertragung vom Originalbild I_1 in das durch den Einfluss der Kompression verlustbehaftete Bild I_2

I_1 ausgeschnitten; d.h. der Punkt $P(x_1, y_1)$ im unkomprimierten Bild I_1 befindet sich im unkomprimierten Bild I_3 an der Stelle $Q(x_3, y_3) = Q(x_1 + d, y_1 + d)$ mit $x_3 = x_1 + d$, $y_3 = y_1 + d$. Nun wird jedes der beiden Bilder komprimiert und anschließend wieder dekomprimiert. Somit entstehen die Bilder $I_2 = DC(I_1)$ und $I_4 = DC(I_3)$. Diese enthalten nun die typischen durch das jeweilige Kompressionsverfahren erzeugten Strukturen an verschie-

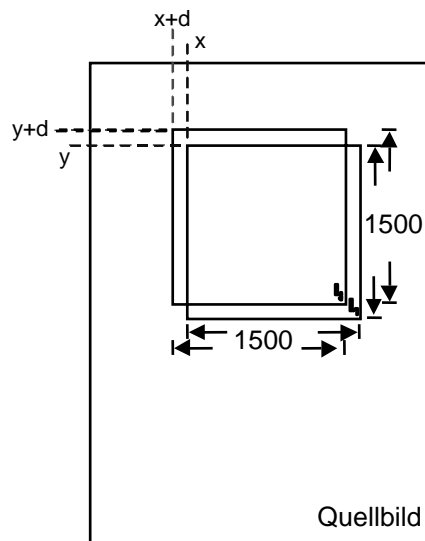


Abbildung 6.5: Darstellung des Verhältnisses zwischen Bild I_1 und Bild I_3

denen Stellen in den beiden Bildern. Am Beispiel der JPEG-Komprimierung lässt sich dieser Effekt sehr schön verdeutlichen. Bei zunehmender Kompressionsrate werden beim JPEG-Verfahren sogenannte Block-Artefakte immer deutlicher sichtbar. Sie entstehen aufgrund der typischer Weise verwendeten 8×8 Pixel großen JPEG-Blöcke bei der Komprimierung. Da die Bilder I_1 und I_3 um einen Pixel versetzt zueinander ausgeschnitten sind, ist nach der Kompression der Bildinhalt gegenüber den Block-Artefakten um ein Pixel versetzt (siehe Abbildung 6.6 I_2, I_4). Für die Punktübertragung ist nun folgendes zu erwarten: Mit zunehmender Kompression verliert die ursprüngliche Bildinformation ihren Einfluss auf das Übertragungsergebnis, während die Block-Artefakte ständig an Einfluss gewinnen. Mit anderen Worten: Die Übertragung folgt den Block-Artefakten und der gesuchte Punkt wird nicht an die richtige Stelle $Q(x_1 + d, y_1 + d)$, sondern an die Stelle $Q(x_1, y_1)$ übertragen. Da bei dieser Untersuchung nur Kompressionsfaktoren bis zu einem gewissen Bereich betrachtet werden, tritt der Fall, dass die Punktübertragung ganz auf die Block-Artefakte läuft nicht auf. Für die Untersuchung sind nur geringfügige Abweichungen im zehntel Pixel Bereich von Bedeutung. Weiterführende Untersuchungen bzgl. des Einflusses der Block-Artefakte der JPEG-Kompression sind in [Reeves & Hahn 1997] zu finden.

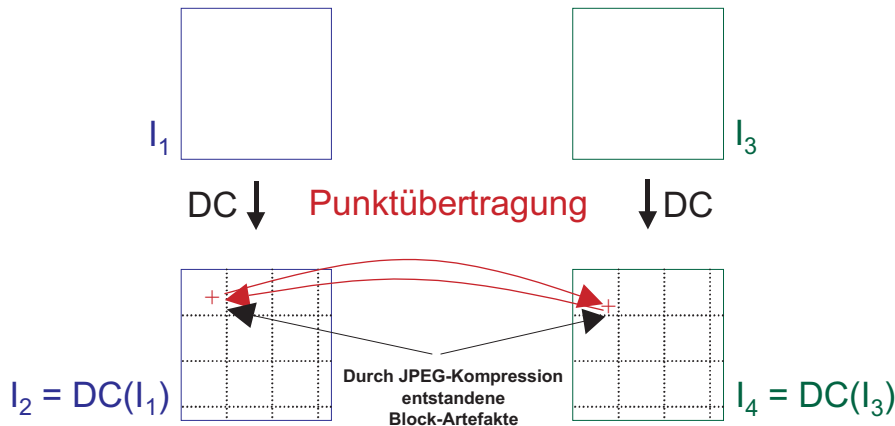


Abbildung 6.6: Darstellung der Verschiebung zwischen Bildinhalt und der durch JPEG-Kompression entstandenen Block-Artefakte

6.3.2 Übertragungsmethoden

Es wurden zwei verschiedene, nachfolgend aufgeführte Einstellungen bei der Punktübertragung verwendet:

1. Übertragung des Punktes ohne Selbstkontrolle
2. Übertragung des Punktes mit Selbstkontrolle

Bei der ersten Übertragungsmethode handelt es sich um die normalerweise beim Least Squares Matching verwendete Methode: Ausgehend vom Bild 1 wird ein Punkt in das Bild 2 übertragen. Dabei werden wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben die acht Parameter der affinen Transformation geschätzt. Die Übertragung wird als erfolgreich betrachtet, sobald diese Parameter konvergieren und der nachfolgend berechnete Korrelationskoeffizient einen Mindestwert nicht unterschreitet. An dieser Stelle ist die Punktübertragung dann beendet.

Bei der zweiten Übertragungsmethode gelten die gleichen Bedingungen wie bei der ersten Methode, jedoch wird zusätzlich der im Bild 2 identifizierte Punkt in das Ausgangsbild 1 zurückübertragen. Bei dieser Übertragung gelten dieselben Bedingungen wie bei der ersten Übertragung. Zusätzlich wird nach erfolgreicher Rückübertragung getestet, ob der rückübertragene Punkt im Bild 1 von dem Ausgangspunkt der Übertragung in Bild 1 nur innerhalb einer zulässigen Schranke (z.B. ein zehntel Pixel) in x- und y-Richtung abweicht. Diese Art der Übertragung wird, wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, als Übertragung mit Selbstkontrolle bezeichnet.

6.3.3 Untersuchte Kombinationen, Übertragungsbedingungen

Aus den in Kapitel 6.3.1 und 6.3.2 vorgestellten Bildern und Übertragungsmethoden wurden drei Kombinationen im Rahmen der Untersuchung ausgewertet. Im weiteren werden daher die nachstehend aufgeführten Übertragungstypen verwendet:

TYP A: Übertragung eines Punktes mit Selbstkontrolle von Bild I_1 in das Bild I_2 .

TYP B: Übertragung eines Punktes ohne Selbstkontrolle von Bild I_2 in das Bild I_4 .

TYP C: Übertragung eines Punktes mit Selbstkontrolle von Bild I_2 in das Bild I_4 .

Im weiteren wird daher bei der Untersuchung immer auf die drei verschiedenen Kombinationstypen Bezug genommen.

Für die Übertragung aller Punkte mit dem Least Squares Matching-Verfahren wurden folgende Vereinbarungen als Standardeinstellungen getroffen:

Bei jedem untersuchten Kompressionsverfahren und jedem untersuchten Kompressionsfaktor wurden 3481 Punkte in einem regelmäßigen Gitter mit 25 Pixel Rastergröße in Zeilen- und Spaltenrichtung zwischen den Bildern übertragen. Dadurch ist eine hinreichende Menge an übertragenen Punkten vorhanden.

Parameter	Wert	
Fenstergröße des Matchingverfahrens	21 * 21	Pixel
Maximale Iterationszahl	25	Iterationen
Konvergenzbedingung der zu schätzenden Parameter	0,01	Pixel
Minimalwert der Korrelation	0,5	
Maximale Abweichung bei Selbstkontrolle	0,1	Pixel

Tabelle 6.1: Konvergenzbedingungen der zu schätzenden Parameter

6.4 Kompressionsfaktoren und Qualitätsbeurteilung

In den folgenden Abschnitten werden die für alle Bildtypen (RMK Top, DPA, MOMS) und Kompressionsverfahren (JPEG-, Wavelet-, fraktale Kompression) erzielten Kompressionsfaktoren dargestellt. Die Reihenfolge des Bildmaterials wird auch in den nachfolgenden Kapiteln immer RMK Top, DPA und MOMS sein, um dem Leser die Beurteilung der Ergebnisse zu erleichtern.

6.4.1 Kompressionsfaktoren als Maß für die Vergleichbarkeit verschiedener Kompressionsverfahren

Wie zu erwarten war, hängt der maximal erreichbare Kompressionsfaktor nicht nur vom verwendeten Bildmaterial, sondern auch vom verwendeten Kompressionsverfahren ab. Für alle drei untersuchten Bilddatensätze erreichte das Wavelet-Verfahren das größte Kompressionsverhältnis. Dieses liegt ungefähr bei 1:1100. Die fraktale Kompression erreichte ein maximales Kompressionsverhältnis von ca. 1:200 und das JPEG-Verfahren bildet das Schlusslicht mit einem maximal erreichten Kompressionsverhältnis von ca. 1:80. Abbildung 6.7 zeigt für die DPA-Kamera das typische Kompressionsverhalten. Für die Untersuchung hat dieser Maximalwert jedoch keine Bedeutung, da bereits bei Kompressionsfaktoren von ca. 16 die Punktübertragung weit unter der geforderten Genauigkeit liegt. Dieser Abschnitt soll lediglich das Kompressionspotenzial der einzelnen Verfahren aufzeigen. Eine weitere wichtige Erkenntnis stellt die Vergleichbarkeit der Kompressionsverfahren unterein-

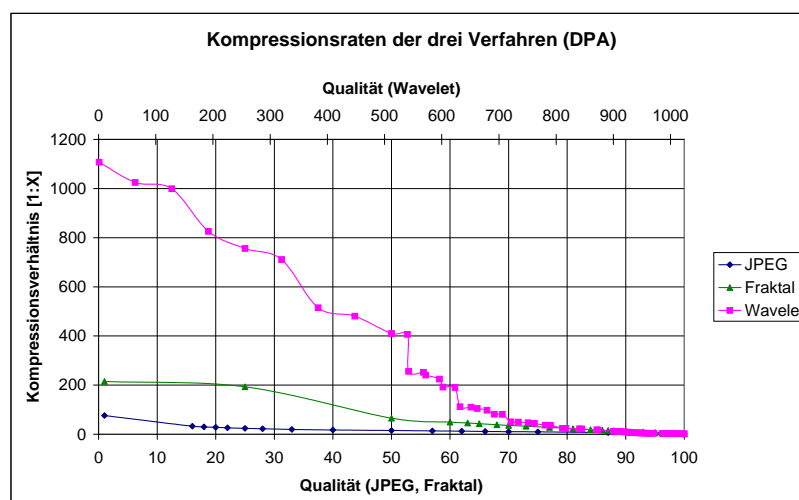


Abbildung 6.7: Kompressionsraten der drei Verfahren am Beispiel des DPA-Bildes

ander dar. Alle Vergleiche der nachfolgenden Untersuchung beziehen sich auf das Kompressionsverhältnis und nicht auf den bei jedem Verfahren vorhandenen Qualitätsfaktor. Mit Hilfe des Qualitätsfaktors kann die Stärke

der Kompression und somit der Kompressionsfaktor beeinflusst bzw. gewählt werden. Beim verwendeten Modul der JPEG- und der fraktalen Kompression stellt der Qualitätsfaktor sogar die einzige Möglichkeit dar, wie das entsprechende Kompressionsverfahren bzgl. der Stärke der Kompression beeinflusst werden kann. Das Programm (Lurawave von Luratech⁴), welches für die Waveletkompression verwendet wurde, bietet darüber hinaus noch die vorzügliche Möglichkeit, ganz gezielt ein Bild auf ein vorher gewähltes Kompressionsverhältnis zu komprimieren.

Ein weiterer Nachteil des Qualitätsfaktors liegt darin, dass je nach Bildmaterial derselbe Qualitätsfaktor in einem anderen Kompressionsverhältnis resultiert; d.h. um das gleiche Kompressionsverhältnis zu erhalten (z.B. JPEG, 1:10), muss man für das gescannte RMK Top-Bild eine Qualität von 33 wählen, während man für das DPA-Bild eine Qualität von 72 bzw. für das MOMS-Bild eine Qualität von 78 wählen muss (siehe auch Abbildung 6.8- Abbildung 6.10). Da mit den gleichen Qualitätsfaktoren, angewandt auf die einzelnen

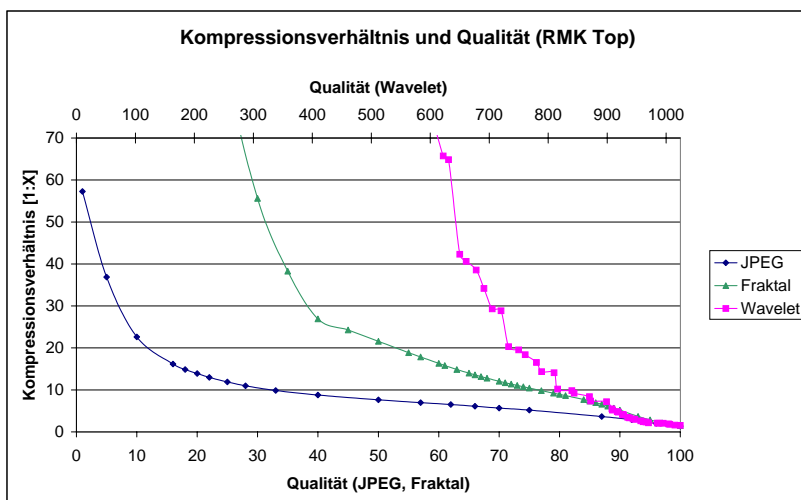


Abbildung 6.8: Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (RMK Top)

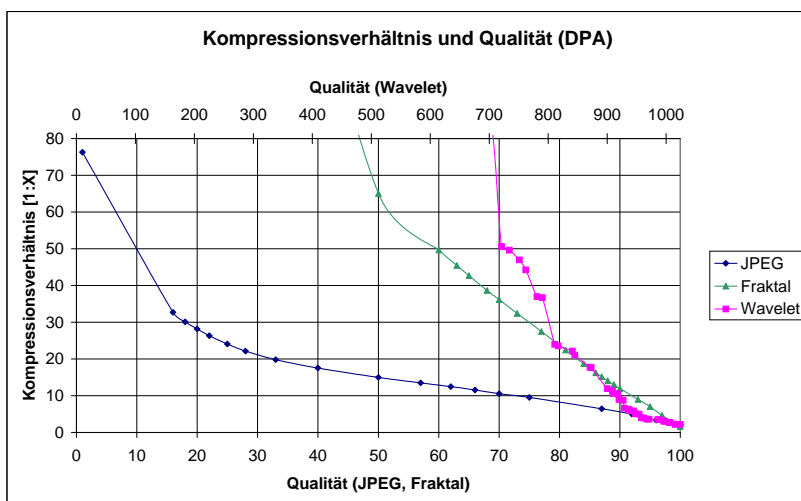


Abbildung 6.9: Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (DPA)

⁴ Siehe auch <http://www.luratech.de>

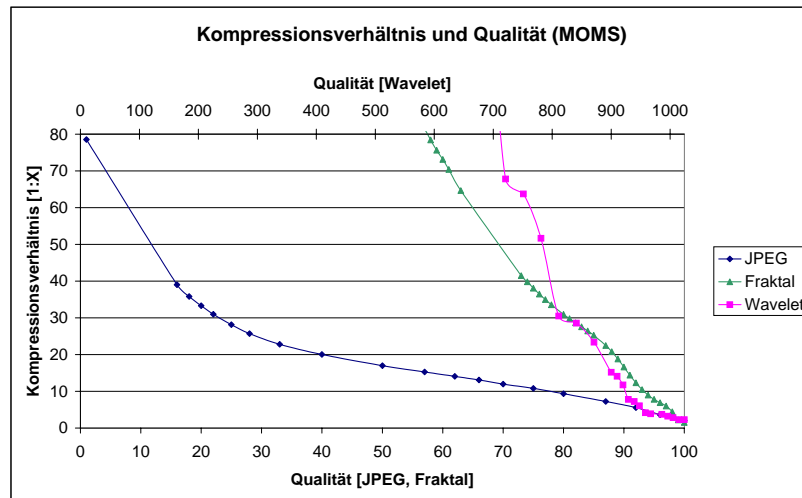


Abbildung 6.10: Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (MOMS)

Kompressionsverfahren, unterschiedlichste Kompressionsfaktoren erzielt werden, können die Qualitätsfaktoren nicht zum Vergleich der Ergebnisse herangezogen werden. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden daher bestimmte Kompressionsfaktoren anhand der JPEG-Kompression ausgewählt und anschließend die notwendigen Qualitätsfaktoren der fraktalen Kompression empirisch ermittelt, die den gleichen Kompressionsfaktor erzeugen. Bei der Wavelet-Kompression wurde direkt der gewünschte Kompressionsfaktor erzeugt. Tabelle 6.2 zeigt die verwendeten Kompressionsfaktoren für die DPA-Bilddaten. Die Spalte JPEG zeigt die entstandenen Kompressionsverhältnisse in Abhängigkeit des Qualitätsfaktors. Dieser wurde so gewählt, dass eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Kompressionsverhältnisses in den für die Untersuchung wesentlichen Bereichen entstand. Dieselben Kompressionsverhältnisse wurden dann bei der Erzeugung der mit dem Wavelet-Verfahren komprimierten Bilder verwendet. Wie Spalte "Fraktal" in Tabelle 6.2 zeigt, konnten nicht die exakt gleichen Kompressionsfaktoren für die fraktale Kompression erzeugt werden. Es wurde jedoch versucht, die Kompressionsfaktoren möglichst nahe an die der beiden anderen Verfahren anzugleichen.

Es sei nochmals betont, dass sich die Variable "Qualität" in Tabelle 6.2 nicht zum Vergleich der einzelnen Verfahren eignet. Betrachtet man in dieser Tabelle die Qualitätsfaktoren für volle Bildqualität, erhält man für die Wavelet-Kompression den Wert 1024 und den Wert 100 für die JPEG- bzw. fraktale Kompression. Im folgenden ist als Maß für die Vergleichbarkeit der komprimierten Daten daher die Dateigröße und somit das aus der Kompression resultierende Kompressionsverhältnis gewählt. Das Kompressionsverhältnis ist definiert durch den Quotienten aus komprimierter Datei geteilt durch die Originaldateigröße (z.B. 40k / 200k entspricht einem Verhältnis von 1:5).

6.4.2 Statistische Analyse des Kompressionseinflusses

Nach der Kompression wurden für alle Kompressionsverfahren und -faktoren die Differenzen zum unkomprimierten Originalbild berechnet. Dabei stellte sich heraus, dass abhängig vom Bildmaterial unterschiedlich stark ausgeprägte Fehler entstanden. Diese variierten zusätzlich, jedoch in geringerer Ausprägung abhängig vom verwendeten Kompressionsverfahren (Ausnahme fraktale Kompression). Am Beispiel des JPEG-Verfahrens sollen die unterschiedlichen Verhalten der einzelnen Bilder aufgezeigt werden.

Um die Ergebnisse leichter beurteilen zu können, sind im folgenden die verwendeten Größen kurz erklärt. Die Differenzen zwischen den beiden gleichgroßen Bildern werden berechnet, indem der Grauwert an der Stelle $G_k(x/y)$ des komprimierten Bildes von dem Grauwert $G_o(x/y)$ des Originalbildes subtrahiert wird. Diese Differenz wird für alle Pixelelemente gebildet. Mit "Max" wird die größte aufgetretene Differenz bezeichnet, analog mit "Min" die größte negative Differenz. Der Mittelwert bezeichnet die Summe aller aufgetretenen Differenzen geteilt durch die Anzahl an Beobachtungen (Anzahl Pixelelemente). Der RMSE bezeichnet die äußere Genau-

JPEG			Wavelet			Fraktal		
Qualität	Größe [Byte]	Kompressionsverhältnis [1:X]	Qualität	Größe [Byte]	Kompressionsverhältnis [1:X]	Qualität	Größe [Byte]	Kompressionsverhältnis [1:X]
16	68807	32,70	713	68804	32,70	73	69434	32,41
18	74709	30,12	717	74700	30,12	75	74925	30,03
20	79859	28,18	720	79840	28,18	76	78229	28,76
22	85477	26,33	724	85452	26,33	78	85754	26,24
25	93542	24,06	811	93516	24,06	80	94908	23,71
28	101626	22,14	841	101624	22,14	81	100325	22,43
33	113512	19,82	855	113520	19,82	83	113085	19,90
40	128361	17,53	873	128348	17,53	85	128995	17,44
50	150268	14,98	886	150200	14,98	87	148450	15,16
57	166623	13,51	893	166540	13,51	88	160089	14,06
62	180583	12,46	898	180576	12,46	89	172720	13,03
66	194439	11,57	906	194468	11,57	90	188065	11,97
70	213118	10,56	918	213068	10,56	91	205684	10,94
75	236458	9,52	919	236344	9,52	92	226161	9,95
87	349934	6,43	936	349920	6,43	95	320444	7,02
92	451694	4,98	954	451804	4,98	97	488410	4,61
96	669535	3,36	962	568180	3,96	98	669483	3,36
100	1107913	2,03	1024	1016048	2,21	100	1418642	1,59

Tabelle 6.2: Verwendete Kompressionsfaktoren am Beispiel des DPA-Bilddatensatzes

igkeit des jeweiligen Kompressionsverfahrens. Die Standardabweichung gibt die mittelwertfreie Genauigkeit der Grauwertdifferenzen wieder. Abbildung 6.11 zeigt, wie die einzelnen Größen berechnet werden.

Abbildung 6.12 zeigt die Differenzen des mit JPEG komprimierten und mit der RMK Top aufgenommenen Luftbildes. Man erkennt sehr schön den für alle Bildtypen vorhandenen Verlauf (bei JPEG- und Wavelet-Kompression) der einzelnen betrachteten Werte. Mit zunehmender Kompression wachsen auch die maximal in einem Bildpunkt auftretenden Fehler im komprimierten Bild, d.h. bei einer Kompression von 1:16 beträgt die maximal aufgetretene Differenz ca. 60 Grauwerte, während bei voller Bildqualität dieser Fehler nur ca. 2 beträgt; d.h. auch bei einem Qualitätsfaktor von 100 ist die Kompression noch verlustbehaftet. Man erkennt ebenfalls, dass bei der Komprimierung keine systematischen Fehler entstehen. Dies gilt sowohl für die JPEG- als auch für die Wavelet-Kompression. Der wesentliche Unterschied zwischen den verschiedenen Bilddaten liegt in den erhaltenen RMSE-Werten. Für das gescannte Luftbild (RMK Top) entsteht bis zum maximal untersuchten Kompressionsverhältnis von ca. 1:16 bereits ein RMSE von 8,8 Grauwerten. Wird dieser Wert mit dem Fehler bei maximaler untersuchter Kompression in Abbildung 6.13 verglichen, so erkennt man, dass die mit einem Zeilenscanner aufgenommenen Bilder deutlich kleinere Fehler bei der Kompression erzeugen (RMSE = 5,2 bei Kompressionsfaktor 1:32,7 (DPA), bzw. RMSE = 4,3 bei Kompressionsverhältnis 1:39 (MOMS)). Dieses Verhalten ist für alle drei untersuchten Kompressionsverfahren ähnlich. Ein RMSE von 4 Grauwerten wird bei den Bilddaten der RMK Top bereits bei einem Kompressionsverhältnis von 1:5,18 erreicht. Bei den DPA-Daten ist hingegen ein Kompressionsverhältnis von 1:22,14 bzw. bei MOMS von 1:35,81 notwendig, um denselben Fehler zu erhalten.

Das Verfahren der fraktalen Kompression besitzt jedoch einen sehr auffälligen Unterschied gegenüber den beiden anderen Verfahren (siehe Abbildung 6.14). Unabhängig vom Bildmaterial entstand bei den fraktal komprimierten Bildern (Fractal Imager, Version 1.6, Iterated Systems Inc.⁵) ein systematischer Fehler. Der Mittelwert der Differenzen ist über den gesamten untersuchten Kompressionsbereich ungleich Null und mit Werten zwischen zwei und neun Grauwerten auch relativ hoch. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens liegt in den maximalen Differenzen. Während bei hoher Qualität diese Differenzen für das JPEG- und Wavelet-Verfahren nahezu bei Null liegen, besitzen die mit dem fraktalen Verfahren komprimierten Bilder einen maximalen Differenzwert von 92 Grauwerten. Anhand von Abbildung 6.14 kann man sehr gut erkennen, dass der Verlauf dieser maximalen Differenz bei den fraktal komprimierten Bildern bis zum maximalen Kompressionsverhältnis nahezu konstant ist, während sich dieser Fehler bei den beiden anderen Verfahren nahezu linear verhält (siehe Abbildung 6.12, Bsp. JPEG).

⁵ Bei Iterated Systems handelt es sich um die Firma der Begründer der fraktalen Kompression Dr. Michael Barnsley und Dr. Alan Sloan. Unter <http://www.iterated.com> befinden sich weitere Informationen zur Firma und deren Produkten.

/* Differenzenberechnung zwischen komprimiertem und Originalbild */

```

/* Schritt 1: Bestimme Mittelwert, Maximum und Minimum der Differenzen */
DiffSumme = 0; Max = 0; Min = 0;
for(i = 0; i < Zeilen; i++)
{
  for(j = 0; j < Spalten; j++)
  {
    DiffBild(i,j) = GKomp(i,j) - GOrig(i,j);
    DiffSumme+ = DiffBild(i,j);
    if (Max < DiffBild(i,j)) {Max = DiffBild(i,j);}
    if (Min > DiffBild(i,j)) {Min = DiffBild(i,j);}
  }
}
Mittelwert =  $\frac{\text{DiffSumme}}{\text{Zeilen} \cdot \text{Spalten}}$ ;

/* Schritt 2: Bestimme RMSE und Standardabweichung */
RMSE = 0; Stdabw = 0;
for(i = 0; i < Zeilen; i++)
{
  for(j = 0; j < Spalten; j++)
  {
    RMSE+ = DiffBild(i,j)2;
    Stdabw+ = (DiffBild(i,j) - Mittelwert)2;
  }
}

RMSE =  $\sqrt{\frac{\text{RMSE}}{\text{Zeilen} \cdot \text{Spalten}}}$ 

Stdabw =  $\sqrt{\frac{\text{Stdabw}}{(\text{Zeilen} \cdot \text{Spalten}) - 1}}$ 

```

Abbildung 6.11: Berechnung der Differenzen

6.4.3 Qualitätsbeurteilung der komprimierten Bilddaten

Um die Qualität der komprimierten Bilder besser beurteilen zu können, wurde das PSNR-Verhältnis berechnet. Das PSNR zeigt das Verhältnis zwischen dem originalen Signal (unkomprimiert) und dem durch die Kompression entstandenen Fehler und wird in Dezibel (*dB*) angegeben (vgl. [Saupe & Hartenstein 1996]). Für die verschiedenen Kompressionsfaktoren wird das zugehörige PSNR berechnet und anschließend werden die Punkte zu einer Kurve verknüpft. Je höher eine so erhaltene Kurve im Schaubild liegt, desto besser arbeitet das zugehörige Kompressionsverfahren. Anhand von Abbildung 6.15 kann man sehr leicht erkennen, dass grundsätzlich das fraktale Kompressionsverfahren hinter dem JPEG- und Wavelet-Verfahren zurückliegt, während das JPEG- und Wavelet-Verfahren eine ähnliche Qualität besitzen.

Ferner fällt auf, dass die Qualität der Bilddaten unterschiedlich ausfällt. Die in herkömmlicher Weise aufgenommenen Bilder (RMK Top, belichteter Film, gescannt) weisen ein deutlich schlechteres PSNR auf, als die mit den Zeilenkameras aufgenommenen Bilder (DPA, MOMS02). Somit bleibt festzuhalten, dass das Ergebnis des PSNR stärker vom verwendeten Bild als vom verwendeten Kompressionsverfahren abhängt, da für alle Bilddaten ein ähnlicher Trend bei der Entwicklung des PSNR für die verschiedenen Kompressionsverfahren vorhanden ist. Es sei darauf hingewiesen, dass das PSNR nur ein Maß für die relative Änderung eines Bildes zum Originalbild darstellt. Für die RMK Top-Bilder bedeutet dies, dass sie bei Anwendung eines der Kompressionsverfahren im Vergleich zu den anderen Bilddatensätzen deutlich schneller an Qualität verlieren. Das PSNR ist kein Maß für die Bildqualität des Originalbildes, sondern repräsentiert lediglich die relative Ände-

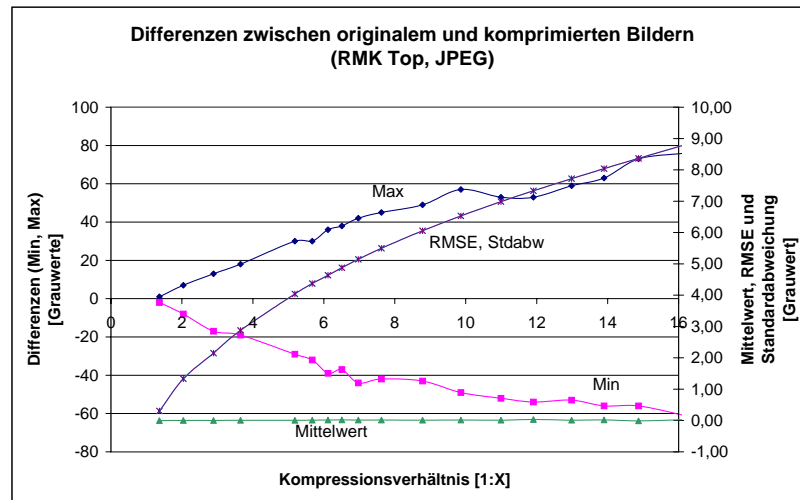


Abbildung 6.12: Durch JPEG-Kompression entstandene Abweichungen am Beispiel RMK Top

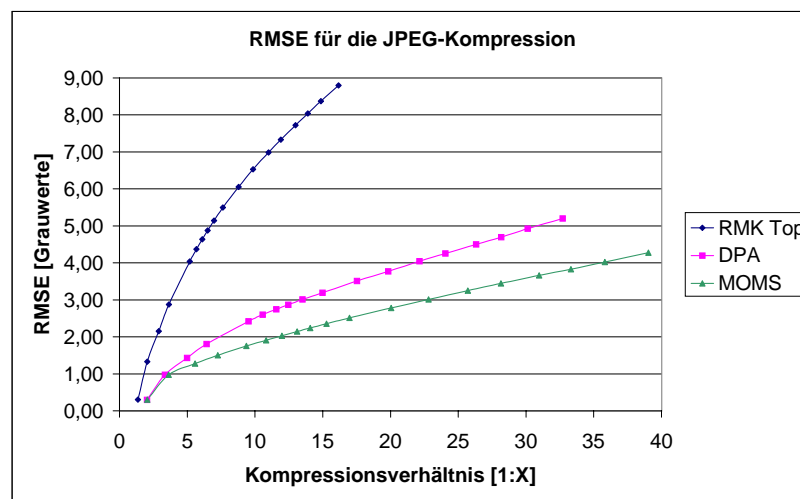


Abbildung 6.13: RMSE (Grauwerte) am Beispiel JPEG-Kompression

zung des Signal-Rausch-Verhältnisses nach Anwendung eines Bildkompressionsverfahrens gegenüber dem unkomprimierten Bild.

Ein anderes Maß zur Betrachtung der Qualität eines Bildes ist die Entropie ([Netravali & Haskell 1994]). Für ein Grauwertbild mit 8 Bit Auflösung kann maximal eine Entropie von 8 erreicht werden. Allerdings kann auch mit Hilfe dieses Maßes keine absolute Aussage über die Qualität eines Bildes getroffen werden, da sowohl das eigentliche Bildsignal wie auch das im Bild vorhandene Rauschen in die Berechnung der Entropie einfließen. Dennoch soll an dieser Stelle Tabelle 6.3 die minimalen Werte der Entropie für die einzelnen Bilder und Kompressionsverfahren aufzeigen:

Die in der Tabelle 6.3 dargestellte Spalte Min enthält die Entropie des Bildes mit dem höchsten verwendeten Kompressionsfaktor für das jeweilige Verfahren. Zu erkennen ist, dass durch die Kompression die Entropie nicht wesentlich verändert wird. Ebenso fällt auf, dass das mit der RMK Top aufgenommene und anschließend gescannte Bild offensichtlich die höchste Entropie besitzt. Allerdings darf hierbei nicht vergessen werden, dass dieses Bild gegenüber den beiden anderen Bildern ein sichtbar höheres Rauschen enthält.

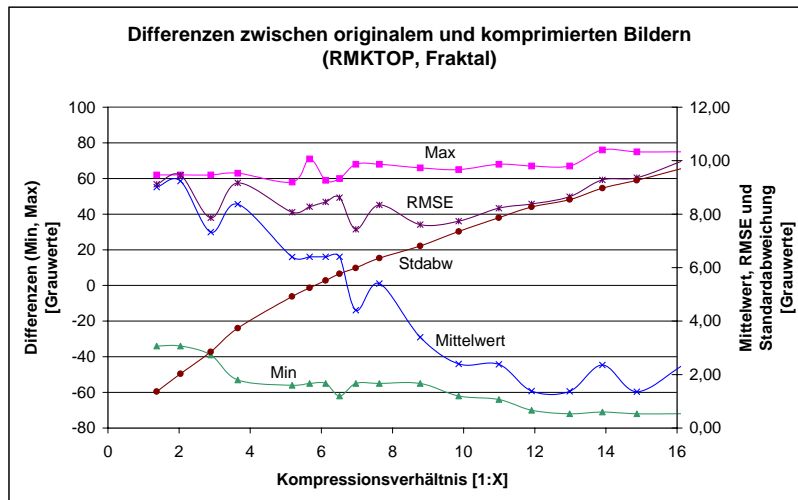


Abbildung 6.14: Durch fraktale Kompression entstandene Differenzen am Beispiel RMK Top

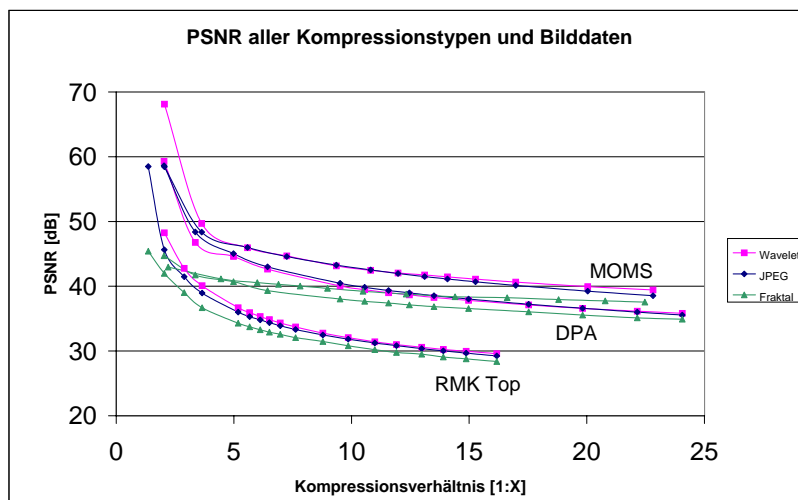


Abbildung 6.15: PSNR für alle Kamera- und Kompressionstypen

6.5 Übertragungsquoten

Ein wichtiges Argument der Punktübertragung stellt die Anzahl der erfolgreich übertragbaren Punkte dar. Da für viele Anwendungen eine möglichst hohe Erfolgsquote angestrebt wird, sollte durch ein Kompressionsverfahren die Quote nicht wesentlich verschlechtert werden. Abbildung 6.17 zeigt für das Beispiel der DPA-Kamera die Übertragungsquoten der Untersuchung mit der Konfiguration Typ B (ohne Selbstkontrolle) und Typ C (mit Selbstkontrolle). Man kann leicht erkennen, dass die Übertragungsquote um ca. 800 – 1200 Punkte variiert (je nach Bildmaterial, höchster Kompressionsfaktor), falls die Übertragung ohne bzw. mit Selbstkontrolle durchgeführt wird. Die große Differenz an übertragenen Punkten erklärt sich nur anhand der Genauigkeit des rückübertragenen Punktes. Mit anderen Worten; ca. 1000 Punkte der Stichprobe können bei der maximalen betrachteten Kompression nicht mehr mit der geforderten Genauigkeit übertragen werden. Wenn bei der Punktübertragung die Genauigkeit höchste Priorität besitzt, ist die Selbstkontrolle bei der Übertragung empfehlenswert.

Kamera	Verfahren	Originalbild	Min
RMK Top	JPEG		7,62
	Wavelet	7,70	7,68
	Fraktal		7,58
DPA	JPEG		5,70
	Wavelet	6,21	6,20
	Fraktal		6,19
MOMS	JPEG		5,43
	Wavelet	5,78	5,73
	Fraktal		5,70

Tabelle 6.3: Entropie der Bilddaten (original, komprimiert)

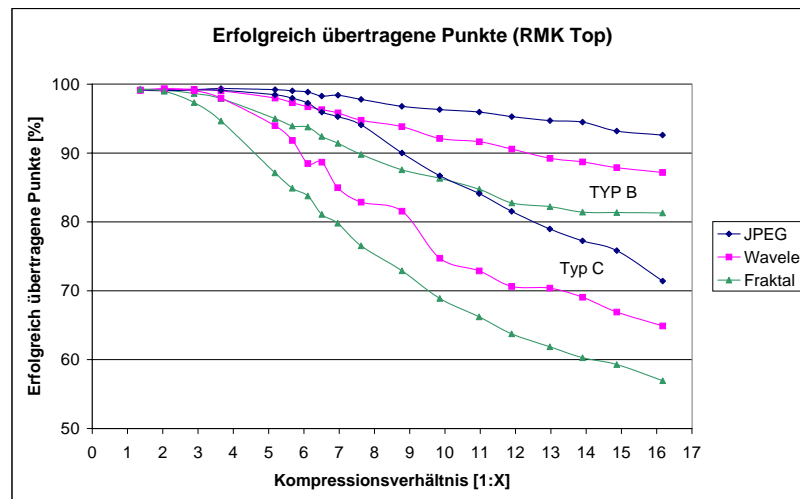


Abbildung 6.16: Darstellung der erfolgreich übertragene Punkte am Beispiel RMK Top (Typ B: Übertragung ohne Selbstkontrolle, Typ C: Übertragung mit Selbstkontrolle)

Genaueren Aufschluss über die verwendbaren Kompressionsfaktoren geben schließlich die Abbildungen 6.16 - 6.18. Nimmt man in Kauf, dass ca. 10% der Punkte bei der Übertragung verlorengehen dürfen, so ergeben sich für die hier untersuchten Kompressionsverfahren und Übertragungsmethoden die in Tabelle 6.4 aufgeführten Kompressionsfaktoren. Für alle Kameratypen und Übertragungsarten schneidet die JPEG-Kompression am besten ab, da man mit ihr die höchsten Kompressionsfaktoren erreichen kann. Die Wavelet-Kompression liegt mit ähnlichen Ergebnissen hinter den Ergebnissen der JPEG-Kompression, während das Verfahren der fraktalen Kompression ein deutlich schlechteres Ergebnis produziert. Anhand dieser Ergebnisse können nur bedingt Rückschlüsse auf den maximal zu verwendenden Kompressionsfaktor gezogen werden, da die Anzahl der erfolgreich übertragene Punkte letztlich keine Aussage über die tatsächlich vorhandene Genauigkeit der Punkte enthält. Die bislang erhaltenen Ergebnisse können jedoch als vorläufige Richtwerte benutzt werden.

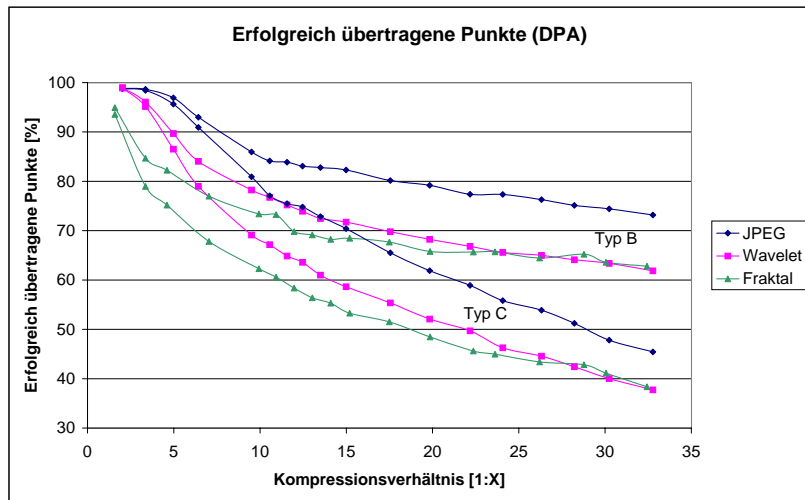


Abbildung 6.17: Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel DPA (Typ B: Übertragung ohne Selbstkontrolle, Typ C: Übertragung mit Selbstkontrolle)

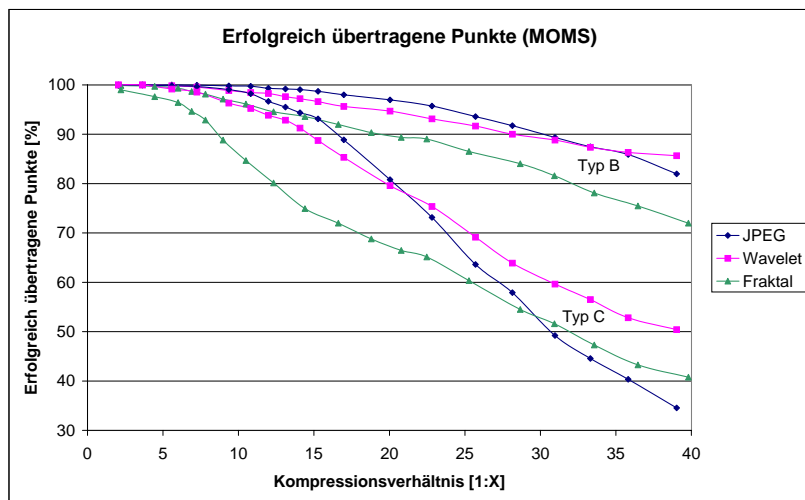


Abbildung 6.18: Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel MOMS (Typ B: Übertragung ohne Selbstkontrolle, Typ C: Übertragung mit Selbstkontrolle)

6.6 Iterationszahl

Ein nicht unwesentlicher Faktor ist die zur Übertragung eines Punktes benötigte Zeit. Diese hängt in erster Linie von der zur Übertragung benötigten Anzahl an Iterationen ab. Wie bereits in Kapitel 5.2.2 erwähnt, handelt es sich bei dem Punktübertragungsverfahren um ein iteratives Verfahren. Bei jedem Iterationsschritt werden die Konvergenzbedingungen überprüft, und sobald diese erfüllt sind, die restlichen Kriterien betrachtet. Abbildung 6.19 zeigt ein für MOMS- und RMK Top-Daten typisches Ergebnis. Unabhängig vom Bilddatensatz benötigt das JPEG-Verfahren immer die wenigsten Iterationen. Mit der Zunahme des Kompressionsfaktors erhöht sich auch die durchschnittlich für die Punktübertragung benötigte Anzahl an Iterationen. Bei einem Verhältnis von 1:30 benötigt man ca. 12,5 Iterationen anstatt der 4 Iterationen beim unkomprimierten Bild.

Kamera	Kontrolle bei Übertragung	Kompressionsart		
		JPEG	Wavelet	Fraktal
RMK Top	Ohne	1:16	1:12	1:7
	Mit	1:9	1:6	1:5
DPA	Ohne	1:8	1:5	1:3
	Mit	1:7	1:4	1:2
MOMS	Ohne	1:30	1:28	1:19
	Mit	1:16	1:14	1:8

Tabelle 6.4: Kompressionsfaktor bei 10% Übertragungsverlust

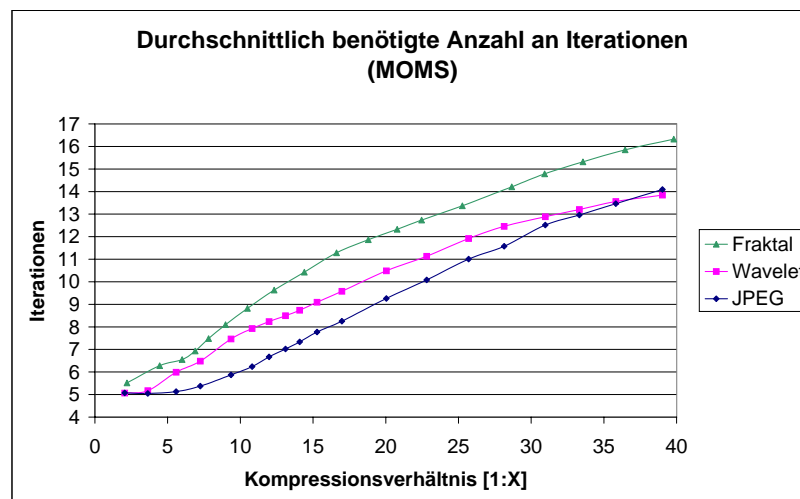


Abbildung 6.19: Durchschnittlich zur Punktübertragung mittels Least Squares Matching benötigte Anzahl an Iterationen am Beispiel MOMS

Eine weitere Besonderheit liegt in der Tatsache, dass für die Punktübertragung mit DPA-Daten durchschnittlich 2–5 Iterationen mehr benötigt werden als bei MOMS- bzw. RMK Top-Bilddaten. Dies gilt für den gesamten betrachteten Kompressionsbereich (vgl. Abbildungen 6.19 und 6.20).

6.7 Einfluss der Kompression auf die Genauigkeit der Punktübertragung

Der wichtigste Punkt schließlich ist die Genauigkeit der übertragenen Punkte. Für den Anwender einer automatischen Punktübertragung ist es daher von großer Bedeutung, wie stark er ein Bild komprimieren darf, ohne dabei entscheidende Qualitätseinbußen bei der Übertragung zu erleiden. Ebenso stellt sich die Frage, inwiefern diese Genauigkeit vom verwendeten Kompressionsverfahren, Bildmaterial und vom Kompressionsfaktor abhängt. Diese Gesichtspunkte werden in der weiteren Untersuchung vertieft dargestellt.

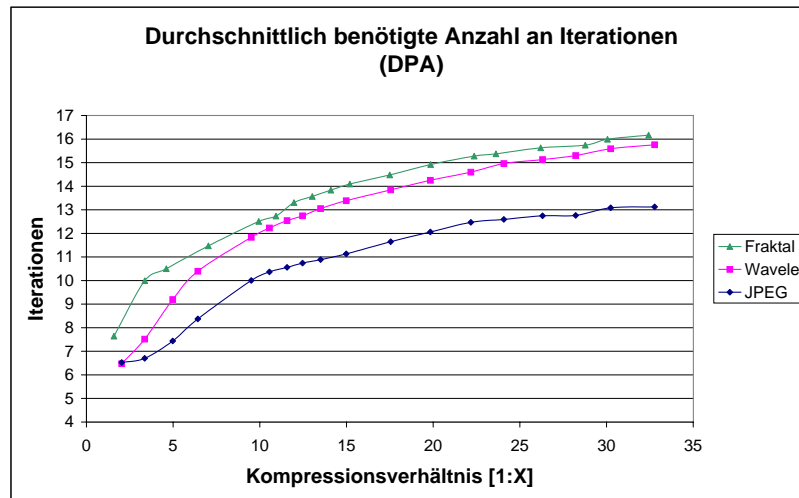


Abbildung 6.20: Durchschnittlich zur Punktübertragung mittels Least Squares Matching benötigte Anzahl an Iterationen am Beispiel DPA

6.7.1 Kompressionsverfahren, Kompressionsfaktor

Zunächst werden die Ergebnisse der Untersuchung gemäß Typ A (Übertragung mit Selbstkontrolle zwischen originalem und komprimiertem Bild) näher erläutert. Dadurch kann der direkte Einfluss der Kompression auf die Lage eines Punktes im Bild ermittelt werden. Bei der Betrachtung der Genauigkeiten beschränkt man sich auf Kompressionsverhältnisse im Bereich von ca. 1:2 bis 1:16. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die geforderten Genauigkeiten bei allen getesteten Verfahren bereits in diesem Bereich nicht mehr erreicht wurden.

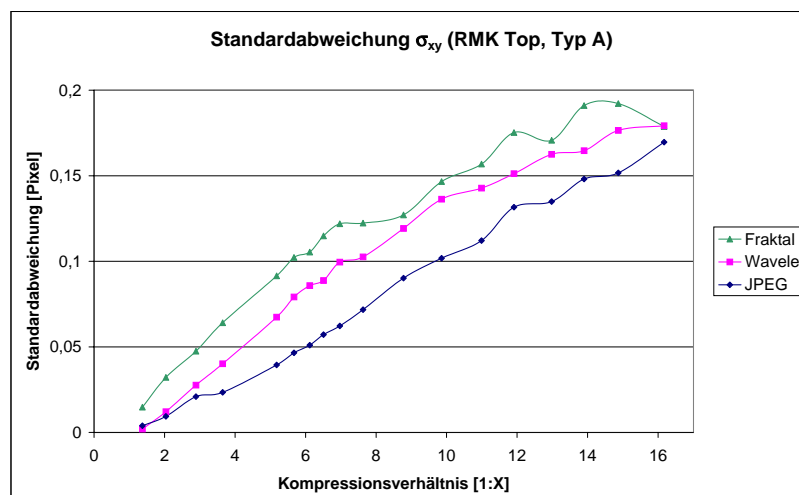


Abbildung 6.21: Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top zwischen originalem und komprimiertem Bild mit Selbstkontrolle

Abbildung 6.21 zeigt am Beispiel der RMK Top, dass der Einfluss eines Kompressionsverfahrens auf die Punktübertragung zwischen dem Ursprungsbild und seinem komprimierten Abbild bereits bei geringen Kompressionsraten erheblich ist. Bei einem Kompressionsverhältnis von 1:10 weichen die ermittelten Positionen

um mehr als 0,1 Pixel von der Sollposition ab. Für die Daten der DPA-Kamera gilt dies in der gleichen Weise. Die Bilder der MOMS02-Kamera lassen höhere Kompressionsraten zu. Jedoch wird auch hier die Genauigkeit von 0,1 Pixel bei dem nur unwesentlich höheren Kompressionsverhältnis von 1:14 überschritten. Tabelle 6.5 zeigt die Kompressionsraten, bei denen die geforderte Genauigkeit nicht mehr erreicht wurde. Die Werte

Kamera	Kompressions-	
	Verfahren	Rate [1:X]
RMK Top	JPEG	10,0
	Wavelet	8,0
	Fraktal	6,6
DPA	JPEG	9,6
	Wavelet	6,5
	Fraktal	4,0
MOMS	JPEG	13,5
	Wavelet	11,3
	Fraktal	7,3

Tabelle 6.5: Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ A

wurden mit Hilfe von Regressionsgeraden ermittelt. Für jedes Verfahren und jeden Bilddatensatz wurde die Regressionsgerade berechnet. Als erstes Ergebnis zeigt sich, dass unabhängig vom verwendeten Kompressionsverfahren die Daten der MOMS02-Kamera am stärksten komprimiert werden können. Die Ergebnisse der DPA- bzw. RMK Top-Daten unterscheiden sich nur geringfügig, wobei die RMK Top-Daten etwas stärker komprimiert werden können. Im nächsten Schritt der Untersuchung wurde die Punktübertragung nach Typ B durchgeführt. Hierbei erfolgte die Übertragung ohne Selbstkontrolle zwischen zwei versetzt zueinander aus-

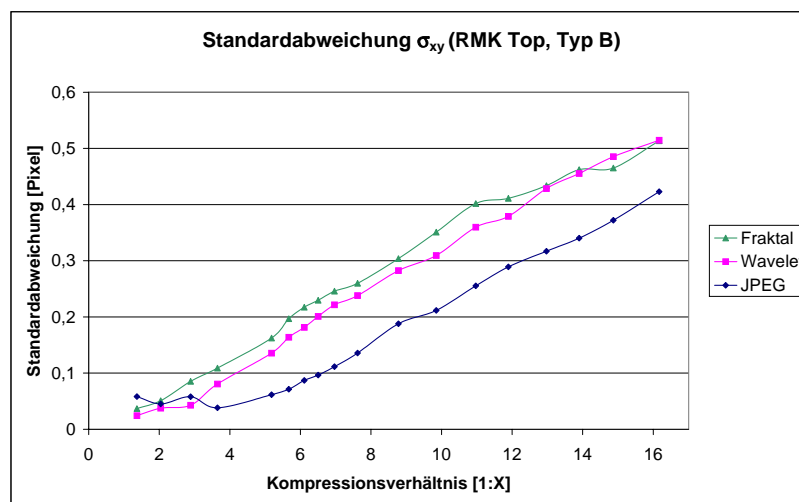


Abbildung 6.22: Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top ohne Selbstkontrolle, zueinander versetzt ausgeschnittene Bilder

geschnittenen Bildern. Für alle Verfahren und Bilder entsteht ein nahezu linearer Verlauf der Genauigkeit. Abbildung 6.22 zeigt die Ergebnisse für das mit der RMK Top aufgezeichnete Bild. Bereits bei Kompressionsverhältnissen im Bereich von 1:8 werden in vielen der betrachteten Fälle die Genauigkeiten von ca. 0,1 Pixel nicht mehr erreicht. Tabelle 6.6 zeigt die Kompressionsraten für das jeweilige Bild und Kompressionsverfahren, bei denen die ein zehntel Pixel Grenze durchbrochen wird. Durch die Verwendung von zwei komprimierten

Bildern (bei Typ A wurde lediglich ein Stereopartner komprimiert) sinkt das maximal zulässige Kompressionsverhältnis für alle Verfahren und Bilddaten deutlich. Bei genauer Betrachtung der Tabelle ist zu erkennen, dass der Wert der maximal zulässigen Kompression sowohl vom verwendeten Bildmaterial als auch vom verwendeten Kompressionsverfahren abhängt. Es gibt also keinen festen Kompressionsfaktor, für den unabhängig vom Bildmaterial oder Kompressionsverfahren immer dieselbe Genauigkeit erreicht wird. Ebenso ist ersichtlich, dass die von der MOMS02-Kamera stammenden Bilder am stärksten komprimiert werden können (bei JPEG bis ca. 1:10). Die mit der RMK Top aufgenommenen Bilder erreichen mittlere Kompressionsfaktoren (ca. 6) und die Bilder der DPA-Kamera schließlich erreichen die niedrigsten Kompressionsraten (ca. 4). Diese Reihenfolge entspricht den Ergebnissen der Untersuchung nach Typ A. Eine weitere wichtige Erkenntnis erhält man bei der Betrachtung der Kompressionsraten für die einzelnen Kompressionsverfahren. Unabhängig vom Bildmaterial

Kamera	Kompressions-	
	Verfahren	Rate [1:X]
RMK Top	JPEG	5,6
	Wavelet	3,9
	Fraktal	3,0
DPA	JPEG	3,8
	Wavelet	2,0
	Fraktal	1,8 ⁶
MOMS	JPEG	9,6
	Wavelet	6,6
	Fraktal	2,0

Tabelle 6.6: Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ B

erzielt das JPEG-Verfahren immer die höchste Kompressionsrate, bei der die Genauigkeit der Punktübertragung die Schwelle von einem zehntel Pixel überschreitet. An zweiter Stelle findet sich die Wavelet-Kompression und am Schluss schließlich das Verfahren der fraktalen Kompression.

Nach denselben Kriterien wird im folgenden das Ergebnis der Punktübertragung nach Typ C (Übertragung mit Selbstkontrolle zwischen versetzt zueinander ausgeschnittenen Bildern) bewertet. Auch hier entstanden ähnliche Ergebnisse für die verschiedenen Bilddaten, wobei erwähnt sei, dass durch die Selbstkontrolle (Punktübertragung gemäß Typ C) ca. 30% aller Punkte, die zuvor bei der Punktübertragung nach Typ B erfolgreich zugeordnet wurden, nicht mehr die geforderten Genauigkeiten erzielten. Abbildung 6.23 zeigt wiederum für das Beispiel der RMK Top-Kamera die Genauigkeiten der Punktübertragung in Abhängigkeit des Kompressionsfaktors. Vergleicht man die Ergebnisse mit der Untersuchung nach Typ B (Abbildung 6.22), so erkennt man, dass hier die Genauigkeit langsamer abnimmt; d.h. die Kurven liegen flacher. Dies hat zur Folge, dass der maximale Fehler, der bis zu der verwendeten Kompressionsrate auftritt, kleiner ist. Am deutlichsten sichtbar ist dieses Verhalten bei dem dargestellten Fall der RMK Top-Bilder. Bei der Punktübertragung nach Typ B beträgt der Fehler für ein Kompressionsverhältnis von 1:16 und das JPEG-Verfahren ca. 0,43 Pixel, während er bei dem mit Selbstkontrolle übertragenen Punkten für dasselbe Verhältnis und dasselbe Verfahren nur 0,28 Pixel beträgt. Tabelle 6.7 zeigt wiederum die maximale Kompressionsrate für jedes Verfahren und Bildmaterial, bei der die 0,1 Pixel-Grenze der Genauigkeit überschritten wird:

⁶ Übertragungsgenauigkeit von Beginn an schlechter als ein zehntel Pixel.

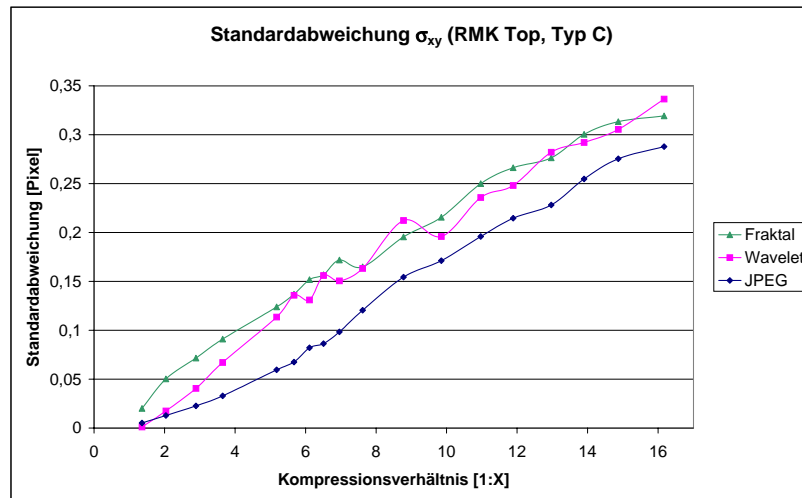


Abbildung 6.23: Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top mit Selbstkontrolle

Kamera	Kompressions-	
	Verfahren	Rate [1:X]
RMK Top	JPEG	6,7
	Wavelet	5,0
	Fraktal	4,2
DPA	JPEG	4,5
	Wavelet	2,9
	Fraktal	2,2 ⁷
MOMS	JPEG	10,0
	Wavelet	6,8
	Fraktal	2,6

Tabelle 6.7: Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ C

Bei genauer Betrachtung von Tabelle 6.7 stellt sich heraus, dass alle Ergebnisse der Untersuchung nach Typ B auch bei der Untersuchung nach Typ C zutreffen. Im einzelnen bedeutet dies:

- Kein eindeutiger Kompressionsfaktor bestimmbar, für den unabhängig von Bildmaterial und Kompressionsverfahren eine bestimmte vordefinierbare Genauigkeit erreicht werden kann. Dies gilt auch, wenn nur ein Kompressionsverfahren betrachtet wird.
- Die höchste Kompressionsrate erzielt auch hier MOMS vor RMK Top vor DPA.
- Durch die Einführung der Selbstkontrolle bei der Punktübertragung erhöhen sich alle maximalen Kompressionsraten (wenn auch teilweise nur geringfügig).
- Unabhängig vom Bildmaterial erzielt auch hier die JPEG-Kompression die höchsten Kompressionsraten gefolgt von der Wavelet- und schließlich der fraktalen Kompression.

⁷ Übertragungsgenauigkeit von Beginn an schlechter als ein zehntel Pixel.

Zusätzlich kann auch noch folgendes festgehalten werden: Bei der Betrachtung der Bilddaten bzgl. der Qualität der Bilder über den untersuchten Kompressionsbereich erzielte das Wavelet-Verfahren die besten Ergebnisse, dicht gefolgt von den mit JPEG komprimierten Bildern. Die fraktale Kompression fiel hierbei deutlich ab. Betrachtet man nun die Ergebnisse der Punktübertragung bzgl. der Genauigkeit spiegelt sich dieses Bild bedingt wider. Auch hier liegen die Kompressionsverfahren Wavelet und JPEG relativ dicht beieinander. Genauso fällt die fraktale Kompression wieder etwas gegenüber den beiden erst genannten Verfahren ab. Der Unterschied zwischen der Betrachtung der Bildqualität und der Übertragungsgenauigkeit besteht nun jedoch darin, dass das Verfahren der JPEG-Kompression wider Erwarten die höchsten Kompressionsraten auf dasselbe Bild für gleiche Genauigkeitsanforderungen zulässt. Aufgrund der Voruntersuchung der Bilder nach deren Qualität hätte man sicherlich erwartet, dass die mit dem Wavelet-Verfahren komprimierten Bilder die besten Resultate erzielen würden. Diese Erwartung konnte jedoch durch die Untersuchung nicht bestätigt werden. Als Ergebnis kann somit festgehalten werden, dass die Reihenfolge der Kompressionsverfahren unter Berücksichtigung der Punktübertragung bzw. deren Genauigkeit folgendermaßen lautet:

JPEG \ll Wavelet \ll Fraktal⁸

Der Einfluss der verschiedenen Kompressionsverfahren wirkt sich abhängig vom Bildmaterial verschieden auf die Genauigkeit der Punktübertragung aus. So ergibt sich hier die Reihenfolge MOMS, RMK Top, DPA, wobei bei MOMS der geringste und bei DPA der stärkste Einfluss der Kompressionsverfahren auf das Ergebnis vorhanden ist. Dies lässt sich durch die in den Bildern vorhandene Textur erklären. Bilder mit wenig bzw. weniger Textur reagieren auf die Einflüsse der einzelnen Kompressionsverfahren weniger empfindlich als Bilder mit mehr Textur. Generell muss aber gesagt werden, dass Bilder mit mehr Textur sicherlich die besseren Ergebnisse bei der Punktübertragung erzielen als Bilder mit wenig Textur.

6.7.2 Bildqualität und Punktübertragungsgenauigkeit

Die folgenden Abbildungen zeigen die Genauigkeit der Punktübertragung in Abhängigkeit des in den Bildern vorhandenen Kompressionsrauschens. Wie zuvor beschrieben (siehe Kapitel 4) ist ein Ziel der Untersuchung eine Darstellung zu finden, mit deren Hilfe schon nach der Kompression eines Bildes mit einem bestimmten Faktor eine Aussage über die zu erwartende Genauigkeit der Punktübertragung getroffen werden kann. Dabei ist es sicherlich zulässig, wenn sich die vorhergesagte Genauigkeit innerhalb eines bestimmten Genauigkeitsintervalls bewegt. Mit Hilfe einer solchen Darstellung kann dann aufgrund der schnell berechenbaren Bildqualität der maximale Kompressionsfaktor ermittelt werden, für den die gewählte Genauigkeit noch erreicht wird. Betrachtet man Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25, so können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Für die Daten der RMK Top- und DPA-Kamera funktioniert das beschriebene Modell. Mit Hilfe der durch die Kompression erzeugten Fehler und den im Bild enthaltenen Gradienten kann zu einem Kompressionsfaktor mit einer Genauigkeit von ca. 0,05 Pixel die zu erwartende Übertragungsgenauigkeit bestimmt werden. Um also den maximal möglichen Kompressionsfaktor bei einer bestimmten geforderten Genauigkeit zu ermitteln, genügt es bei Bildern dieses Typs, einige Differenzbilder zwischen dem Originalbild und den durch die Kompressionsverfahren verfälschten Bilder zu berechnen.
2. Für die Daten der MOMS02-Kamera scheint das Verfahren nicht in derselben Weise zu funktionieren. Dies lässt sich durch die in MOMS-Bildern nur sehr schwach vorhandenen mittleren Gradienten und durch die nur wenig vorhandene Textur erklären.

6.8 Fazit

Die Untersuchung zeigt, dass die Genauigkeit der digitalen Punktübertragung von mehreren Faktoren abhängig ist. So üben sowohl die Stärke als auch die Art des verwendeten Kompressionsverfahrens einen bedeutenden Einfluss auf die Genauigkeit der digitalen Punktübertragung aus. Ebenso verdeutlicht die vorangegangene Untersuchung, dass das Ergebnis der Übertragung stark vom zugrundeliegenden Bildmaterial

⁸ Lies: JPEG besser als Wavelet besser als Fraktal

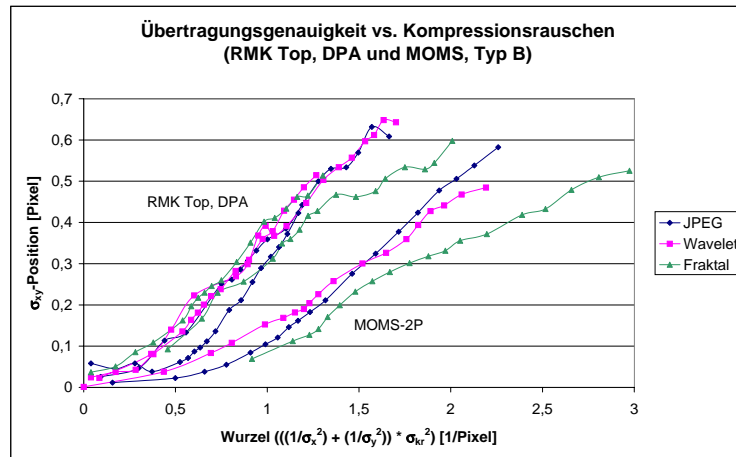


Abbildung 6.24: Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (ohne Selbstkontrolle)

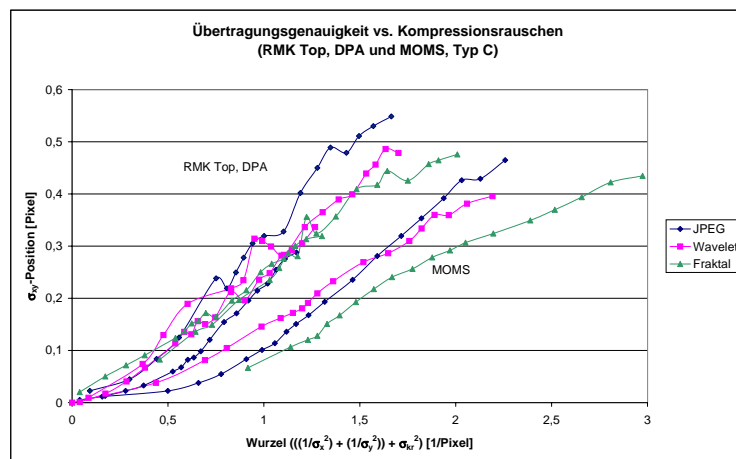


Abbildung 6.25: Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (mit Selbstkontrolle)

abhängig ist. Ein weiteres Resultat besteht in der Erkenntnis, dass kein globaler Kompressionsfaktor bestimmt werden kann, mit dem die digitale Punktübertragung immer mit der geforderten Genauigkeit arbeitet.

Das bedeutendste Ergebnis stellt jedoch das Abschneiden des fraktalen Kompressionsverfahrens dar. Unabhängig von allen Faktoren, d.h. für jedes Bildmaterial und jede Kompressionsstärke liefert die fraktale Kompression die schlechtesten Ergebnisse. Schneidet die fraktale Kompression bei der erzielbaren maximalen Kompressionsrate noch deutlich besser ab als das JPEG-Verfahren, so zeigen jedoch bereits die nachfolgenden Untersuchungen der Bildqualität, dass das fraktale Verfahren deutlich schlechtere Ergebnisse liefert als die beiden anderen untersuchten Kompressionsverfahren (z.B. maximale positive/negative Differenz in Abbildung 6.14). Das gleiche gilt für die Betrachtung der Entropie bei den komprimierten Bildern. Betrachtet man schließlich noch die Ergebnisse der digitalen Punktübertragung bezüglich der Übertragungsquoten und der Genauigkeit, so erhält man erneut dasselbe Ergebnis: Die fraktale Kompression fällt deutlich hinter die beiden anderen Kompressionsarten zurück. Daher werden für die nun folgende Untersuchung der Genauigkeit der digitalen Punktübertragung mit komprimierten, echten Stereobildpaaren nur noch das JPEG-Kompressionsverfahren und die Wavelet-Methode näher untersucht. Die fraktale Kompression wird aufgrund der oben beschriebenen Nachteile nicht mehr weiter in der Untersuchung berücksichtigt.

Kapitel 7

Einfluss der Kompression auf reale Stereobilder

Aufgrund der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen wird im folgenden nur noch mit den beiden genannten Kompressionsverfahren JPEG und Wavelet gearbeitet. Bei den bislang durchgeführten Tests wurde mit "künstlichen" Stereobildern gearbeitet, um zu erreichen, dass alle auftretenden Fehler eindeutig auf den Einfluss des jeweiligen Kompressionsverfahrens zurückzuführen sind. Dadurch bleibt jedoch die Frage offen, wie sich die Kompressionsverfahren auf die digitale Punktübertragung bei echten Stereobildpaaren auswirken. Um diesen letzten Bereich abzudecken, wurde die nachfolgende Untersuchung durchgeführt.

7.1 Die Bilddaten

Bei der nachfolgend beschriebenen Untersuchung fanden die gleichen Bilddaten Verwendung wie in Kapitel 6. Dennoch ändert sich das Bildmaterial in zwei wesentlichen Punkten. Zum einen erfolgt die Punktübertragung nicht mehr nur auf Bildausschnitten, sondern auf dem gesamten Bild, zum anderen wird für die Punktzuordnung nicht mehr eine reduzierte, sondern die maximal mögliche bzw. originale Auflösung (aus Scanvorgang bzw. originale Aufnahme einer digitalen Kamera) verwendet.

7.1.1 RMK Top - Bilder

Für die Daten der Kamera RMK Top bedeutet dies, dass ein Stereobildpaar (ca. 60% Überlappung) des in Kapitel 6.1 beschriebenen Gebietes verwendet wurde. Da es sich bei dem abgebildeten Gebiet um ein sehr bewegtes Gelände handelt, war zu erwarten, dass die gewohnt hohe Übertragungsquote der digitalen Punktübertragung durch das Standardverfahren (keine Veränderung der Maskengröße) nicht erreicht werden würde. Daher wurde lediglich versucht, die Erfolgsquote durch möglichst gut vorgegebene Näherungswerte zu steigern.

7.1.2 DPA - Bilddaten

Die Bilddaten der digitalen Kamera DPA wurden bei dieser Untersuchung nicht mehr reduziert, sondern in ihrer originalen Auflösung verwendet; d.h. ein Bildpixel entspricht einer Auflösung am Boden von 25 cm. Da es sich bei den Aufnahmen um dasselbe Gebiet handelt wie bei den Aufnahmen der RMK Top, erfolgten hier ansonsten die gleichen Maßnahmen.

7.1.3 MOMS-2P - Bilddaten

Auch für die MOMS02-Kamera wurde der untersuchte Ausschnitt derart vergrößert, dass er die gesamte Breite einer MOMS-Szene abdeckt. Genauso erfolgte die Untersuchung auf der originalen Auflösung der Bilddaten des Modus A der MOMS-2P-Kamera. Wie schon bei der obigen Untersuchung fanden auch hier nur der vorwärts- und der rückwärtsblickende Kanal Verwendung.

7.2 Ziele der Untersuchung

Im folgenden wird die Auswirkung der beiden Kompressionsverfahren auf die Genauigkeit der digitalen Punktübertragung bei Stereobildpaaren näher untersucht. Der Einfluss der Kompressionsverfahren auf die Qualität der einzelnen Bilder wird nicht mehr näher betrachtet, da für jedes einzelne Bild dieselben Bedingungen herrschen wie im zuvor beschriebenen Kapitel.

Bei der Untersuchung erfolgt nun die Zuordnung der Punkte zwischen zwei vom Aufnahmezeitpunkt und in der Lage des Aufnahmeortes verschiedenen Bildern. Somit unterscheiden sich die Bildinhalte und dadurch auch die erzielten Kompressionsraten bei gleicher Qualität der beiden Bilder. Wichtig bei der Untersuchung ist jedoch, dass die digitale Punktübertragung auf Bildpaaren mit nahezu identischen Kompressionsraten erfolgt. Daher wurde versucht, möglichst identische Kompressionsraten über die verschiedenen Einstellmechanismen der beiden Kompressionsverfahren zu erzeugen.

Das Hauptaugenmerk richtet sich bei dieser Untersuchung wiederum auf den maximal möglichen Kompressionsfaktor bei dem sich die Genauigkeit der Punktübertragung nicht übermäßig verschlechtert. Da in der Photogrammetrie eine Lageveränderung von einem halben Pixel bereits einen erheblichen Genauigkeitsverlust darstellt, werden die Kompressionsfaktoren nur solange erhöht bis dieser Wert überschritten wird. Höhere Kompressionsraten sind für das Resultat dieser Untersuchung nicht mehr von Bedeutung und werden daher auch nicht näher betrachtet.

7.3 Übertragungsbedingungen

Bei der nachfolgend beschriebenen Untersuchung werden echte Stereobildpaare verwendet. Für die Untersuchung stellt sich somit das Problem, dass die korrekte Lösung der Punktübertragung, also die richtige Position des zu übertragenden Punktes im Stereopartner, nicht bekannt ist. Somit sind für die Genauigkeitsüberprüfung zunächst keine Sollwerte vorhanden. Legt man der Übertragung wiederum ein regelmäßiges Raster zugrunde, kann unter diesen Voraussetzungen nicht ermittelt werden, warum ein Punkt nicht übertragen werden konnte. Um ideale Überprüfungsmöglichkeiten zu erhalten, müssen daher einige Voraussetzungen geschaffen werden.

7.3.1 Sollwerte für die Überprüfung der Ergebnisse

Eine Fehlzuordnung bzw. Nichtübertragung eines Punktes kann im wesentlichen aus zwei Gründen resultieren: Zum einen könnte unter Umständen ein Punkt aufgrund der im Bild enthaltenen Information (z.B. 3D-Diskontinuität) nicht übertragen werden, zum anderen könnte durch den Einfluss des verwendeten Kompressionsverfahrens die im Bild zuvor noch enthaltene Information derart verändert werden, dass anschließend ein Punkt nicht mehr übertragen werden kann.

Um auszuschließen, dass ein Punkt aufgrund der im Stereobildpaar enthaltenen Information nicht übertragbar ist, erfolgt die Punktübertragung zunächst auf unkomprimierten Bilddaten. Bei der Übertragung wird ein regelmäßiges Raster mit Näherungswerten in ausreichender Genauigkeit verwendet. Die Punktübertragung erfolgt dabei mit Selbstkontrolle, so dass die erhaltenen Punkte die größtmögliche Genauigkeit besitzen. Dadurch wird folgendes erreicht:

- Liste mit im gegebenen Stereopaar erfolgreich übertragbaren Punkten wird erzeugt
- Ermittelte Punktpositionen im Stereopartner werden als Referenzpositionen verwendet
- Diese Liste mit anschließend verfälschten Ergebniswerten kann als Ausgangsliste für alle weiteren Punktübertragungen auf den komprimierten Bilddaten Verwendung finden

Finden nun die aus dieser ersten Übertragung stammenden Punkte für die weiteren Untersuchungen Verwendung, ist sichergestellt, dass jeder nun nicht übertragbare Punkt aufgrund des Einflusses des jeweiligen Kompressionsverfahrens nicht übertragen werden konnte. Außerdem kann jedes Übertragungsergebnis mit den Referenzpositionen verglichen werden.

7.3.2 Übertragungsmethoden, untersuchte Kombinationen und Bedingungen

Wie im vorigen Kapitel bereits erwähnt, verfügt die digitale Punktübertragung über zwei grundsätzlich verschiedene Übertragungsmethoden: die Übertragung mit und ohne Selbstkontrolle. Die genaue Beschreibung dieser beiden Verfahren kann nochmals in Kapitel 5.3.1 nachgelesen werden. Aus diesen beiden grundsätzlichen Methoden ergeben sich somit die folgenden beiden Typen für die Punktübertragung bei den untersuchten Stereobildpaaren:

TYP A: Übertragung eines Punktes ohne Selbstkontrolle.

TYP B: Übertragung eines Punktes mit Selbstkontrolle.

Auf die beiden hier beschriebenen Typbezeichnungen wird im folgenden Bezug genommen. Es sei an dieser Stelle noch betont, dass sich die Bezeichnung für die Übertragungsmethoden gegenüber dem vorigen Kapitel verändert hat.

Für die Punktübertragung mit dem Least Squares Matching-Verfahren wurden folgende Parameter verwendet. Dabei handelt es sich um die unveränderten Größen der vorigen Untersuchung:

Parameter	Wert	
Fenstergröße des Matchingverfahrens	21 * 21	Pixel
Maximale Iterationszahl	25	Iterationen
Konvergenzbedingung der zu schätzenden Parameter	0,01	Pixel
Minimalwert der Korrelation	0,5	
Maximale Abweichung bei Selbstkontrolle	0,1	Pixel

Tabelle 7.1: Konvergenzbedingungen der zu schätzenden Parameter, reale Stereobilder

Für jeden Kameratyp wurde eine Liste mit Näherungswerten erzeugt. Daher variiert die Anzahl der in der jeweiligen Liste enthaltenen Punktpaare. Allen Punktlisten gemein ist die Genauigkeit dieser Näherungswerte. Jedes Punktpaar besitzt eine maximal mögliche Abweichung von ± 1 Pixel in x- und y-Richtung¹. Dadurch war gewährleistet, dass die in der anschließenden Untersuchung durchgeführten Punktübertragungen ohne den Einsatz von Pyramiden erfolgen konnte, wodurch die Zuordnung mit einer erheblichen Zeitersparnis durchzuführen war. Tabelle 7.2 zeigt für jeden Kameratyp die Anzahl an verwendeten Punktpaaren und die Maschengröße des zur Erzeugung des Punkthaufens verwendeten regelmäßigen Rasters.

Kamera	Anzahl Punktpaare	Rasterweite [Pixel]
RMK Top	33580	25
DPA	35594	25
MOMS	208584	5

Tabelle 7.2: Anzahl verwendeter Punktpaare, Maschengröße des zur Punktgewinnung verwendeten regelmäßigen Rasters

¹ Mit Hilfe eines regelmäßigen Rasters wurde unter Anwendung der Grob-zu-Fein Strategie zunächst eine Referenzliste erzeugt und diese anschließend künstlich verfälscht.

7.4 Kompressionsfaktoren und Qualitätsbeurteilung

Wie in Kapitel 6 erfolgt auch hier die Beschreibung der einzelnen Ergebnisse immer in der Reihenfolge RMK Top, DPA und MOMS. In bestimmten Fällen wird auch nur eines der drei Kamerasysteme als Beispiel beschrieben bzw. dargestellt, falls sich die anderen Systeme ähnlich oder gleich verhalten.

7.4.1 Kompressionsfaktoren als Maß für die Vergleichbarkeit der beiden betrachteten Kompressionsverfahren

Aus den vorangegangenen Betrachtungen ist leicht zu erkennen, dass der Kompressionsfaktor als einziges Maß einen Vergleich zwischen den verschiedenen Kompressionsverfahren ermöglicht. Ebenso verdeutlichen die Ergebnisse, dass die hohen, erzielbaren Kompressionsraten für die Untersuchung nicht von Belang sind, da bereits bei sehr niedrigen Kompressionsfaktoren die geforderte Genauigkeit nicht mehr erreicht werden kann. Dass sich das Verhältnis zwischen den erzielbaren Kompressionsfaktoren und den beiden getesteten Kompressionsverfahren nicht aufgrund der neuen Bilddaten geändert hat, zeigt die nachfolgende Abbildung 7.1.

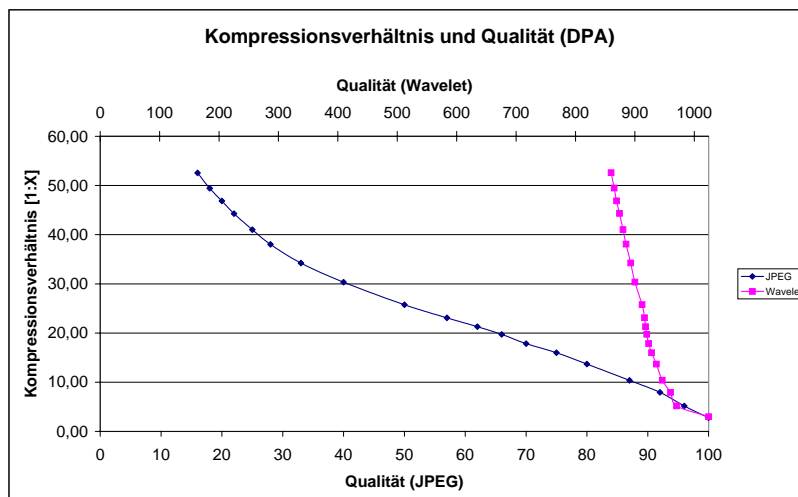


Abbildung 7.1: Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (DPA)

Vergleicht man Abbildung 7.1 mit Abbildung 6.9 in Kapitel 6.4.1, so stellt man fest, dass die erzielten Kompressionsraten der beiden Verfahren im Verhalten den Ergebnissen des vorangegangenen Tests entsprechen. Dies bestätigt erneut die Vermutung, dass der erzielte Kompressionsfaktor mehr vom verwendeten Kompressionsverfahren als vom verwendeten Bild abhängt². Die erneute Gegenüberstellung von Qualitätsfaktoren und Kompressionsfaktoren zeigt, dass mit Hilfe der in den Kompressionsverfahren zur Verfügung gestellten Qualitätseinstellung kein sinnvoller Vergleich möglich ist. Daher wird weiterhin zum Vergleich der einzelnen Ergebnisse der Kompressionsfaktor benutzt.

Die benutzten Kompressionsfaktoren wurden folgendermaßen erzeugt: Zunächst wurden die bisher verwendeten Qualitätsstufen des JPEG-Verfahrens auf die neuen Bilddaten (1. Stereobild) angewandt. Anschließend wurde die Kompression auf den 2. Stereopartner mit denselben Qualitätsstufen durchgeführt. Ein Vergleich der erzielten Kompressionsraten zeigte, dass nur geringfügige Abweichungen in der Kompressionsrate zwischen den beiden Stereopartnern auftraten, die durch Verwendung einer benachbarten Qualitätsstufe nicht mehr verbessert werden konnten. Somit wurden für jede untersuchte Kompressionsstufe des JPEG-Verfahrens Stereopaare mit ähnlicher Kompressionsrate erzeugt. Die so gewonnenen Kompressionsraten des JPEG-Verfahrens

² Diese Aussage stimmt sicherlich nicht, wenn es sich bei dem zu komprimierenden Bild z.B. um eine homogene schwarze Fläche handelt. Ein Bild dieser Art stellt einen Sonderfall dar, bei dem der zu erwartende Kompressionsfaktor entscheidend vom Verwaltungsaufwand des einzelnen Kompressionsverfahrens abhängt. Die Aussage gilt jedoch mit Sicherheit für die getesteten Luftbildaufnahmen.

wurden anschließend für die Kompression der gleichen Bilder mit Hilfe des Wavelet-Verfahrens verwendet, wobei durch die Möglichkeit der direkten Vorgabe des zu erzeugenden Kompressionsverhältnisses im Wavelet-Verfahren beide Bilder des Stereopaars den fast identischen Kompressionsfaktor erhielten.

Tabelle 7.3 zeigt die Größe der komprimierten Bilddateien und die daraus resultierenden Kompressionsfaktoren. Ebenso sind in dieser Tabelle die zu den Kompressionsverhältnissen gehörenden Qualitätsfaktoren des betreffenden Verfahrens angegeben.

JPEG			Wavelet		
Qualität	Größe [Byte]	Kompressionsverhältnis [1:X]	Qualität	Größe [Byte]	Kompressionsverhältnis [1:X]
16	1756311	52,55	860	1754552	52,61
18	1867319	49,43	865	1865300	49,48
20	1970460	46,84	869	1968440	46,89
22	2084262	44,29	874	2081776	44,34
25	2251221	41,00	880	2248824	41,04
28	2426848	38,03	885	2424448	38,07
33	2697343	34,22	893	2694384	34,26
40	3042731	30,34	900	3038952	30,37
50	3583903	25,75	912	3580652	25,78
57	3998765	23,08	916	3994880	23,10
62	4336547	21,28	918	4332792	21,30
66	4681254	19,72	920	4675552	19,74
70	5173216	17,84	923	5168264	17,86
75	5773620	15,99	928	5766220	16,01
80	6744926	13,68	936	6739904	13,69
87	8888929	10,38	946	8882648	10,39
92	11639497	7,93	960	11626972	7,94
96	17859444	5,17	970	17812124	5,18
100	33280410	2,77	1024	30890804	2,99

Tabelle 7.3: Verwendete Kompressionsfaktoren am Beispiel des DPA-Bilddatensatzes, Stereo

7.4.2 Statistische Analyse des Kompressionseinflusses

Auf die statistische Analyse des Kompressionseinflusses bei den Bilddaten der echten Stereopaare wurde verzichtet, da es sich bei diesen Daten zum einen nur um einen vergrößerten Bereich der bereits in dieser Hinsicht untersuchten Daten handelt, deren Ergebnisse in Kapitel 6 unter Abschnitt 6.4.2 nachgelesen werden können. Zum anderen bilden auch die noch nicht untersuchten Bilddaten (die Stereopartner) ähnliche Bildbereiche ab. Sie wurden mit denselben Kamerasystemen aufgenommen und anschließend mit den gleichen Kompressionsverfahren bearbeitet. Daher sind für diese Aufnahmen keine besonderen Abweichungen gegenüber den vorigen Ergebnissen zu erwarten. Bezüglich ihrer Qualität wurden die Bilder intensiv betrachtet und insbesondere ergab auch die nachfolgend durchgeführte Untersuchung keine unerwartete Besonderheit, die auf eine grundlegende Störung des Bildmaterials gedeutet hätte.

7.5 Übertragungsquoten

Neben der erreichten Genauigkeit ist die Anzahl der erfolgreich übertragenen Punkte ein weiteres wichtiges Ziel der digitalen Punktübertragung. Die aus der Punktübertragung abgeleiteten Ergebnisse können durch eine entsprechend hohe Übertragungsquote unterstützt und in der Zuverlässigkeit ihrer Aussage noch gestärkt werden. Ebenso wird durch eine hohe Übertragungsquote erreicht, dass nahezu jedes in Betracht gezogene Gebiet zugeordnete Punkte enthält. Dadurch kann z.B. bei der Erzeugung eines digitalen Geländemodells ein vollautomatisch gemessener Punkthaufen verwendet werden.

Wie bereits erwähnt und im vorigen Kapitel dargestellt, verfügt das verwendete digitale Punktübertragungsverfahren über einen Mechanismus, der die übertragenen Punkte hinsichtlich ihrer Qualität näher untersucht. Auch bei dem neuerlichen Test mit echten Stereopaaren erfolgt die Punktübertragung ohne und mit Hilfe dieses Algorithmus. Die folgenden Abbildungen (Abbildung 7.2 - 7.4) zeigen den Erfolg dieses Kontrollmechanismus. Unabhängig von Bildmaterial und Kompressionsverfahren verringert sich die Anzahl an erfolgreich übertragenen Punkten, wenn man die Erfolgsquoten der Punktübertragung nach TYP A (ohne Selbstkontrolle) mit denen nach TYP B (mit Selbstkontrolle) vergleicht. Die Verringerung der Anzahl der erfolgreich übertragenen Punkte steht natürlich zunächst im Widerspruch zu dem Ziel möglichst viele Punkte zu übertragen, jedoch wird letztendlich mehr Wert auf die Genauigkeit der übertragenen Punkte gelegt, als auf deren Anzahl. Da durch die Selbstkontrolle vorzugsweise schlechte und somit ungenau übertragene Punkte aus dem betrachteten Verband entfernt werden, verbessert sich die Qualität des übriggebliebenen Punkthaufens.

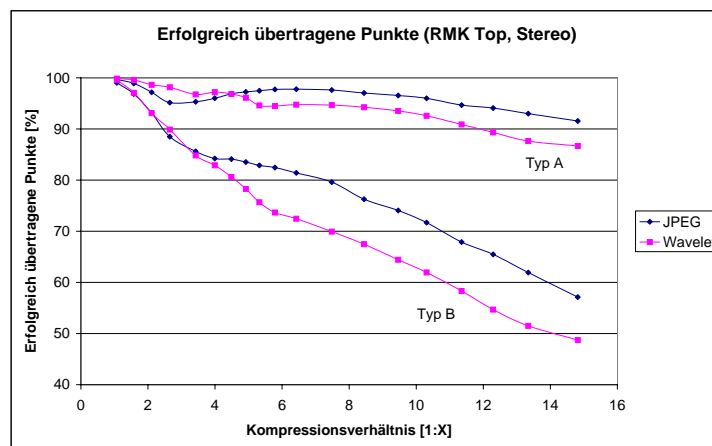


Abbildung 7.2: Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel RMK Top (Typ A: ohne Selbstkontrolle, Typ B: mit Selbstkontrolle)

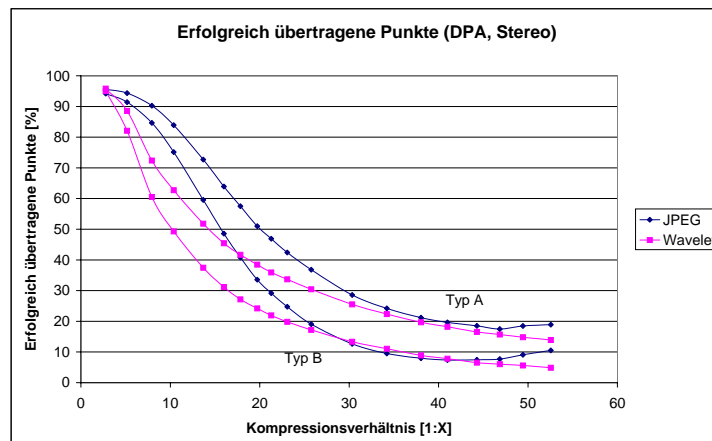


Abbildung 7.3: Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel DPA (Typ A: ohne Selbstkontrolle, Typ B: mit Selbstkontrolle)

Dem aufmerksamen Leser ist sicherlich nicht entgangen, dass sich die Ergebnisse der DPA-Daten deutlich von denen der beiden anderen Kamerasystemen unterscheiden. Nach der ersten Betrachtung des Diagramms könnte man einen Fehler in der Untersuchung vermuten. Dies ist jedoch nicht der Fall. Bei der DPA-Kamera wurde unter Verwendung der JPEG-Kompression mit derselben Qualitätsstufe ein deutlich höherer Kompressionsfaktor als bei den beiden anderen Datensätzen (RMK Top bzw. MOMS) erreicht. Vergleicht man die Ergebnisse mit den anderen Datensätzen bei ähnlicher Kompressionsrate, so stellt man fest, dass sich lediglich die Ergebnisse der Übertragung nach Typ A (ohne Selbstkontrolle) von denen der beiden anderen Datensätze unterscheiden. Die Übertragung nach Typ B (mit Selbstkontrolle) liefert ein ähnliches Ergebnis wie die Daten der beiden anderen Kamerasysteme. Bei der Übertragung ohne Selbstkontrolle unterscheidet sich das Ergebnis der DPA-Kamera jedoch leicht von denen der RMK Top- und der MOMS-Daten. Die durch die beiden Kompressionsverfahren erzeugten Störungen bewirken in diesem Fall einen deutlichen Rückgang der Übertragungsquote, so dass die Differenz zwischen der Übertragung mit bzw. ohne Selbstkontrolle relativ gering bleibt.

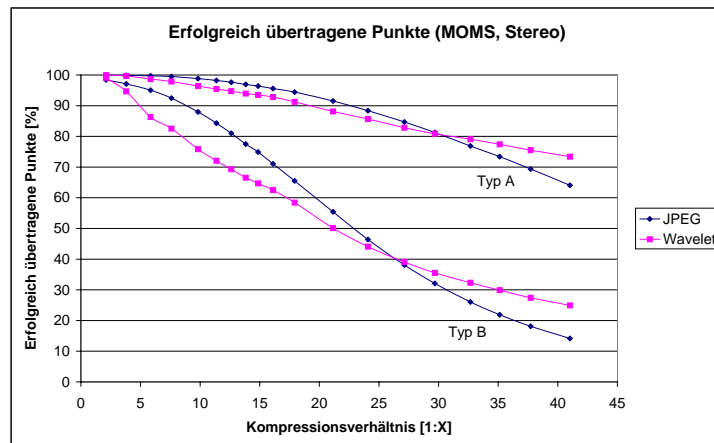


Abbildung 7.4: Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel MOMS (Typ A: ohne Selbstkontrolle, Typ B: mit Selbstkontrolle)

Bei den für die Untersuchung relevanten Kompressionsraten trifft dies jedoch nicht zu. Hier können dennoch deutliche Unterschiede zwischen den Übertragungen nach Typ A bzw. Typ B festgestellt werden. Tabelle 7.4 zeigt die maximal zulässige Kompression bei 10% Übertragungsverlust. Bei näherer Betrachtung erkennt man nun, dass sich die Ergebnisse der DPA-Daten im mittleren Bereich gegenüber den beiden anderen Datensätzen befinden. Dies gilt jedoch nur für die Übertragung nach Typ B (mit Selbstkontrolle).

Kamera	Kontrolle bei Übertragung	Kompressionsart	
		JPEG	Wavelet
RMK Top	Ohne	1:17	1:12
	Mit	1:3	1:3
DPA	Ohne	1:7	1:5
	Mit	1:5	1:4
MOMS	Ohne	1:22	1:19
	Mit	1:9	1:5

Tabelle 7.4: Kompressionsfaktor bei 10% Übertragungsverlust

Ein weiteres wichtiges Ergebnis liefert die Gegenüberstellung der beiden Kompressionsarten. Genau wie bei der vorangegangenen Untersuchung liefert das JPEG-Verfahren die höheren zulässigen Kompressionsfaktoren. Auch für das Stereopaar gilt somit, dass das Verfahren der JPEG-Kompression weniger Einfluss auf die Übertragungsquoten nimmt als das Wavelet basierte Verfahren.

7.6 Iterationszahl

Wie bereits mehrfach erwähnt spielt die Anzahl der zur Übertragung eines Punktes benötigten Iterationen eine nicht unwesentliche Rolle. Daher wird auch für das echte Stereopaar am Beispiel der MOMS-Daten das Verhalten der digitalen Punktübertragung bei Anwendung der beiden Kompressionsverfahren dargestellt. Wie Abbildung 7.5 zeigt, nimmt auch im Stereofall mit der Erhöhung des Kompressionsfaktors die Anzahl der zur

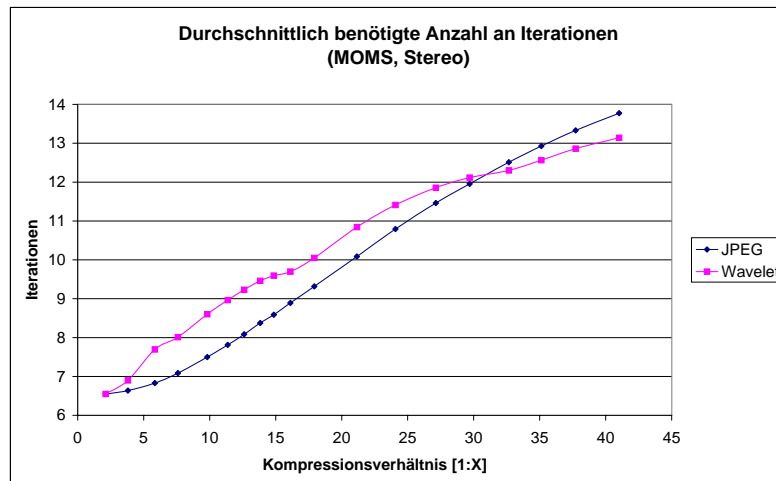


Abbildung 7.5: Durchschnittlich zur Punktübertragung mittels Least Squares Matching benötigte Anzahl an Iterationen am Beispiel MOMS

Übertragung benötigten Iterationen und somit die zur Übertragung eines einzelnen Punktes benötigte Zeit stetig zu. Bereits bei einem Kompressionsverhältnis von ca. 1:38 benötigt man fast die doppelte Zeit für die Übertragung eines Punktes.

Ferner stellt sich auch hier heraus, dass die mit dem JPEG-Verfahren komprimierten Bilder deutlich weniger Iterationen für die Übertragung eines Punktes benötigen als die mit dem Wavelet-Verfahren komprimierten Bilder. Dies gilt zumindest für den für diese Untersuchung im wesentlichen zu betrachtenden Bereich des Kompressionsfaktors.

7.7 Einfluss der Kompression auf die Genauigkeit der Punktübertragung

Innerhalb der digitalen Photogrammetrie wird das Verfahren des intensitätsbasierten Least Squares Matching unter anderem auch deshalb eingesetzt, weil mit Hilfe dieses Verfahrens die höchste Präzision bei der automatischen Übertragung eines Punktes in seinen Stereonachbarn erreicht wird. Auch eine Zuordnung derselben Punkte durch einen Operateur würde das Ergebnis der Punktübertragung bei zuvor erfolgreich durchgeführter automatischer Punktzuordnung eher verschlechtern denn verbessern. Folglich legt man bei der Verwendung von Kompressionsverfahren sehr viel Wert darauf, die mit Hilfe der automatischen Punktübertragung erzielte Genauigkeit nicht zu verlieren. Daher sollen die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse der Untersuchung zeigen, bis zu welchem Kompressionsfaktor ein Bild komprimiert werden darf, ohne die geforderte Genauigkeit zu verlieren. Des weiteren soll gezeigt werden, inwieweit die Übertragungsgenauigkeit und das damit verbundene, höchstmögliche Kompressionsverhältnis auch noch von anderen Faktoren wie Bilddaten und Kompressionsverfahren abhängt.

7.7.1 Kompressionsverfahren, Kompressionsfaktor

Unter Abschnitt 6.7.2 des vorigen Kapitel 6 wurde der Einfluss der Kompression auf ein künstlich generiertes Bildpaar näher untersucht. Dabei konnten verschiedene Einflüsse der einzelnen Kompressionsverfahren auf die Genauigkeit der Punktübertragung nachgewiesen werden. Ebenso stellte sich heraus, dass das Verfahren der fraktalen Kompression im Vergleich zur JPEG- bzw. Wavelet-Kompression so schlecht abschneidet, dass für die weiterführenden Untersuchungen nur noch die beiden zuletzt genannten Verfahren verwendet wurden. Des weiteren ergab die Untersuchung, dass kein allgemein gültiger, maximal möglicher Kompressionsfaktor ermittelt werden konnte. Abhängig von Bilddaten und Verfahren der Kompression konnten verschiedene maximal mögliche Kompressionsfaktoren ermittelt werden. Alle bislang erhaltenen Ergebnisse wurden jedoch mit Hilfe eines künstlich generierten Stereopaars erzeugt. Daher erfolgte im letzten Schritt eine ähnlich strukturierte Untersuchung, die das Verhalten der Genauigkeit der digitalen Punktübertragung bei einem echten Stereopaar aufzeigt.

Dabei wurde die Untersuchung in zwei grundsätzliche Übertragungsmethoden aufgeteilt. Zunächst erfolgte die Übertragung der Punkte mit dem bekannten Least Squares Matching ohne Selbstkontrolle. Die Ergebnisse der mit Typ A bezeichneten Untersuchung zeigt Abbildung 7.6 für die Daten der Kamera RMK Top. Wie zu erwarten war, kann bereits bei einem sehr kleinen Kompressionsverhältnis ein erheblicher Verlust bei der Genauigkeit

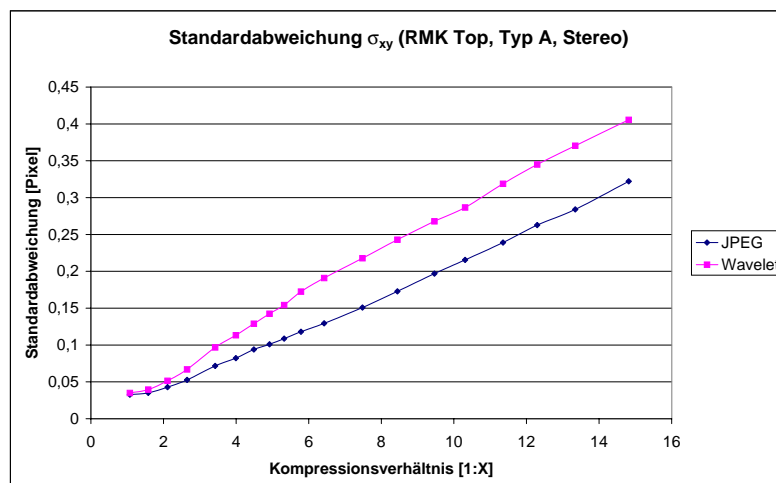


Abbildung 7.6: Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top ohne Selbstkontrolle, echtes Stereobildpaar

der Punktübertragung nachgewiesen werden. Schon bei einem Kompressionsverhältnis von 1:4,8 überschreitet der Fehler der Zuordnung für das JPEG-Verfahren die 0,1 Pixel Grenze. Für das Wavelet-Verfahren geschieht dies bereits bei einem Kompressionsverhältnis von 1:3,5. Dies bestätigt somit die Ergebnisse der zuvor mit den künstlichen Stereobildern durchgeführten Untersuchung. Auch dort konnte bereits bei geringen Kompressionsfaktoren ein deutlicher Genauigkeitsverlust nachgewiesen werden. Auch die Art der Fehlerzunahme entspricht der der vorigen Untersuchung. Auch dort nahm der Fehler nahezu linear mit dem Kompressionsfaktor zu. Da Abbildung 7.6 nur die Ergebnisse für die Daten der RMK Top-Kamera darstellt, erfolgt die Darstellung der maximalen Kompressionsfaktoren für alle Bilddaten und Kompressionsverfahren in Tabelle 7.5. In dieser Tabelle ist übersichtlich dargestellt, bei welchem Kompressionsfaktor abhängig von Kompressionsverfahren und Bilddatensatz die 0,1 Pixel Grenze des Fehlers bei der Punktübertragung durchbrochen wird. Auch für das echte Stereopaar gilt, dass kein einheitlicher maximaler Kompressionsfaktor gefunden werden kann. Generell schneidet auch hier das JPEG-Verfahren besser ab als die Wavelet basierte Kompression. Für alle drei getesteten Bilddatensätze können mit der JPEG-Kompression höhere Kompressionsfaktoren verwendet werden als bei dem Wavelet basierten Kompressionsverfahren. Eine weitere Parallele zu der vorangegangenen Untersuchung stellt der Vergleich der Kompressionsfaktoren in Abhängigkeit vom Bildmaterial dar. Auch in der hier durchgeführten Untersuchung zeigt sich, dass die verschiedenen Bilddatensätze verschieden stark komprimiert werden können, wobei der gleiche Fehler in der nachfolgenden Punktübertragung erzeugt wird. Dabei können die Daten der MOMS02-Kamera am stärksten komprimiert werden. Für das JPEG-Verfahren ist ein maximales Kompressionsverhältnis von 1:9,3 bei den MOMS-Daten möglich. Es folgen die Daten der DPA-Kamera (bei JPEG bis 1:7,9), gefolgt von den Daten der RMK Top-Kamera (bei JPEG bis 1:4,8), die auf die

Kamera	Kompressions-	
	Verfahren	Rate [1:X]
RMK Top	JPEG	4,8
	Wavelet	3,5
DPA	JPEG	7,9
	Wavelet	4,8
MOMS	JPEG	9,3
	Wavelet	5,4

Tabelle 7.5: Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ A

Einflüsse der Kompressionsverfahren am empfindlichsten reagieren. Hier zeigt sich zum ersten Mal ein Unterschied zur vorangegangenen Untersuchung, bei der die Daten der RMK Top-Kamera noch stärker komprimiert werden konnten als die der DPA-Kamera. Durch die Verwendung von echten Stereopaaren kommt nun jedoch zum Tragen, dass die Bilder der RMK Top etwas verrauschter sind als die der DPA-Kamera. Daher reagieren die Daten der RMK Top empfindlicher auf die Einflüsse der Kompressionsverfahren als die Daten der beiden anderen Kamerasysteme. Somit sei betont:

Mit den direkt digital aufgezeichneten Bilddaten der MOMS02- bzw. DPA-Kamera lassen sich höhere Kompressionsraten erzielen als mit den filmbasierten Bilddaten der RMK Top.

Ein weiterer Unterschied ist in Tabelle 7.6 ersichtlich. Mit Ausnahme der DPA-Daten nimmt die maximal zulässige Kompressionsrate bei der die 0,1 Pixel Grenze überschritten wird für den Fall des echten Stereopaars ab.

Kamera	Verfahren	Kompressions-	
		Rate [1:X]	
		künstlich	echt
RMK Top	JPEG	5,6	4,8
	Wavelet	3,9	3,5
DPA	JPEG	3,8	7,9
	Wavelet	2,0	4,8
MOMS	JPEG	9,6	9,3
	Wavelet	6,6	5,4

Tabelle 7.6: Vergleich maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust zwischen künstlich generiertem und echtem Stereopaar, Punktübertragung ohne Selbstkontrolle

Die Ausnahme bilden auch hier die Ergebnisse der DPA-Daten. Hier ist eine deutliche Zunahme des Kompressionsfaktors gegenüber den Ergebnissen des vorangegangenen Tests zu erkennen. Die Ergebnisse der Untersuchung nach Typ A ohne Selbstkontrolle bestätigen die bislang gewonnenen Erkenntnisse, wonach sich das Verfahren der JPEG-Kompression gegenüber der Wavelet-Kompression durchsetzt.

Um einen letzten Eindruck zu erhalten, wurde schließlich die Untersuchung mit der Punktübertragung nach Typ B mit Selbstkontrolle durchgeführt. Auch für diese Untersuchung dient zur Darstellung der Ergebnisse das Diagramm der RMK Top-Daten, die in Abbildung 7.7 ersichtlich sind. Wie zu erwarten war, nimmt auch hier analog zu der im vorigen Kapitel durchgeführten Untersuchung die maximal mögliche Kompressionsrate, bei der die 0,1 Pixel Grenze überschritten wird, zu. Mit anderen Worten: Durch die Einführung der Selbstkontrolle werden durch das Verfahren Punkte minderwertiger Genauigkeit aus dem Punkthaufen der erfolgreich übertragenen

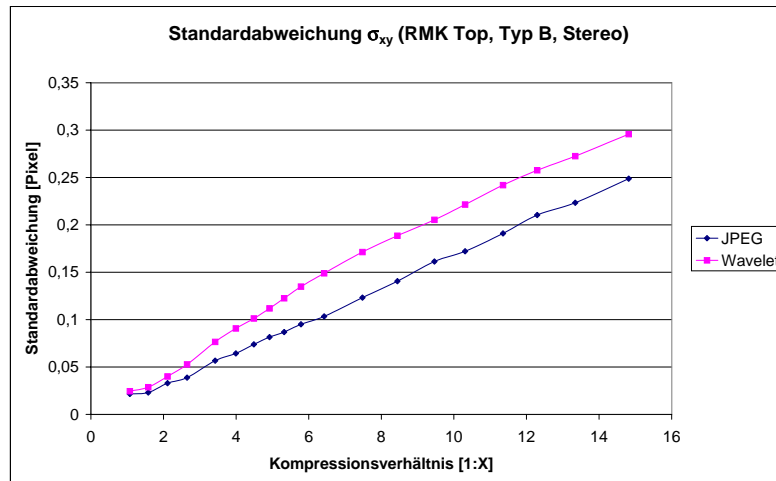


Abbildung 7.7: Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top mit Selbstkontrolle, echtes Stereobildpaar

Punkte entfernt. Betrachtet man z.B. Abbildung 7.2, so erkennt man, dass bei einem Kompressionsverhältnis von 1:5 ca. 15% der Punkte durch die Selbstkontrolle eliminiert werden. Bei höheren Kompressionsfaktoren können sogar mehr als 30% der zuvor noch erfolgreich übertragenen Punkte der Selbstkontrolle zum Opfer fallen, wodurch sich jedoch die Genauigkeit des verbleibenden Punkthaufens erhöht.

In Abbildung 7.8 ist der Zusammenhang zwischen der Genauigkeit der übertragenen Punkte und der Erfolgsquote der Übertragung am Beispiel der RMK Top für beide Übertragungsmethoden dargestellt. Unter der zunehmenden Kompression vergrößert sich der erhaltene Fehler bei der Genauigkeit der Übertragung mit gleichzeitiger Verringerung der erfolgreich übertragenen Punkte. Dieser Sachverhalt gilt für alle drei getesteten

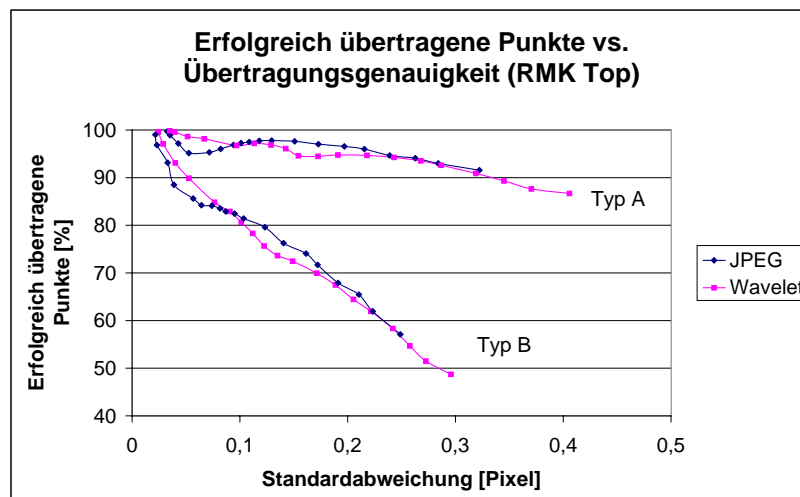


Abbildung 7.8: Übertragungsquote vs. Genauigkeit der Übertragung am Beispiel der RMK Top

Datensätze (RMK Top, DPA und MOMS02). Abbildung 7.8 zeigt einen Bereich der Kompressionsverhältnisse von 1:1 bis ca. 1:15. Aus der Darstellung kann man direkt die nachfolgenden Schlüsse ziehen. Durch die Einführung der Selbstkontrolle verringert sich zwar die Anzahl an erfolgreich übertragenen Punkten, jedoch erhöht sich dadurch die Genauigkeit der verbleibenden Punktmenge. Des weiteren zeigen die "kürzeren" Kurven der JPEG-Kompression, dass das JPEG-Verfahren genauere Ergebnisse bei gleicher Kompression liefert als das Wavelet-Verfahren.

Eine weitere Sicht zeigt die Betrachtung der Genauigkeit der erhaltenen Punkte bei 10% Übertragungsverlust. Bei der Übertragung nach Typ A erhält man am Beispiel der RMK Top bei 10% Verlust der Übertragungsquote eine Genauigkeit von 0,36 Pixel bei JPEG bzw. 0,33 Pixel beim Wavelet-Verfahren. Diese Genauigkeiten ändern sich deutlich, wenn die Übertragung der Punkte nach dem Verfahren Typ B erfolgt. Bei 10% Übertragungsverlust liefert das JPEG-Verfahren eine Genauigkeit von 0,04 Pixel und das Wavelet-Verfahren eine Genauigkeit von 0,06 Pixel. Bei den nicht mehr übertragenen Punkten handelt es sich tatsächlich um ungenaue Punkte, wodurch sich die Genauigkeit der verbleibenden Punkte nicht unnötig verschlechtert. Tabelle 7.7 zeigt die Genauigkeit der erhaltenen Punktmenge bei 10% Übertragungsverlust.

Kamera	Übertragungsmethode	Kompressionsverfahren	Übertragungsgenauigkeit (σ) [Pixel]
RMK Top	Typ A	JPEG	0,36
		Wavelet	0,33
	Typ B	JPEG	0,04
		Wavelet	0,06
DPA	Typ A	JPEG	0,10
		Wavelet	0,10
	Typ B	JPEG	0,06
		Wavelet	0,06
MOMS	Typ A	JPEG	0,35
		Wavelet	0,33
	Typ B	JPEG	0,08
		Wavelet	0,07

Tabelle 7.7: Genauigkeit der erfolgreich übertragenen Punkte bei 10% Übertragungsverlust

Wie bereits erwähnt, steigt durch die Einführung der Selbstkontrolle das maximal mögliche Kompressionsverhältnis an. Dies hat zur Folge, dass die in Abbildung 7.7 dargestellten Graphen etwas flacher liegen im Vergleich zu den Graphen aus Abbildung 7.6. Dies wird am Beispiel der MOMS02-Kamera besonders deutlich. Für ein Kompressionsverhältnis von 1:38 beträgt der auftretende Fehler bei der Übertragung nach Typ A (ohne Selbstkontrolle) 0,70 Pixel, während er bei der Punktübertragung nach Typ B (mit Selbstkontrolle) für denselben Kompressionsfaktor nur 0,43 Pixel beträgt. Aus den Ergebnissen der Untersuchung nach Typ B wurde nachfolgende Tabelle 7.8 erzeugt, die die maximal mögliche Kompressionsrate in Abhängigkeit von Bilddaten und Kompressionsverfahren darstellt:

Kamera	Kompressionsverfahren	
	Verfahren	Rate [1:X]
RMK Top	JPEG	6,0
	Wavelet	4,5
DPA	JPEG	8,5
	Wavelet	5,2
MOMS	JPEG	10,6
	Wavelet	7,1

Tabelle 7.8: Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ B

Es zeigt sich wiederum, dass das maximal mögliche Kompressionsverhältnis sowohl von den zu bearbeitenden Bilddaten als auch vom verwendeten Kompressionsverfahren abhängt. Des Weiteren ist auch hier das JPEG-Verfahren besser geeignet als das Wavelet-Verfahren, da es für alle Bilddaten die höheren Kompressionsraten zulässt. An der Reihenfolge der Empfindlichkeit der untersuchten Bilddaten ändert sich durch die Einführung der Selbstkontrolle nichts. Nach wie vor können die Daten der MOMS02-Kamera am stärksten komprimiert werden, bis sie den gleichen Fehler bei der Punktübertragung verursachen wie die beiden anderen Bilddatensätze. Für die Daten der MOMS02-Kamera kann unter Verwendung des JPEG-Verfahrens ein maximales Kompressionsverhältnis von 1:10,6 benutzt werden, während bei den DPA-Daten bereits bei einem Kompressionsverhältnis von 1:8,5 die Genauigkeitsgrenze überschritten wird. Das Schlusslicht bilden hier aus bekannten Gründen wiederum die Daten der RMK Top-Kamera mit einem Kompressionsverhältnis von 1:6,0.

Generell können aus den Ergebnissen folgende Schlüsse des vorangegangenen Kapitels bestätigt werden:

- **Es gibt keinen eindeutig bestimmbar, maximalen Kompressionsfaktor, für den eine vorher gewählte Genauigkeit unabhängig von Kompressionsverfahren und Bildmaterial erreicht wird. Für jeden Bilddatensatz kann ein anderer maximaler Kompressionsfaktor bestimmt werden, bei dem die geforderte Genauigkeit noch erreicht wird.**
- **Durch die Einführung der Selbstkontrolle bei der Punktübertragung erhöhen sich alle maximalen Kompressionsraten.**
- **Unabhängig vom Bildmaterial erzielt die JPEG-Kompression die höchsten Kompressionsraten und setzt sich somit als das zu empfehlende Kompressionsverfahren durch.**

Der einzige Unterschied gegenüber der Untersuchung aus Kapitel 6 resultiert in der Reihenfolge der Bilddaten bezogen auf das maximal mögliche Kompressionsverhältnis. Die Untersuchung mit echten Stereodaten hat gezeigt, dass die Daten der digitalen Kamerasysteme (MOMS02, DPA) stärker komprimiert werden können als die herkömmlich fotografierten und anschließend gescannten Daten der RMK Top-Kamera. Somit lautet hier die Reihenfolge in abnehmender maximal möglicher Kompression: MOMS, DPA und schließlich RMK Top. Da für jedes Kamerasystem nur ein einziger Datensatz getestet wurde, ist mit dieser Aussage grundsätzlich vorsichtig umzugehen. Betrachtet man jedoch die Qualität der verwendeten Bilddaten, wie sie in Kapitel 6 unter Abschnitt 6.4.2 und 6.4.3 beschrieben sind, so kann davon ausgegangen werden, dass diese Aussagen auch für andere Bilddaten dieser Kamerasysteme gelten werden.

Ein weiteres Resultat soll hier nochmals betont werden. Für alle Bilddaten und für alle relevanten Kompressionsverhältnisse erzielte das JPEG-Verfahren die besten Ergebnisse, d.h. die geringeren Fehler bei gleicher Kompressionsrate gegenüber dem Wavelet-Verfahren. Dies war nicht unbedingt zu erwarten, da das Verfahren der Wavelet-Kompression bei der Untersuchung der komprimierten Bilder hinsichtlich der Qualität die besseren Ergebnisse lieferte. Dass sich das JPEG-Verfahren dennoch gegenüber dem Wavelet-basierten Verfahren durchsetzen könnte, hat bereits die Voruntersuchung in Kapitel 6 gezeigt und sich letztendlich auch hier bestätigt.

7.7.2 Bildqualität und Punktübertragungsgenauigkeit

Wie im vorangegangenen Kapitel soll auch hier nochmals eine Darstellung der Genauigkeit der Punktübertragung in Abhängigkeit von dem durch die Anwendung der Kompression erzeugten Rauschen dargestellt werden. Wie die Ergebnisse der vorigen Untersuchung bereits gezeigt haben, fallen einzelne Bilddaten aus der gesamten Menge heraus, so dass auch mit Hilfe dieser Darstellung nicht die Möglichkeit entsteht, aufgrund einer vorher durchgeführten Untersuchung der Veränderung der Bildqualität bei bestimmter Kompressionsrate Rückschlüsse auf die zu erwartende Genauigkeit der folgenden Punktübertragung zu ziehen. Betrachtet man Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10 etwas genauer, so stellt man zwar fest, dass die dargestellten Graphen wiederum nahezu linear sind, jedoch zeigt sich ebenfalls, dass die Steigungen der einzelnen Graphen beträchtlich unterschiedlich sind. Liegen die einzelnen Graphen in den für die digitale Photogrammetrie relevanten Bereichen noch sehr nahe beieinander, so zeigt spätestens die Betrachtung der höher liegenden Kompressionsverhältnisse klar an, dass für diese das Modell nicht mehr funktioniert. Für die maximale Kompressionsrate bedeutet dies, dass sie nur in einem gewissen Bereich vermutet, nicht jedoch eindeutig bestimmt werden kann.

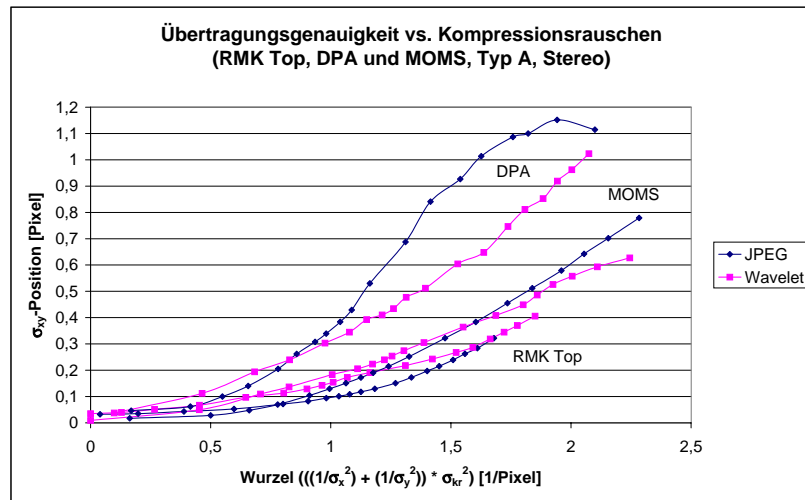


Abbildung 7.9: Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (Typ A, ohne Selbstkontrolle, echtes Stereopaar)

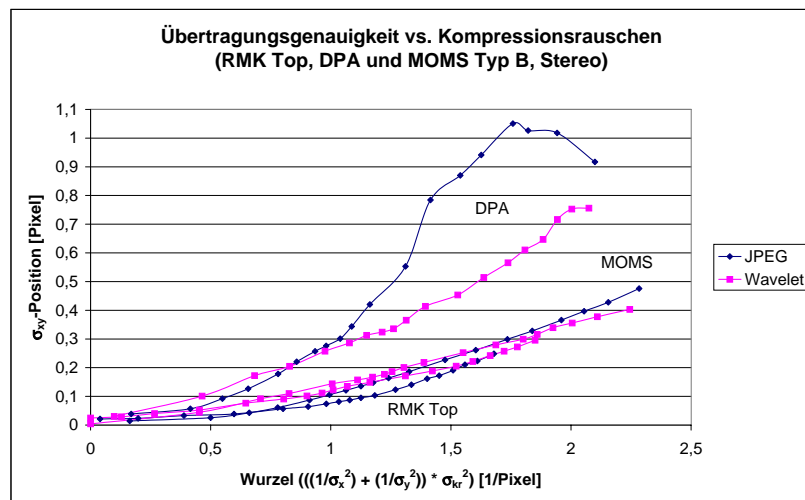


Abbildung 7.10: Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (Typ B, mit Selbstkontrolle, echtes Stereopaar)

7.8 Fazit

Durch die insgesamt recht umfangreichen Tests mit sehr vielen Stichproben (Punktpaaren) und auch durch die Verwendung von vielfältigen Bilddaten (MOMS, DPA und RMK Top) können zumindest folgende Schlüsse gezogen werden: Zum einen hat sich das Verfahren der JPEG-Kompression eindeutig gegenüber seinen Mitkonkurrenten, dem Wavelet- und dem fraktalen Kompressionsverfahren, durchgesetzt, da es für alle betrachteten Bilddaten und Kompressionsverhältnisse (im relevanten Bereich) die besten Ergebnisse liefert. Das JPEG-Verfahren bietet noch einen weiteren Vorteil gegenüber den beiden anderen Verfahren. Das Verfahren ist schon seit längerem standardisiert. Daher existieren vielerlei Anwendungen und auch Libraries, die für Benutzer und Programmierer leicht verfügbar sind. Ebenso kann durch die Vielzahl an bereits vorhandenem Material auch direkt auf komprimierte Daten von Programmen aus zugegriffen werden. Für die beiden anderen Verfahren gilt dies nicht in dieser Art und Weise. Beide, sowohl das Wavelet- als auch das fraktale Verfahren,

unterliegen keinem Standard; d.h. der Benutzer eines dieser Verfahren ist immer äußerst abhängig von der ihm vorliegenden Implementation. Will er sich dieser entziehen, ist er derzeit noch gezwungen, das benutzte Verfahren selbst zu implementieren, um geeignete Zugriffsmöglichkeiten auf die Daten zu erhalten.

Zum anderen hat die Untersuchung jedoch auch gezeigt, dass unter Verwendung eines Kompressionsverhältnisses von ca. 1:6 bei Verwendung des JPEG-Verfahrens die geforderte Genauigkeit von 0,1 Pixel erreicht werden sollte. Bei allen getesteten Bilddaten wurde die Genauigkeit bei dieser Kompression noch bzw. gerade noch erreicht. Somit kann als Empfehlung gelten: Kompression ja, aber nur in begrenztem Maße. Kompressionsverhältnis von 1:10, wie sie in vielen Veröffentlichungen empfohlen werden, mögen für einige wenige Punkte und Bildbeispiele durchaus gelten (siehe MOMS Ergebnisse), jedoch kann nicht generell eine derart hohe Kompressionsrate empfohlen werden.

Kapitel 8

Einfluss der Kompression auf die Höhengenaugigkeit

In Kapitel 7 wurden die Auswirkungen der Kompression auf die Genauigkeit der Punktübertragung in einem Stereobildpaar näher untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmendem Kompressionsverhältnis auch der Fehler bei der Punktübertragung wächst. Dies gilt sowohl für jedes untersuchte Stereobildpaar als auch für die beiden Kompressionsverfahren JPEG und Wavelet.

In der digitalen Photogrammetrie werden die aus der Punktübertragung stammenden homologen Punktpaare bzw. im allgemeineren Fall Punkttupel zur Berechnung von Objektpunkten verwendet. Aus diesen Objektpunkten wird anschließend das DGM abgeleitet.

Da aufgrund der Kompression die Genauigkeit der homologen Punkttupel abnimmt, nimmt auch die zu erwartende Genauigkeit des aus diesen Punkten berechneten DGM über das zunehmende Kompressionsverhältnis ab. In [Friend & Reeves 1995] wurde für das JPEG-Verfahren die Rolle der Kompression für die Genauigkeit des jeweils unter verschiedenen Kompressionsverhältnissen abgeleiteten DGM näher untersucht. Bereits ab einem Kompressionsverhältnis von 1:6 konnte Friend signifikante Veränderungen in der Genauigkeit des DGM nachweisen. Ein weiteres Beispiel einer solchen Untersuchung ist in [Robinson 1994] gegeben.

Je nach Aufnahmegeometrie wirken sich die durch die Datenkompression entstandenen Änderungen unterschiedlich stark auf die Genauigkeit der aus diesen Daten abgeleiteten DGM aus. Im folgenden werden daher kurz die Voraussetzungen der einzelnen Kamerasysteme beschrieben. Zum Abschluss zeigt dann Abbildung 8.1 die bei einem bestimmten Kompressionsverhältnis zu erwartende Änderung der Höhengenaugigkeit der abgeleiteten Objektpunkte.

8.1 Voraussetzungen zur Bestimmung der Änderung des Höhenfehlers

Der in der Höhe zu erwartende Fehler der Höhengenaugigkeit der Objektpunkte berechnet sich nach [Kraus 1982] mit folgender Formel:

$$\sigma_Z = m_b \cdot \frac{h_g}{b} \cdot \sigma_{p_\xi}$$

$$\Leftrightarrow \sigma_Z = \frac{h_g^2}{c \cdot b} \cdot \sigma_{p_\xi}$$

mit

- m_b : Bildmaßstabszahl
- h_g : Flughöhe
- b : Basis
- c : Brennweite
- p_ξ : Pixelgröße
- σ_{p_ξ} : Parallaxenmessgenauigkeit
- $\sigma_{p_{kr}}$: Messgenauigkeit bei Kompression [Pixel]

Wird für die Parallaxenmessgenauigkeit das Produkt aus Parallaxenmessgenauigkeit und der zu erwartenden Änderung der Genauigkeit der zugeordneten Punkte in Abhängigkeit des verwendeten Kompressionsverfahrens und -verhältnisses verwendet, so kann die zu erwartende Änderung der Höhengenaugkeit der abgeleiteten Objektpunkte berechnet werden. Somit gilt für die Änderung der Höhengenaugkeit der folgende Zusammenhang:

$$\sigma_{Z_{\text{Kompression}}} = m_b \cdot \frac{h_g}{b} \cdot p_\xi \cdot \sigma_{p_{kr}}$$

mit

$\sigma_{Z_{\text{Kompression}}}$: zu erwartende Änderung der Messgenauigkeit unter dem Einfluss der Kompression

Um die Genauigkeit des gesamten Systems unter dem Einfluss der Kompression zu berechnen, müssen die theoretische Genauigkeit und die Genauigkeit der Kompression erfasst werden. Dies ergibt dann die gesamte Höhengenaugkeit $\sigma_{Z_{\text{Ges}}}$:

$$\sigma_{Z_{\text{Ges}}} = \sqrt{\sigma_{Z_{\text{Kamera}}}^2 + \sigma_{Z_{\text{Kompression}}}^2} \quad (8.1)$$

Somit kann für jeden der drei verwendeten Kameratypen die Formel zur Berechnung des zu erwartenden Höhenfehlers erstellt werden.

8.1.1 RMK Top

Tabelle 8.1 zeigt die bei der Berechnung verwendeten Parameter der RMK Top-Kamera.

Parameter RMK Top	Wert	Einheit
Brennweite c (Weitwinkel)	153	[mm]
Flughöhe h_g	2000	[m]
Messgenauigkeit p_ξ	15	[μm]
Negativgröße (Bild-)	23 × 23	[cm^2]
Längsüberdeckung	60	[%]

Tabelle 8.1: Kameraparameter RMK Top

Somit können alle benötigten Größen berechnet werden.

$$m_b = \frac{h_g}{c} = \frac{2000[\text{m}]}{153[\text{mm}]} = 13000$$

$$\text{Bildgröße im Gelände} : 23[\text{cm}] \cdot 13000 = 2990[\text{m}]$$

$$\text{Basis} : 0,6 \cdot 2990[\text{m}] = 1794[\text{m}]$$

$$\text{Basisverhältnis} : \frac{h_g}{b} = \frac{2000[\text{m}]}{1800[\text{m}]} = 1,11$$

Theoretische Genauigkeit der Höhe :

$$\begin{aligned} \sigma_{Z_{\text{RMK Top}}} &= m_b \cdot \frac{h_g}{b} \cdot \sigma_{p_\xi} = 13000 \cdot 1,11 \cdot 15\mu\text{m} \\ &= 0,22[\text{m}] \end{aligned}$$

Somit ergibt sich für die Kamera RMK Top folgender Zusammenhang für die Berechnung der Höhengenaugkeit unter dem Einfluss der Kompression:

$$\sigma_{Z_{\text{Kompression, RMK Top}}} = m_b \cdot \frac{h_g}{b} \cdot p_\xi \cdot \sigma_{p_{kr}}$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{Z_{\text{Kompression, RMK Top}}} = 13000 \cdot 1,11 \cdot 15 \mu\text{m} \cdot \sigma_{p_{kr}} \quad (8.2)$$

8.1.2 DPA

Tabelle 8.2 zeigt die bei der Berechnung verwendeten Parameter der DPA-Kamera. mathversionbold

Parameter DPA	Wert	Einheit
Brennweite c	80	[mm]
Flughöhe h_g	2000	[m]
Messgenauigkeit p_ξ	10	[μm]
Winkel zwischen Nadir- und vorwärts- bzw. rückwärtsblickendem Kanal	24,2	[$^\circ$]

Tabelle 8.2: Kameraparameter DPA

Somit können alle benötigten Größen berechnet werden.

$$m_b = \frac{h_g}{c} = \frac{2000[\text{m}]}{80[\text{mm}]} = 25000$$

Basis zwischen vorwärts- und rückwärtsblickendem Kanal:

$$b = \tan(24,2^\circ) \cdot 2 \cdot 2000[\text{m}] = 1797[\text{m}]$$

$$\text{Basisverhältnis} : \frac{h_g}{b} = \frac{2000[\text{m}]}{1800[\text{m}]} = 1,11$$

Theoretische Genauigkeit der Höhe :

$$\begin{aligned} \sigma_{Z_{\text{DPA}}} &= m_b \cdot \frac{h_g}{b} \cdot \sigma_{p_\xi} = 25000 \cdot 1,11 \cdot 10 \mu\text{m} \\ &= 0,28[\text{m}] \end{aligned}$$

Somit ergibt sich für die Kamera DPA folgender Zusammenhang für die Berechnung der Höhengenaugkeit unter dem Einfluss der Kompression:

$$\sigma_{Z_{\text{Kompression, DPA}}} = 25000 \cdot 1,11 \cdot 10 \mu\text{m} \cdot \sigma_{p_{kr}} \quad (8.3)$$

Parameter MOMS02	Wert	Einheit
Brennweite c	237	[mm]
Nominelle Flughöhe h_g	400	[km]
Messgenauigkeit p_ξ	10	[μm]
Winkel zwischen Nadir- und vorwärts- bzw. rückwärtsblickendem Kanal	21,4	[$^\circ$]

Tabelle 8.3: Kameraparameter MOMS02

8.1.3 MOMS-2P

Tabelle 8.3 zeigt die bei der Berechnung verwendeten Parameter der MOMS02-Kamera.

Somit können alle benötigten Größen berechnet werden.

$$m_b = \frac{h_g}{c} = \frac{400[\text{km}]}{237[\text{mm}]} = 1687764$$

Basis zwischen vorwärts- und rückwärtsblickendem Kanal:

$$b = \tan(21,4^\circ) \cdot 2 \cdot 400[\text{km}] = 314[\text{km}]$$

$$\text{Basisverhältnis} : \frac{h_g}{b} = \frac{400[\text{km}]}{314[\text{km}]} = 1,274$$

Theoretische Genauigkeit der Höhe¹ :

$$\begin{aligned} \sigma_{Z_{\text{MOMS-2P}}} &= m_b \cdot \frac{h_g}{b} \cdot \sigma_{p_\xi} = 1687764 \cdot 1,274 \cdot 10\mu\text{m} \\ &= 21,5[\text{m}] \end{aligned}$$

Somit ergibt sich für die Kamera MOMS02 folgender Zusammenhang für die Berechnung der Höhengenaugkeit unter dem Einfluss der Kompression:

$$\sigma_{Z_{\text{Kompression, MOMS-2P}}} = 1687764 \cdot 1,274 \cdot 10\mu\text{m} \cdot \sigma_{p_{kr}} \quad (8.4)$$

¹ Da alle Testdaten aus dem vorwärts- bzw. rückwärtsblickenden Kanal stammen, wird die für diese Kanäle zu erwartende theoretische Genauigkeit verwendet. Bei gleicher Basis und unter Verwendung des Nadir-Kanals wäre die zu erwartende Genauigkeit bei MOMS 7,72 m.

8.2 Änderung der Höhengenaugigkeit

Erstellt man mit Hilfe der Gleichungen 8.2, 8.3 und 8.4 die Diagramme über den untersuchten Kompressionsbereich für jedes Kompressionsverfahren und den jeweiligen Bilddatensatz, so erhält man für jeden verwendeten Kameratyp eine ähnliche Darstellung, wie sie repräsentativ in Abbildung 8.1 für die Kamera RMK Top zu sehen ist. Anhand dieser Abbildung kann abgelesen werden, wie groß die zu erwartende Verschlechterung der Höhengenaugigkeit der aus den homologen Punkten abgeleiteten Objektpunkte ist. Die in Abbildung 8.1 darge-

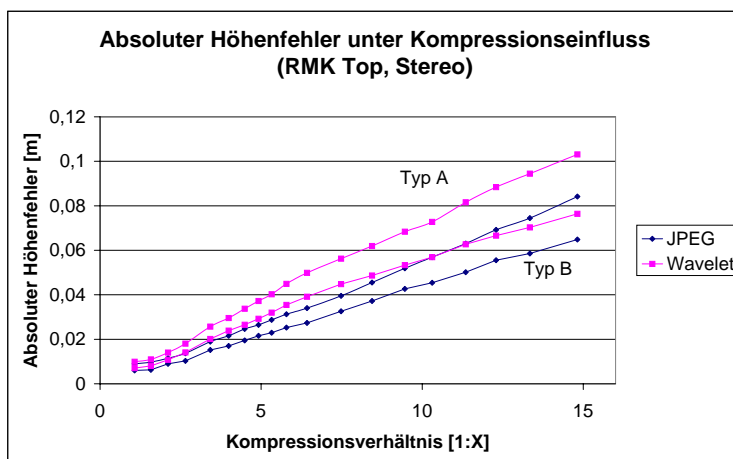


Abbildung 8.1: Zu erwartende Höhenänderung (absolut) bei Daten der RMK Top Kamera

stellten Werte sind, absolut betrachtet, nicht sehr hoch. Vergleicht man die Werte direkt mit der theoretischen und erwarteten Genauigkeit, so stellt man am Beispiel der RMK Top fest, dass bei einer Kompressionsrate von 15 bereits eine Änderung um 50% vorhanden ist. Da die beiden Genauigkeiten bzw. Fehler insgesamt betrachtet werden müssen, ist in Abbildung 8.2 die relative Verschlechterung der theoretischen Genauigkeit unter dem Einfluss der Kompression am Beispiel der RMK Top Daten dargestellt. Die Berechnung der Werte erfolgte mit der in Gleichung 8.1 dargestellten Formel. Diese Abbildung zeigt, dass der durch die Kompression entstandene Fehler einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Höhe hat. Bei genauer Betrachtung erkennt man, dass die Objektpunkte erst bei einer Kompressionsrate von 21,0 eine Verschlechterung in der Höhe um 10% der ursprünglichen Genauigkeit bewirken.

Somit wird an dieser Stelle ein Unterschied zu den bisherigen Erkenntnissen deutlich. Bei allen bislang durchgeführten Untersuchungen und Resultaten zeigte sich, dass bei Kompressionsraten größer 5 mit entsprechenden Fehlern in der Punktübertragung gerechnet werden muss. Unter dem Gesichtspunkt der Höhengenaugigkeit wirken sich diese Fehler jedoch nicht in dem Maße aus wie bei der Punktübertragung selbst. Tabelle 8.4 zeigt für die einzelnen Kameratypen und Übertragungsmethoden die Kompressionsraten, bei denen eine Verschlechterung der Höhengenaugigkeit um 10% entstehen würde.

Kamera	Kompressionsverhältnis [1:X]			
	JPEG		Wavelet	
	Typ A	Typ B	Typ A	Typ B
RMK Top	21,0	34,9	14,2	22,9
DPA	21,4	24,4	18,2	25,2
MOMS	28,0	41,5	28,5	49,1

Tabelle 8.4: Kompressionsverhältnis bei 10% Verschlechterung der Höhengenaugigkeit der Objektpunkte

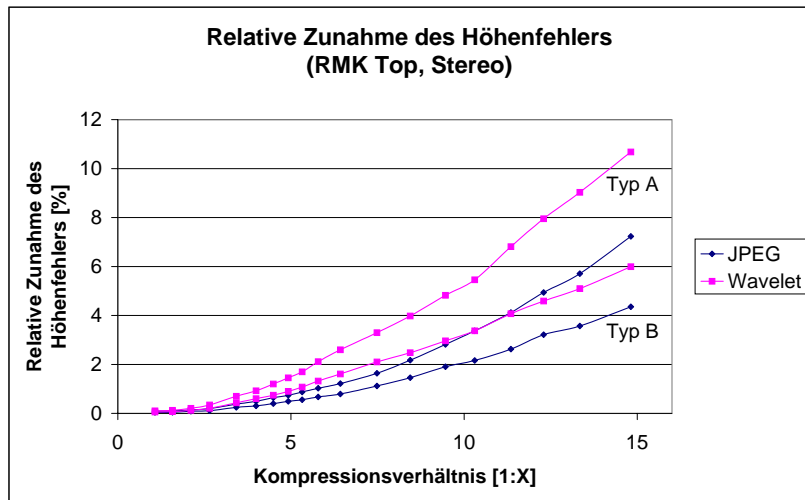


Abbildung 8.2: Zu erwartende relative Höhenänderung bei Daten der RMK Top Kamera gegenüber der theoretischen Genauigkeit

Da es sich bei den bislang dargestellten Sachverhalten nur um die theoretisch erwarteten Werte handelt, erfolgte eine weitergehende Untersuchung der unter den verschiedenen Kompressionsverhältnissen erhaltenen Pixelkoordinaten.

Für das bei der Untersuchung verwendete Datenmaterial stand ein komplett orientiertes Modell zur Verfügung. Auf diesem Modell basierend konnte die Ableitung von Objektkoordinaten mittels eines räumlichen Vorwärtsschnittes aus den jeweiligen Pixelkoordinaten erfolgen. Somit ist ein direkter Vergleich der tatsächlich auftretenden Höhenfehler aufgrund der komprimierten Bilddaten möglich. Abbildung 8.3 zeigt den absolut gemessenen Höhenfehler in Abhängigkeit der Bilddatenkompression.

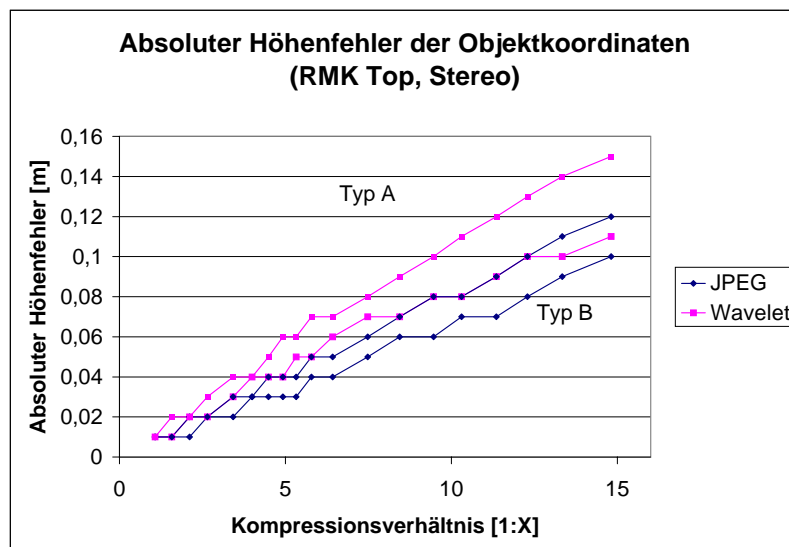


Abbildung 8.3: Absolute Höhenänderung bei Daten der RMK Top Kamera

Das Ergebnis zeigt auch hier den Vorteil der JPEG-Kompression gegenüber dem Wavelet-Verfahren. Ebenso sind die Ergebnisse der Übertragung nach Typ A (ohne Selbstkontrolle) und Typ B (mit Selbstkontrolle) erneut bestätigt.

Dennoch können die in diesem Kapitel berechneten und dargestellten Kompressionsraten nicht verwendet werden, da man nicht außer Acht lassen darf, dass durch den Einfluss der Kompression nicht nur die Genauigkeit der übertragenen Punkte abnimmt, sondern dass auch die Anzahl an erfolgreich zugeordneten Punkten mit zunehmendem Kompressionsfaktor sinkt (siehe Abbildungen 7.2-7.4 und Abbildung 7.7). Besonders wenn aus den übertragenen Punkten ein DGM abgeleitet werden soll, ist eine flächendeckende Verteilung der zugeordneten Punkte wichtig. Unter dem Einfluss der Kompression sinkt jedoch die Erfolgsquote, wodurch es zu größeren Gebieten kommen kann, die keine übertragenen Punkte beinhalten. Für den maximal zulässigen Kompressionsfaktor bedeutet dies, dass neben dem erzeugten maximalen Fehler auch die zu diesem Faktor gehörende Übertragungsquote betrachtet werden muss.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, die Zusammenhänge zwischen den Einflüssen von verlustbehafteten Kompressionsverfahren und den Auswirkungen auf die digitale Punktübertragung darzustellen. Die digitale Punktübertragung nimmt eine wichtige Position bei der automatischen Erfassung von digitalen Geländemodellen ein. Daher sind die Auswirkungen, welche die einzelnen Kompressionsverfahren nach sich ziehen, von zentraler Bedeutung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben mehrere wichtige Erkenntnisse geliefert. Zum einen konnte bereits die Untersuchung auf künstlich generierten Stereobildpaaren zeigen, dass die fraktale Kompression, ungeachtet ihrer Möglichkeit von relativ hohen Kompressionsraten, nicht für die photogrammetrische Datenprozessierung geeignet ist. Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens liegt in der Tatsache, dass bereits bei geringsten Kompressionsraten relativ große Fehler im lokalen Bereich entstehen können, wie die Berechnung der Differenzbilder gezeigt hat. Selbst bei der Forderung nach einer Bildqualität von 100% – also der bestmöglichen Bildqualität – sind bereits maximale Grauwertabweichungen im 100 und größeren Grauwertbereich vorhanden. Bei der Betrachtung solcher Bilder durch das menschliche Auge fallen diese Änderungen nicht ins Gewicht. Im Gegenteil, selbst bei hohen Kompressionsverhältnissen von 1 : 40 oder mehr sind die Differenzen zwischen dem originalen und komprimierten Bild für das menschliche Auge nur schwer auszumachen.

Für die automatische Punktübertragung mittels der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung sind diese Fehler jedoch untragbar. Schon bei der höchsten Qualitätsstufe sind die durch die fraktale Kompression entstandenen Differenzen so groß, dass die auf diesen komprimierten Daten durchgeführte Punktzuordnung hohe Fehler produziert. Dass durch die fraktale Kompression schon bei geringen Kompressionsverhältnissen lokale Fehler vorliegen, liegt in der Art und Weise, wie die fraktale Kompression arbeitet. Innerhalb des Bildes wird nach ähnlichen Strukturen gesucht, die das gerade gesuchte Teilbild durch wenige Transformationen repräsentieren. Gibt es im Ernstfall keine ähnliche Struktur, die durch die Transformation den gesuchten Bildbereich erzeugen kann, so muss auf die beste Näherung zurückgegriffen werden. Somit kann auch bei geforderter, bester Qualität ein Rest an Differenz übrigbleiben, was zwangsläufig zu Bilddifferenzen und somit in der Folge zu fehlerbehafteter Punktzuordnung führt.

Aus diesen genannten Gründen muss die fraktale Kompression, zumindest in der derzeitigen Entwicklungsphase, aus der Gruppe der verwend- bzw. empfehlbaren Kompressionsverfahren entfernt werden. Vielleicht kann durch eine Weiterentwicklung des Verfahrens erreicht werden, dass in Zukunft die bei diesem Kompressionstyp erzeugten Fehler geringer ausfallen. Somit wäre ein neuer Versuch nötig, welcher dann die Punktzuordnung auf fraktal komprimierten Bildern testet. Für die Photogrammetrie ist jedoch die fraktale Kompression derzeit keine mögliche Alternative.

Die Untersuchung der Einflüsse der Kompression auf künstlich generierte Stereobildpaare beweist, dass sich die Verfahren der Wavelet- und JPEG-Kompression in ihren Ergebnissen nur geringfügig unterscheiden. Für die weitere Untersuchung war es daher interessant zu erfahren, ob sich eines der beiden Verfahren bei der Datenprozessierung auf einem echten Stereobildpaar durchsetzen kann.

Die Untersuchungen mit Daten verschiedensten Ursprungs haben gezeigt, dass nur geringfügige Unterschiede in der Genauigkeit bei der Punktübertragung vorhanden sind, wenngleich sich bei jeder Untersuchung überaschenderweise das JPEG-Verfahren vor der Wavelet-Kompression durchgesetzt hat. Dies ist daher um so erstaunlicher, weil in der Betrachtung der Bilder bzgl. ihrer Bildqualität, d.h. der Entropie und des PSNR, sich immer das Wavelet-Verfahren durchsetzte. In der Bildverarbeitung wird ebenfalls in jüngerer Zeit immer das Wavelet-Verfahren dem JPEG-Verfahren vorgezogen, da es auch bei sehr hohen Kompressionsverhältnissen von über 1 : 80 oder mehr noch sehr gute Ergebnisse liefert.

Genau hier setzt jedoch der Unterschied zwischen der allgemeinen Bildverarbeitung und der Bildverarbeitung in der Photogrammetrie ein. Während es für die Bildverarbeitung im allgemeinen meist genügt, hohe Kompressionsraten mit "ansehnlichem" Ergebnis zu erzeugen, fordert die photogrammetrische Bildverarbeitung eine möglichst hohe geometrische Qualität auch auf den komprimierten Daten, und dies über das gesamte Bild hinweg. In vielen Bildverarbeitungsanwendungen, die mit Kompression arbeiten, werden komprimierte Bilder nur oberflächlich bzgl. der durch die Kompression entstandenen Fehler untersucht. Oftmals wird etwa durch die Betrachtung einzelner exponierter Grauwerte ein komprimiertes Bild beurteilt. Stimmen die komprimierten Farb-/Grauwerte dieser exponierten Bildpunkte mit denen des originalen Bildes überein, so gilt die durchgeführte Kompression als erfolgreich.

Durch die meisten Kompressionsverfahren werden solche Pixel meist nicht verändert. Vielmehr werden die eine solche Region umgebenden Pixel verändert, die weniger Bildinformation in sich tragen, und somit dem menschlichen Betrachter nicht unbedingt sofort auffallen. Das Verfahren der Punktzuordnung reagiert jedoch empfindlich, auch auf solche geringfügigen Änderungen neben einer auffälligen Region. Um also eine Aussage über die Bildqualität treffen zu können, mussten die komprimierten Bilder mittels der vorgestellten Verfahren beurteilt werden.

Ob der Anwender sich nun für die JPEG- oder Wavelet-Kompression entscheidet, ist nicht von wesentlicher Bedeutung, da durch die Verwendung des JPEG-Verfahrens der Kompressionsfaktor abhängig vom zugrundeliegenden Bildmaterial maximal um einen bis drei Punkte steigt. Die dadurch gewonnene Platzersparnis kann z.B. schon dadurch wieder zunichte gemacht werden, dass bei Verwendung der Wavelet-Kompression implizit die zur Punktübertragung benötigte Bildpyramide enthalten ist, während bei einem JPEG komprimierten Bild die Pyramide extern zusätzlich gespeichert werden muss. Unter diesem Gesichtspunkt muss vielleicht sogar das Wavelet-Verfahren dem JPEG-Verfahren vorgezogen werden, da beim JPEG-Verfahren der zur Speicherung der Pyramiden benötigte Speicherplatz ca. 1/3 der Originalbildgröße beträgt.

Dabei darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass zunächst eine Implementation nötig wird, die es dem Benutzer ermöglicht, auf die in der Waveletstruktur vorhandene Bildpyramide zuzugreifen. Dies bedeutet zunächst einen deutlichen Mehraufwand bei der Bereitstellung des Datenhandlings z.B. auf einer photogrammetrischen Arbeitsstation.

Eine weitere Erkenntnis der Untersuchungen ergibt sich aus der Tatsache, dass kein Modell gefunden werden konnte, welches durch wenig zeitintensive Untersuchungen einen genauen Kompressionsfaktor liefert, bei dessen Anwendung noch ein gefordertes Mindestmaß an Genauigkeit vorhanden ist. Dies liegt an der Arbeitsweise der Verfahren. Je nach den Anteilen an hochfrequentem bzw. niederfrequentem Rauschen im originalen, unkomprimierten Bild können relativ hohe bzw. niedrige Kompressionsraten verwendet werden. Dies zeigt sich z.B. bei dem Vergleich der MOMS-2P- und DPA-Daten. Bei den MOMS-2P-Daten sind die Grauwerte nur in einer Tiefe von ca. 6 Bit vorhanden, wodurch sich das Bild sehr gut, ohne große Verluste in Kauf nehmen zu müssen, komprimieren lässt. Im Gegensatz hierzu sind die DPA-Daten, welche den vollen Grauwertbereich von 8 Bit abdecken bzgl. der Kompression recht empfindlich.

Es stellt sich also die Frage nach einem geeigneteren Kompressionsverfahren, welches die Belange der Photogrammetrie besser abdeckt. Während der durchgeführten Untersuchungen hat sich gezeigt, dass das Verfahren der Kleinsten-Quadrate-Zuordnung sehr zuverlässig auf dem untersuchten Bildmaterial arbeitet. Einschränkung ist hierbei zu erwähnen, dass das verwendete Bildmaterial über eine gute Qualität verfügte, also es sich nicht um extrem verrauschte Bilder handelte. Auf Bildern mit schlechter Qualität würde die KQZ keine hohe Erfolgsquote besitzen und wäre daher für den nachfolgenden Vorschlag unbrauchbar. Da durch die Entwicklung von neuen Kamerasystemen und immer besseren Scannern jedoch die Bildqualität ständig zunimmt, ist der nachfolgende Vorschlag sicherlich anwendbar. Abbildung 9.1 zeigt den Algorithmus des nachfolgend beschriebenen Kompressionsverfahrens.

Um die Nachteile herkömmlicher Bildkompressionsverfahren zu umgehen, könnte man ein Kompressionsverfahren entwickeln, welches auf den Ergebnissen der Punktübertragung aufbaut. Bei der Punktübertragung mittels der KQZ werden Parameter geschätzt, die eine Berechnung des einen Partners des Stereopaars aus dem anderen ermöglichen. Mehr noch, durch diese Parameter kann jeder beliebige Grauwert innerhalb des Übertragungsfensters berechnet werden. Somit ist durch die Übertragung sowohl die Position als auch der zugehörige Grauwert mit der Genauigkeit des Verfahrens bestimmt.

Führt man also die Punktübertragung mit aneinandergrenzenden Fenstern durch, so wird durch wenige Fensterausschnitte das gesamte Bild des Stereopartners durch die aus jeder einzelnen Punktübertragung erhaltenen Parameter beschrieben. Somit sind jedoch auch die gesamte Geometrie und die Grauwerte des Stereopartners bestimmt, wobei die Genauigkeit der der Punktübertragung entspricht. Somit sind also im Mittel

/* Kombinierte Kompression und Bildzuordnung */

/* Schritt 1: Berechne regelmäßiges Raster zwischen beiden Bildern */

```

for( $i_{Raster} = 0$ ;  $i_{Raster} < i_{Raster_{max}}$ ;  $i_{Raster} + = Rasterweite_i$ )
{
  for( $j_{Raster} = 0$ ;  $j_{Raster} < j_{Raster_{max}}$ ;  $j_{Raster} + = Rasterweite_j$ )
  {
    Übertrage Punkt an der Stelle( $i_{Raster}, j_{Raster}$ );
    if (erfolgreiche Übertragung)
    {
      speichere Punktpaar [( $i_{Raster}, j_{Raster}$ ), ( $i_{Slave}, j_{Slave}$ )];
      speichere im Differenzbild an der Stelle ( $i_{Raster}, j_{Raster}$ ) das aktuelle
        Differenzpatch (Differenz zwischen Originalpatch und aus
        geschätzten Parametern berechnetem Patch);
      speichere geschätzte Parameter der KQZ;
    }
    else
    {
      nehme Stelle( $i_{Raster}, j_{Raster}$ ) in Fehlerliste auf;
    }
  }
}

```

/* Schritt 2: SchlieÙe Lücken des Rasters mit aus der 3x3 Nachbarschaft berechneten Näherungswerten*/

```

while(Fehlerliste! = leer)
{
  ermittle Position mit den meisten bereits erfolgreich bestimmten Punkten
    in der 3x3 Nachbarschaft;
  berechne aus allen erfolgreichen Nachbarn die gemittelten Werte für alle
    Unbekannten an der ermittelten Position;
  entferne aktuellen Eintrag aus der Fehlerliste und kennzeichne ihn als berechnet;
  berechne Differenzpatch und speichere es im Differenzbild an entsprechender Position;
  berechne geschätzte Punktposition aus gemittelten Parametern und speichere diese;
}

```

/* Schritt 3: Speichere alle Daten und verwende Kompressionsalgorithmen */

```

komprimiere alle gespeicherten Daten (z.B. Differenzbild durch Quantisierung und
  Huffman – Kodierung, geschätzte Parameter durch geeignete Rundung und
  Regioneneinteilung mit festgelegtem Schwellwert);

```

Abbildung 9.1: Algorithmus des vorgeschlagenen Kompressionsverfahrens

die Positionen auf 0,1 Pixel genau bestimmt. Für die Grauwerte könnte eine Verbesserung dadurch erreicht werden, dass ein Differenzbild zwischen Originalbild und dem aus den Ergebnissen der Punktübertragung berechneten Bild bestimmt wird. Dieses Differenzbild müsste zunächst quantisiert werden, um geringfügige Differenzen zu eliminieren, wodurch eine Kompressionsmöglichkeit für dieses Bild zustande kommt.

Bei der Übertragung können jedoch nicht alle Punkte und somit Bildbereiche erfasst werden. Dadurch entstehen Lücken in dem mit diesem Verfahren darzustellenden Bild. Durch Berechnung der Parameter aus den umliegenden erfolgreich durchgeführten Punktübertragungen könnten jedoch die Parameter für solche zunächst nicht erfassten Regionen näherungsweise bestimmt werden. Somit wäre schließlich das gesamte Bild mit Parametern beschrieben.

Um eine Kompression zu erreichen, müssten nun die gesamten Parameter des Bildes einzeln betrachtet werden. Man könnte Toleranzen definieren und Parameter ähnlicher Größe bestimmen und tabellarisch alle unterschiedlichen Parameter speichern. Zusätzlich müsste ein Feld gespeichert werden, welches die Position eines

jeweiligen Tabelleneintrages speichert. Da zu erwarten ist, dass die Parameter über das gesamte Bild hinweg mehrmals gleiche oder ähnliche Werte annehmen, ist es möglich, dass auch hier eine Kompression der Daten erreicht werden kann.

Sind sowohl alle Parameter der Transformation erfasst sowie auch das Differenzbild berechnet, reduziert die anschließend durchgeführte Quantisierung den Datensatz. Dieser dürfte weniger Platz benötigen als das zuvor gespeicherte Bild, wodurch eine Kompression der Daten erreicht wird.

Dieses Verfahren besitzt gegenüber herkömmlichen Kompressionsverfahren einen wesentlichen Vorteil. Zunächst kann, wie bei jedem verlustbehafteten Kompressionsverfahren das Originalbild mit gewissen in Kauf zu nehmenden Verlusten wiederhergestellt werden. Dazu muss lediglich die inverse Transformation zu jedem Datensatz bestimmt und die Transformation auf jedem Bildelement durchgeführt werden. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens beruht jedoch darin, dass eine Beziehung zwischen den Stereopartnern in den komprimierten Daten gespeichert ist, so dass für jede beliebige Position in einem Bild die Position sowie der zugehörige Grauwert im anderen Bild bestimmt werden kann, ohne dass man das gesamte Bild dekomprimieren müsste und daran anschließend eine Punktzuordnung durchführen müsste. Diese Arbeit wird bereits zum Zeitpunkt der Bildkompression auf den noch originalen und somit höchstpräzisen Daten durchgeführt. Somit nimmt der durch die Kompression erzeugte Informationsverlust keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Punktübertragung.

Versuche haben gezeigt, dass Punkttupel, die aus den Ergebnissen einer zuvor durchgeführten Punktübertragung im Nachbarbereich berechnet wurden, durch eine erneut durchgeführte Übertragung im allgemeinen nicht mehr signifikant in der Position verändert werden. Um jedoch genaue Erkenntnisse diesbezüglich zu erlangen, müsste dahingehend eine genaue Untersuchung durchgeführt werden. Diese würden zeigen, wie genau ein Punkthaufen homologer Punkte ist, der nicht durch die vielfache und hochkorrelierte Anwendung der KQZ berechnet wird, sondern aus den Parametern weniger zuvor durchgeführten Berechnungen dieser Methode abgeleitet wurde.

Mit Hilfe dieser Methode könnte eine Alternative zu herkömmlichen Kompressionsverfahren gefunden werden. Der bei der Komprimierung relativ hohe Zeitaufwand kann dadurch kompensiert werden, dass zu jedem späteren Zeitpunkt die benötigten homologen Punkte leicht aus den Parametern mit wenigen Rechenschritten berechnet werden können. Außerdem hat die Vergangenheit gezeigt, dass die stetige Weiterentwicklung der Prozesstechnologie die Leistung der Rechenanlagen so sehr steigert, dass innerhalb eines überschaubaren Zeitraums solche Berechnungen sehr schnell durchgeführt werden können, wodurch der Zeitfaktor nicht mehr von Belang ist.

Literaturverzeichnis

- Baltsavias, E. [1991], *Multiphoto Geometrically Constrained Matching, Dissertation*, ETH Zürich, Zürich, Schweiz.
- Baltsavias, E. & Stallman, D. [1992a], Advancement in Matching of Spot Images by Integration and Treatment of Radiometric Differences, Vol. 29 Part B4 of *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Washington D.C., USA, pp. 916–924.
- Baltsavias, E. & Stallman, D. [1992b], Metric Information Extraction from Spot Images and the Role of Polynomial Mapping Functions, Vol. 29 Part B4 of *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Washington D.C., USA, pp. 358–364.
- Barnsley, M. [1988], *FRACTALS EVERYWHERE*, Academic Press Inc., London, United Kingdom.
- Barnsley, M. & Hurd, L. [1993a], *Bildkompression mit Fraktalen*, Vieweg, ISBN: 3-528-05464-6, Braunschweig, Deutschland.
- Barnsley, M. & Hurd, L. [1993b], *FRactal Image Compression*, AK Peters Ltd., ISBN: 1-56881-000-8, Wellesley, Massachusetts.
- Beyer, H. A. [1992], *Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System*, Vol. 51, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH-Hönggerberg, Zürich.
- Calderón, A. [1964], *Intermediate spaces and interpolation, the complex method*, Vol. 24, Studia Math.
- Ebner, H., Fritsch, D., Gillissen, W. & Heipke, C. [1987], 'Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie', *Zeitschrift für Bildmessung und Luftbildwesen*, 55 pp. S. 194–203.
- Erlebacher, G., Hussaini, M. & Jameson, L. [1996], *Wavelets, Theory and Applications*, Oxford University Press, Oxford. Formal notes of the short course on wavelets conducted by the Institute for Computer Applications in Science and Engineering (ICASE) and NASA Langley Research Center (LaRC) during February 22-26, 1993.
- Förstner, W. [1985], Prinzip und Leistungsfähigkeit der Korrelation und Zuordnung digitaler Bilder, in 'Proceedings of the 40th Photogrammetric Week', Vol. 11, Stuttgart University, pp. 69–90.
- Förstner, W. [1993], Image matching, in R. Haralick & L. Shapiro, eds, 'Computer and Robot Vision', Vol. 2, Addison-Wesley Publishing Company.
- Friend, M. & Reeves, R. [1995], Mapping Accuracy of Compressed Digital Aerial Images, Space Centre for Satellite Navigation, Queensland University of Technology, Brisbane, Queensland.
- Fritsch, D. [1996], 'MOMS02 - Progress in optical remote sensing', *South African Journal of Geo-Information*, 17 (part 2), pp. 35–50.
- Fritsch, D., Kiefner, M. & Schneider, F. [1997], MOMS-02/D2 DTM Generation Using Intensity Based Least Squares Matching Techniques, in 'Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III', Vol. 3072 of *Proceedings of SPIE*, SPIE, Orlando, pp. 132–142.
- Fritsch, D., Kiefner, M. & Stallmann, D. [1998], Comprehensive Ground Truth Evaluation of MOMS-2P DTM Reconstruction, in 'Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixels', Vol. 32, Part 3/1 of *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Columbus, Ohio, pp. 325–330.
- Fritsch, D., Kiefner, M., Stallmann, D. & Hahn, M. [1998], Improvement of the Automatic MOMS02-P DTM Reconstruction, in 'GIS - Between Visions and Applications', Vol. 32 of *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Stuttgart, pp. 170–175.
- Goupillaud, P., Grossmann, A. & Morlet, J. [1984/85], *Cycle-Octave and Related Transforms in Seismic Signal Analysis*, Geoexploration 23, Elsevier Science Publ.
- Grün, A. [1996], Least squares matching: a fundamental measurement algorithm, in K. Atkinson, ed., 'Close Range Photogrammetry and Machine Vision', Whittles Publishing, London.
- Gülch, E. [1994], *Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung*, Deutsche Geodätische Kommission, C 418, München.
- Haberäcker, P. [1985], *Digitale Bildverarbeitung: Grundlagen und Anwendungen*, C. Hanser-Verlag, München.
- Hahn, M. & Kiefner, M. [1998], Image compression and matching accuracy, in 'Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixels', Vol. 32 Part 3/1 of *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Columbus, Ohio, pp. 444–451.

- Hahn, M., Kiefner, M., Braun, J. & Dörstel, C. [1998], Bildzuordnung in PHODIS, Vol. 1 of *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 2–14.
- Hahn, M., Kiefner, M., Quednau, A. & Hinz, E. [1996], Semi-automatic measurement of signalized ground control points at digital photogrammetric workstations., in 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 31(B3), Wien, Österreich, pp. 291–296.
- Heipke, C. [1995], *Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen*, Deutsche Geodätische Kommission, C 450, München.
- Held, G. [1996], *DATA AND IMAGE COMPRESSION, Tools and Techniques*, Wiley, West Sussex, England.
- Jaakkola, J. & Orava, E. [1994], The effect of pixel size and compression on metric quality of digital aerial images., Vol. 30(3/1), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 409–415.
- JIANG, T. [1997], Digitale Bildzuordnung mittels Wavelet-Transformation, Schriftenreihe des Studiengangs Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 59.
- Koch, K. [1997], *Parameterschätzung und Hypothesentests*, Dümmler Verlag, Bonn.
- Köhn, C. [1996], *Bildanalyse und Bilddatenkompression*, Vol. 1, Carl Hanser Verlag, München.
- Kou, W. [1995], *DIGITAL IMAGE COMPRESSION, Algorithms and Standards*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts.
- Kraus, K. [1982], *Photogrammetrie I*, Dümmler Verlag, Bonn.
- Kreyszig, E. [1988], *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen.
- Küsters, H. [1995], *Bilddatenkomprimierung mit JPEG und MPEG; Stand- und Bewegtbildkomprimierung, Hard- und Softwaretips, Algorithmen. Auf CD-ROM: MPEG-Player, Videosequenzen, Testbilder*, Franzis-Verlag GmbH, Poing, (München).
- Lammi, J. & Sarjakoski, T. [1992], Comparison of Digital Color Images by the JPEG, in 'ISPRS Commission IV', Vol. 29, Part B2, Washington D.C., USA, pp. 456–460.
- Louis, A., Maaß, P. & Rieder, A. [1994], *Wavelets*, Vol. 1, Teubner Verlag, Stuttgart.
- Maeder, A. [1995], Lossless jpeg compression of remote sensing imagery, in 'Proceedings SPIE', Vol. 2606.
- Netravali, A. & Haskell, B. [1994], *Digital Pictures, Representation, Compression and Standards*, Plenum Publishing Corporation, New York.
- Novak, K. & Shahin, F. [1996], A comparison of two image compression techniques for softcopy photogrammetry., in 'Photogrammetric Engineering and Remote Sensing', pp. 695–701.
- Ohm, J.-R. [1995], *Digitale Bildcodierung; Repräsentation, Kompression und Übertragung von Bildsignalen*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Pennebaker, W. & Mitchell, J. [1993], *JPEG, STILL IMAGE DATA COMPRESSION STANDARD*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Petrie, G. [1998], 'Space Imagery for Topographic Mapping', *Geo-Informatics*, 1 pp. 24–33.
- Petrie, G. [2000], 'Warming up for ISPRS Amsterdam', *Geo-Informatics*, 3 pp. 36–43.
- Piechel, J. [1991], *Qualitätssteigerung der automatischen Höhenmessung in Stereobildern durch flächenbasierte Kernlinienkorrelation*, Vol. C 376, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W. & Flannery, B. [1992], *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Vol. Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rabbani, M. & Jones, P. [1991], *Digital Image Compression Techniques*, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington.
- Rauhut, A. & Riegel, T. [1997], 'Fraktale Bild- und Videokodierung', *Interner Bericht Siemens AG*.
- Reeves, R. & Hahn, M. [1997], Modelling the influence of jpeg compression on dtm accuracy, in '3D-Reconstruction and Modelling of Topographic Objects', Vol. 32 Part 3-4W2, ISPRS Commission III/IV, pp. 161–168.
- Robinson, C. [1994], The Effect of JPEG Image Compression on Digital Terrain Models Derived Using a Feature-Based Matching Algorithm, in 'Master of Science Thesis', Perth, WA.
- Sachs, L. [1999], *Angewandte Statistik; Anwendung statistischer Methoden*, Springer Verlag, Heidelberg.
- Salomon, D. [1998], *Data Compression, The Complete Reference*, Springer-Verlag, New York.
- Saupe, D., Hamzaoui, R. & Hartenstein, H. [1996], Fractal image compression, an introductory overview, Institut für Informatik, Universität Freiburg.
- Saupe, D. & Hartenstein, H. [1996], Fractal models for image synthesis, encoding and analysis, in 'SIGGRAPH 96 Course Notes XX', New Orleans.
- Schiewe, J. [1997], *Geo-Modellierung mit Daten des Weltraumsensors MOMS-02*, Vol. 222, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover.

- Schiewe, J. [1998], Effect of lossy data compression techniques on geometry and information content of satellite imagery, in 'GIS-Between Vision and Applications', Vol. 32/4, Stuttgart, Deutschland, pp. 540–544.
- Simon, U. & Berndtgen, M. [1996], 'Handlich bunt: Kompressionstechniken für Bild- und Videodateien im Vergleich', *c't* 11
- Starck, J., Murtagh, F. & Bijaoui, A. [1998], *Image Processing and Data Analysis: the multiscale approach*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Topiwala, P. [1998], *Wavelet Image and Video Compression*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- YanJun, P. & Schaffrin, B. [1999], 'Bayesian Wavelet Analysis for Image De-Noising – The First Steps', *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 2 pp. 95–100.
- Zeng, B.-Q. & Ze-Xun, G. [1996], A reliable Method for Assesing the Image Measurement Quality under the Influence of Image Compression, Vol. 31, Part B1 of *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS, Vienna, pp. 160–162.

Anhang A

Allgemeine Verfahren zur Beurteilung der Bildqualität

Um die Wirkungsweise der einzelnen Kompressionsverfahren und deren Kompressionsfaktoren besser beurteilen zu können, wurden zur Erfassung dieser Einflüsse neben allgemeinen statistischen Methoden auch das Peak Signal to Noise Ratio und die Entropie berechnet. Der Vollständigkeit halber sind diese beiden Maße hier kurz erklärt.

A.1 Das Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

Das PSNR spiegelt das Verhältnis zwischen optimalem Signal und gestörtem Signal wieder. Dabei muss zunächst das optimale Signal gefunden bzw. definiert werden. Für die Untersuchung wurde das unkomprimierte Bild als das ideale Signal definiert. Das unkomprimierte Bild ist zwar nicht das ideale Signal der aufgenommenen Szene, jedoch ist es das Ausgangssignal und somit ideale Signal, welches in die Komprimierung eingeht. Das unkomprimierte Bild ist somit das Referenzsignal für alle Komprimierungsverfahren und -stufen.

Dies bedeutet gleichzeitig, dass die Untersuchungen jeweils nur für den gerade betrachteten Bilddatensatz gelten, da das jeweils unkomprimierte Bild ein anderes ideales Signal darstellt. Die Definition des PSNR lautet nach [Netravali & Haskell 1994]:

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (A.1)$$

mit

$$MSE = \frac{1}{N * M} * \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (g_{ij_{orig}} - g_{ij_{komp}})^2$$

wobei

$g_{ij_{orig}}$: die Grauwerte des originalen, unkomprimierten Bildes

und

$g_{ij_{komp}}$: die Grauwerte des komprimierten Bildes sind (A.2)

A.2 Die Entropie

Die Entropie ist ein Maß für den mittleren Informationsgehalt eines Signals oder hier Bildes. Die Definition und Beschreibung kann in [Haberäcker 1985] genau nachgelesen werden. Die Entropie wird nach folgender Formel gebildet:

$$H = - \sum_{i=0}^N p(i) \log_2(p(i)) \quad (\text{A.3})$$

wobei die Aufsummierung über die Anzahl der möglichen Signalwerte erfolgt. Für die hier verwendeten Grauwertbilder bedeutet dies die Aufsummierung über die möglichen Grauwerte bzw. deren Wahrscheinlichkeiten, welche durch die Berechnung des Histogramms des Bildes ermittelt werden können. Für ein Grauwertbild mit 8-Bit Grauwerttiefe ergibt sich die Formel zu:

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p(G_i) \log_2(p(G_i)) \quad (\text{A.4})$$

Der durch die Entropie berechnete Wert repräsentiert die zumindest benötigte Anzahl an Bits, die für die verlustfreie Speicherung des untersuchten Bildes zur Verfügung stehen müssen. Werden zur Speicherung weniger Bits als durch die Entropie berechnet verwendet und wird auf ein geeignetes Kompressionsverfahren verzichtet, dann ist die Speicherung mit Informationsverlust verbunden.

Anhang B

Statistische Größen

Zur genauen Unterscheidung ist hier die Definition des RMSE und der Standardabweichung gegeben.

B.1 Der Root-Mean-Square-Error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n x_i}{n}}$$

mit

- x_i : Beobachtungen der Stichprobe
- n : Anzahl Beobachtungen der Stichprobe

B.2 Die Standardabweichung (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

mit

- x_i : Beobachtungen der Stichprobe
- n : Anzahl Beobachtungen der Stichprobe
- \bar{x} : Mittelwert der Stichprobe

Anhang C

Bildaufzeichnungssysteme

Die folgenden Abschnitte zeigen eine Übersicht über derzeit vorhandene Kamerasysteme. Dabei sind sowohl Beispiele für weltraumgestützte wie luftbildbasierte Systeme gegeben. Desweiteren sind auch die Kenndaten des photogrammetrischen Scanners aufbereitet, welcher zum digitalisieren der analogen bilddaten verwendet wurde.

C.1 Satellitengestützte, filmbasierte und digitale Kameras

Die nachfolgenden beiden Tabellen geben eine kurze Übersicht über derzeit im Weltraum befindliche Kamera- und Sensorsysteme. In Tabelle C.1 ist eine kurze Zusammenfassung im Raum befindlicher Kameras. Tabelle C.2¹ zeigt eine Aufstellung digitaler Flächen- und Zeilensensoren. Diese ist gegliedert in seit längerer Zeit bereits vorhandener Sensoren und seit kurzem im Weltraum befindlichen bzw. geplanten Sensoren / Kameras.

Film-Kamera Typ	Format [cm]	Brennweite [m]	Öffnungswinkel	Flughöhe [km]	Bodenüberdeckung [km]	Maßstab	Bodenauflösung [m]	Orbital Inclination	B:H Verhältnis
KVR-1000	18x18	1,00	8,5x8,5	220	40x40	1:220000	2	67	-
KFA-3000	30x30	3,00	6x6	270	27x27	1: 90000	2-3	83	0,04
KFA-1000	30x30	1,00	17x17	270	80x80	1:270000	5-10	83	0,12
TK-350	30x45	0,35	46x65	220	190x280	1:630000	7-10	67	0,52
MK-4	18x18	0,30	33x33	280	160x160	1:930000	10	83	0,24

Tabelle C.1: Zusammenstellung im Weltraum befindlicher Kamerasysteme

¹ Beide Tabellen wurde der Internetseite <http://geoinformationafrica.com/ma/current/1199rem.asp> entnommen. Diese Seite gibt eine kurze Übersicht über weltraumgestützte Kamera- und Sensorsysteme.

Aufzeichnungssystem	Sensor-Array-Typ	Orbit-höhe [km]	Bahn-breite [km]	Boden-abdeckung [km]	Boden-pixel [m]	Ausrichtung		Orbital Inclination	B:H Verhältnis
						Along Track	Cross Track		
Seit längerem vorhandene Sensoren / Systeme									
SPOT	Zeile	822	60	60x60	10	No	±27	98,7	Bis zu 1,0
IRS-1C/D	Zeile	817	70	70x70	6	No	±26	98,7	Bis zu 1,0
MOMS-02	Zeile	296	78	78x78	13,5	±21,4	No	28,5	0,8
MOMS-2P	Zeile	380/405	97/105	100x100	18	±21,4	No	51,6	0,8
JERS-OPS	Zeile	570	75	75x75	18x24	0/15,3	No	98	0,3
Neue und geplante Sensoren / Systeme									
EarlyBird	Fläche	475	6	6x6	3	±30	±30	97,3	variabel
QuickBird	Zeile	600	22	22x22	1	±30	±30	66	variabel
IKONOS 1	Zeile	680	11	11x11	1	±45	±45	98,1	variabel
OrbView3	Zeile	460	8	8x8	1	±45	±45	97,3	variabel
EROS-A	Zeile	480	12,5	12,5x12,5	2	No	?	53	-
EROS-B	Zeile	600	16	16x16	1	Yes	±45	98	variabel

Tabelle C.2: Zusammenstellung im Weltraum befindlicher Sensorsysteme

C.2 Luftbildkamera

Bei beiden in Tabelle C.3 aufgeführten analogen Kameras handelt es sich um Produkte der Firma Z/I Imaging. Mit der RMK Top wurden die Bilder der Untersuchung aufgezeichnet. Bei der DPA (digitale Photogrammetrie Ausstattung) handelt es sich um eine digitale Kamera der DASA².

Aufzeichnungssystem	Sensor-Array-Typ	Pixel pro Zeile	Pixelgröße	Konvergenzwinkel	Brennweite	Spektralbereich	Aufnahmewinkel ³
DPA	Zeile	12000	10 μ m	±25°	80 [mm]	515-780 [nm]	37°

Aufzeichnungssystem	Sensor-Filmgröße [cm]	Blende	Belichtungszeit [sec]	Brennweite [mm]	Aufnahmewinkel ³
RMK Top 15	21x21	f/4-f/22	$\frac{1}{50} - \frac{1}{500}$	153	93°
RMK Top 30	21x21	f/5,6-f/22	$\frac{1}{50} - \frac{1}{500}$	305	56°
RC 30	24x24	f/4-f/22	$\frac{1}{100} - \frac{1}{1000}$	153	90°
RC 30	24x24	f/4-f/22	$\frac{1}{100} - \frac{1}{1000}$	303	55°
LMK 2000	22,8x22,8	f/4-f/16	$\frac{1}{60} - \frac{1}{1000}$	152	90°
LMK 2000	22,8x22,8	f/5,6-f/16	$\frac{1}{60} - \frac{1}{1000}$	305	53°

Tabelle C.3: Zusammenstellung aktuell bekannter Luftbildkameras

² Daimler-Benz-Aerospace

³ IFOV: Instantaneous Field Of View

C.3 Photogrammetrischer Scanner

Zum digitalisieren der analogen Bilddaten wurde der Scanner PS1 von Z/I Imaging (ehemals Carl Zeiss, Fachbereich Photogrammetrie) verwendet. Bei diesem Scanner handelt es sich um ein geometrisch hochgenaues Gerät. Er bietet die Möglichkeit zum Scannen der analogen Daten mit einer geometrischen Auflösung von bis zu $7 \mu\text{m}$ Pixelgröße. Die analogen Bilddaten wurden dabei mit einer radiometrischen Auflösung von 8 Bit gescannt. Eine radiometrische Korrektur konnte ebenfalls mit Hilfe der Scannersoftware angebracht werden, sodass ein optimales Scanergebnis zu Stande kam.

Hersteller	Sensortyp	Beleuchtungssystem	Minimale Pixelgröße [μm]	Maximale radiometrische Auflösung Bit/Pixel	Einstellung der Pixelgröße
PhotoScan PS1 (Zeiss)	CCD-Zeile	gerichtet	7,5	11 (color)	Software
SCAI (Z/I-Imaging)		diffus	7	10	Software
Wehrli RM1		gerichtet	12		Zoom-Linse
DSW 100 (Helava)	Matrix-CCD	diffus	13	12	2 Kameras
Vexel VX 3000		diffus	10		Zoom-Linse

Tabelle C.4: Zusammenstellung aktuell bekannter Flachbett-Scanner für photogrammetrische Anwendungen

Anhang D

Das World Wide Web

Da in jüngster Vergangenheit das World Wide Web eine immer größere Bedeutung erlangt und auch in diese Arbeit einige Informationen aus dem Internet bezogen wurden, sind im nachfolgenden Abschnitt die wichtigsten der verwendeten Adressen angegeben. Natürlich ändert sich im Laufe der Zeit das Angebot der Seiten im Internet, so daß einige der Links nicht mehr den heutigen Inhalt besitzen. Einige Seiten dürften sogar ganz vom Netz genommen worden sein. Nichts desto trotz können die angegebenen Seiten als Hinweise für die Suche nach aktuellen Seiten dienen.

Im Allgemeinen kann heute durch die Verwendung von Suchmaschinen recht leicht nach gewünschten Bereichen gesucht werden. Die unten angegebenen Seiten wurden unter entweder unter der Verwendung von Schlüsselworten wie JPEG, Wavelet, Fraktal, fractal, Kompression, compression, image processing, Bildverarbeitung, Datenreduktion usw. gefunden, oder durch Verweise aus bereits gefundenen Seiten.

Im folgenden sind einige der verwendeten Links kurz dargestellt.

- **Vergleich von Verfahren zur Bildkompression**
http://rnvs.informatik.tu-chemnitz.de/Mitarbeiter/Thie_sub/vorlesung/compress/pictures.html
- **The Geometry Junkyard: All Topics**
<http://www.ics.uci.edu/~eppstein/junkyard/all.html>
- **Image Compression**
<http://www.dip.ee.uct.ac.za/imageproc/compression/>
- **Seminar 94/95**
<http://i31www.ira.uka.de/~semin94/Seminar.html>
- **Fraktale Bildkodierung mit IFS**
<http://www.informatik.uni-stuttgart.de/ipvr/bv/personen/mache/Tharrer/node17.html#SECTION00051100000000000000>
- **Seminar im SS97: Moderne Bild- und Videokompressionstechniken**
http://www-vs.informatik.uni-ulm.de/Lehre/Bild_Video_SS97/index.htm
- **Kapitel 4 : Fraktale Kompression**
http://i31www.ira.uka.de/~semin94/04_Fraktal/index.html
- **Fractal Overview: Creating Fractal Images**
<http://www.iterated.com/science/tcreate.htm>
- **Fractal Compression**
<http://www.mta.ca/~mctaylor/sci.fractals-faq/compression.html>

- **Andreas Kassler's Fractal Image Compression Page**
<http://www-vs.informatik.uni-ulm.de/Mitarbeiter/Kassler/fractals.htm>
- **Some fractal sites**
<http://www.rpi.edu/normat/fractals.html>
- **Other Fractal Compression and related sites to visit**
<http://links.uwaterloo.ca/other.sites.html>
- **Iterated Systems**
<http://www.iterated.com/>
- **Raouf Hamzaoui**
<http://www.informatik.uni-freiburg.de/cgip/people/hamzaoui.html>
- **Fractal Image Compression**
<http://www.informatik.uni-freiburg.de/cgip/projects/fic.html>
- **Fractal Image Encoding**
<http://inls.ucsd.edu/y/Fractals/>
- **Chaffey's Fractals Compression Links**
<http://www.chaffey.org/fractals/compression.html>
- **Amara's Wavelet Page**
<http://www.amara.com/current/wavelet.html#wwwintro>
- **Wavelets at Imager**
<http://www.cs.ubc.ca/nest/imager/contributions/bobl/wvlt/top.html>
- **Wavelets**
<http://www2.informatik.uni-jena.de/mrz/Wavelets.html>
- **Wavelet Resources**
<http://www.mathsoft.com/wavelets.html>
- **LuRaTech Homepage**
http://www.luratech.com/index_g.html
- **WAVELET THEORY**
<http://www.summus.com/publish/wavelets/wavelet.htm>
- **Wavelet Image Compression Construction Kit**
<http://www.cs.dartmouth.edu/gdavis/wavelet/wavelet.html>
- **Wavelet Transform Examples**
http://www.awi-potsdam.de/www-pot/atmo/deca_clim_var/wave_trans_exam.html
- **Wavelet sources**
<http://www-ocean.tamu.edu/baum/wavelets.html#C1.2>
- **JPEG-Homepage**
<http://www.jpeg.org/public/jpeghomepage.htm>
- **JPEG-Organisation**
<http://www.jpeg.org/public/jpeglinks.htm>
- **JPEG-FAQ**
<http://www.faqs.org/faqs/jpeg-faq/part1/preamble.html>
- **JPEG-Kompression**
<http://jerusalem.windows-nt.uni-karlsruhe.de/members/frank/stab/node3.html>
- **IA White Paper: Electronic Image Formats and Compression Algorithms**
<http://www.lanl.gov/projects/ia/stds/ia680120.html>
- **ISO IS-10918 - Understanding JPEG Image Compression**
http://icib.igd.fhg.de/icib/it/iso/is_10918-1/pvrg-descript/doc.html
- **JPEG-What is it**
<http://www.whatis.com/jpeg.htm>

- **Satellite Images and Data Sets**
<http://www.itc.nl/bakker/satellite.html>
- **NASA Landsat Site**
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- **USGS Landsat Site**
<http://landsat7.usgs.gov/>
- **Spotimage**
<http://www.spotimage.fr/spot-us.htm>
- **Digital Globe, Early Bird**
<http://www.digitalglobe.com/>
- **Space Image, Ikonos**
<http://www.spaceimage.com/>

Abbildungsverzeichnis

2.1	Lena, nicht komprimiert, 512 × 512 Pixel	13
2.2	Wavelet komprimiertes Bild, Kompressionsfaktor 1:43	13
2.3	JPEG komprimiertes Bild, Kompressionsfaktor 1:43	13
2.4	Fraktal komprimiertes Bild Kompressionsfaktor 1:43	13
3.1	Darstellung der Sortierreihenfolge der DCT-Koeffizienten	18
3.2	Schematische Darstellung des ersten Zerlegungsschrittes bei der Wavelet-Transformation (aus [Louis et al. 1994]).	22
3.3	Darstellung der ersten drei Zerlegungsschritte bei der Wavelet-Transformation (aus [Louis et al. 1994]).	23
3.4	Darstellung des Photokopieralgorithmus am Beispiel des Sierpinski-Dreiecks. Als Basisset A_0 wurde ein Kreis verwendet.	25
3.5	Beispiel für ein einfaches LIFS. Entnommen aus [Barnsley & Hurd 1993b]	27
3.6	Startbild bei Dekomprimierung	28
3.7	Ergebnis nach einer Iteration	28
3.8	Ergebnis nach sieben Iterationen (Bild zuvor mit 64 Pixeln Range-Block-Größe komprimiert, Kompressionsfaktor 1:246	28
3.9	Mit 16 Pixeln Range-Block-Größe komprimiertes Bild (Startbild wie oben), Kompressionsfaktor 1:43	28
4.1	Darstellung der Histogramme beobachteter und erwarteter Häufigkeiten am Beispiel der JPEG-Kompression	30
4.2	Darstellung der Histogramme beobachteter und erwarteter Häufigkeiten am Beispiel der Wavelet-Kompression	31
4.3	Darstellung der Histogramme beobachteter und erwarteter Häufigkeiten am Beispiel der fraktalen Kompression	31
4.4	Darstellung der Differenzen zwischen beobachteten und jeweils erwarteten Häufigkeiten bei einem Kompressionsverhältnis von 1:6,43.	32
4.5	Histogrammdarstellung der Differenzen verschiedener Kompressionsverhältnisse am Beispiel der Wavelet-Kompression mit MOMS-Daten	32
4.6	Histogrammdarstellung der Differenzen verschiedener Kompressionsverhältnisse am Beispiel der fraktalen Kompression mit MOMS-Daten	33
4.7	Histogrammdarstellung der Differenzen bei einem Kompressionsverhältnis von ca. 1:2 am Beispiel der MOMS-Daten für jedes getestete Kompressionsverfahren	33
5.1	Algorithmus der KQZ mit Selbstkontrolle	44

5.2	Das Prinzip der Selbstkontrolle	45
5.3	Schematische Darstellung des Grob-zu-Fein Prinzips	45
5.4	Algorithmus der Grob-zu-Fein Strategie	46
5.5	Schematische Darstellung der Verwendung variabler Fenstergrößen	47
5.6	Schematische Darstellung der Positionsvorhersage	48
5.7	Ablaufschema der Multi-Image-Funktion	49
5.8	Alternative Suche des zu übertragenden Punktes	49
5.9	Algorithmus des Multi-Image-Matching	50
6.1	Bildausschnitt RMK Top	52
6.2	Bildausschnitt DPA	53
6.3	Bildausschnitt MOMS, Flughafen München-Erding	53
6.4	Übertragung vom Originalbild I_1 in das durch den Einfluss der Kompression verlustbehaftete Bild I_2	55
6.5	Darstellung des Verhältnisses zwischen Bild I_1 und Bild I_3	55
6.6	Darstellung der Verschiebung zwischen Bildinhalt und der durch JPEG-Kompression entstandenen Block-Artefakte	56
6.7	Kompressionsraten der drei Verfahren am Beispiel des DPA-Bildes	57
6.8	Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (RMK Top)	58
6.9	Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (DPA)	58
6.10	Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (MOMS)	59
6.11	Berechnung der Differenzen	61
6.12	Durch JPEG-Kompression entstandene Abweichungen am Beispiel RMK Top	62
6.13	RMSE (Grauwerte) am Beispiel JPEG-Kompression	62
6.14	Durch fraktale Kompression entstandene Differenzen am Beispiel RMK Top	63
6.15	PSNR für alle Kamera- und Kompressionstypen	63
6.16	Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel RMK Top (Typ B: Übertragung ohne Selbstkontrolle, Typ C: Übertragung mit Selbstkontrolle)	64
6.17	Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel DPA (Typ B: Übertragung ohne Selbstkontrolle, Typ C: Übertragung mit Selbstkontrolle)	65
6.18	Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel MOMS (Typ B: Übertragung ohne Selbstkontrolle, Typ C: Übertragung mit Selbstkontrolle)	65
6.19	Durchschnittlich zur Punktübertragung mittels Least Squares Matching benötigte Anzahl an Iterationen am Beispiel MOMS	66
6.20	Durchschnittlich zur Punktübertragung mittels Least Squares Matching benötigte Anzahl an Iterationen am Beispiel DPA	67
6.21	Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top zwischen originalem und komprimiertem Bild mit Selbstkontrolle	67
6.22	Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top ohne Selbstkontrolle, zueinander versetzt ausgeschnittene Bilder	68
6.23	Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top mit Selbstkontrolle	70

6.24 Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (ohne Selbstkontrolle) 72

6.25 Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (mit Selbstkontrolle) 72

7.1 Beziehung zwischen Kompressionsverhältnis und Qualität (DPA) 76

7.2 Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel RMK Top (Typ A: ohne Selbstkontrolle, Typ B: mit Selbstkontrolle) 78

7.3 Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel DPA (Typ A: ohne Selbstkontrolle, Typ B: mit Selbstkontrolle) 78

7.4 Darstellung der erfolgreich übertragenen Punkte am Beispiel MOMS (Typ A: ohne Selbstkontrolle, Typ B: mit Selbstkontrolle) 79

7.5 Durchschnittlich zur Punktübertragung mittels Least Squares Matching benötigte Anzahl an Iterationen am Beispiel MOMS 80

7.6 Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top ohne Selbstkontrolle, echtes Stereobildpaar 81

7.7 Genauigkeit der Übertragung am Beispiel RMK Top mit Selbstkontrolle, echtes Stereobildpaar . 83

7.8 Übertragungsquote vs. Genauigkeit der Übertragung am Beispiel der RMK Top 83

7.9 Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (Typ A, ohne Selbstkontrolle, echtes Stereopaar) 86

7.10 Zusammenhang Bildqualität und Übertragungsgenauigkeit (Typ B, mit Selbstkontrolle, echtes Stereopaar) 86

8.1 Zu erwartende Höhenänderung (absolut) bei Daten der RMK Top Kamera 92

8.2 Zu erwartende relative Höhenänderung bei Daten der RMK Top Kamera gegenüber der theoretischen Genauigkeit 93

8.3 Absolute Höhenänderung bei Daten der RMK Top Kamera 93

9.1 Algorithmus des vorgeschlagenen Kompressionsverfahrens 97

Tabellenverzeichnis

3.1	Darstellung der verwendeten Symmetrien und zugehörigen Matrizen. Entnommen aus [Barnsley & Hurd 1993b]	26
5.1	Standardparameter der KQZ	43
5.2	Veränderung der Genauigkeit bei Lösen der Rückübertragungsbedingung	45
5.3	Veränderung der Übertragungsgenauigkeit bei Änderung des Operatorfensters	48
6.1	Konvergenzbedingungen der zu schätzenden Parameter	57
6.2	Verwendete Kompressionsfaktoren am Beispiel des DPA-Bilddatensatzes	60
6.3	Entropie der Bilddaten (original, komprimiert)	64
6.4	Kompressionsfaktor bei 10% Übertragungsverlust	66
6.5	Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ A	68
6.6	Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ B	69
6.7	Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ C	70
7.1	Konvergenzbedingungen der zu schätzenden Parameter, reale Stereobilder	75
7.2	Anzahl verwendeter Punktpaare, Maschengröße des zur Punktgewinnung verwendeten regelmäßigen Rasters	75
7.3	Verwendete Kompressionsfaktoren am Beispiel des DPA-Bilddatensatzes, Stereo	77
7.4	Kompressionsfaktor bei 10% Übertragungsverlust	79
7.5	Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ A	82
7.6	Vergleich maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust zwischen künstlich generiertem und echtem Stereopaar, Punktübertragung ohne Selbstkontrolle	82
7.7	Genauigkeit der erfolgreich übertragenen Punkte bei 10% Übertragungsverlust	84
7.8	Maximal zulässige Kompression bei 1/10 Pixel Genauigkeitsverlust, Punktübertragung nach Typ B	84
8.1	Kameraparameter RMK Top	89
8.2	Kameraparameter DPA	90
8.3	Kameraparameter MOMS02	91
8.4	Kompressionsverhältnis bei 10% Verschlechterung der Höhengenaugkeit der Objektpunkte	92

C.1 Zusammenstellung im Weltraum befindlicher Kamerasysteme	105
C.2 Zusammenstellung im Weltraum befindlicher Sensorsysteme	106
C.3 Zusammenstellung aktuell bekannter Luftbildkameras	106
C.4 Zusammenstellung aktuell bekannter Flachbett-Scanner für photogrammetrische Anwendungen	107

Dank

Während meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie (IfP) der Universität Stuttgart entstand der Hauptteil dieser Arbeit. Für diese Zeit am IfP möchte ich mich insbesondere bei seinem Leiter, Prof. Dr.-Ing. Dieter Fritsch bedanken, der die vorliegende Arbeit initiiert und als Hauptberichter betreut hat. Zahlreiche Diskussionen und kritische Anmerkungen seinerseits sind in den Inhalt und die Form der Arbeit eingeflossen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner, dem Mitberichter dieser Arbeit.

Den für die Erstellung dieser Arbeit notwendigen Freiraum erhielt ich von meiner Freundin Antje Quednau. Dafür und für die mehrfache Kontrolle der Arbeit möchte ich mich bei Ihr ganz herzlich bedanken.

Danken möchte ich auch allen meiner ehemaligen Kollegen am IfP, die am Erfolg der Arbeit beteiligt waren. Besonders erwähnen möchte ich hierbei Prof. Dr.-Ing. Michael Hahn für seine tatkräftige Unterstützung über den gesamten Zeitraum sowie meinen ehemaligen Zimmerkollegen Michael Glemser und Berthold Plietker bzw. Norbert Haala, Heiner Hild, Babak Ameri und Christian Stätter. Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Freund und Kollegen Karl-Heinrich Anders sowie Werner Schneider und Markus Englich, die ebenfalls bei Problemen immer ein offenes Ohr für mich hatten. Während meiner gesamten Zeit am IfP war stets ein überaus angenehmes und offenes Arbeitsumfeld vorhanden.

Zum Schluss möchte ich mich sowohl bei meinen Eltern und Familienmitgliedern als auch bei all meinen Freunden bedanken, die mir während der gesamten Zeit den notwendigen Rückhalt gegeben haben.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name, Vorname	Kiefner, <i>Michael</i> Walter
Geburtsdatum / -ort	19. Januar 1966 in Aalen
Familienstand	ledig

Schulbildung	1972 - 1976	Braunenberg-Grundschule Wasseralfingen
	1976 - 1985	Kopernikusgymnasium Wasseralfingen
		Abschluss: Abitur

Wehrdienst	1985 - 1986	Bei Landsberg
-------------------	-------------	---------------

Studium	1986 - 1994	Studium der Informatik mit Schwerpunkt Software-orientierte Informatik Abschluss: Diplom-Informatiker
----------------	-------------	---

Berufliche Tätigkeiten	1994 - 1999	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart
	seit 1999	Mitarbeiter bei der Firma Z/I Imaging GmbH, Oberkochen