Vergleich verschiedener Verfahren zur Erkennung von Änderungen in multispektralen Luftbildern städtischer Gebiete

Diplomarbeit von **Stefan Zenk**

Fachbereich Physik

Hamburg den 24. Mai 2000

Datenauswertungsorientierte Diplomarbeit am
Fachbereich Physik der Universität Hamburg
II. Institut für Experimentalphysik
Arbeitsgruppe CENSIS, Fernerkundung

Gutachter: Prof. Dr. H. Spitzer und Prof. Dr. J. Bienlein

Kurzfassung

Das Thema der vorliegenden Diplomarbeit ist das quantitative erweitern und bewerten vorhandener Algorithmen zur Änderungsdetektion [20], [24] und [18]. Als Datenmaterial wurden Bilder verschiedener Befliegungen der Stadt Nürnberg verwendet, welche von einem Multispektral-Scanner (DAEDALUS AADS 1268[1]) mit 11 Multispektralkanälen aufgenommen worden sind. In dieser Diplomarbeit, die in der Arbeitsgruppe CENSIS[2] geschrieben wurde, wird die Bildvorverarbeitung und die Änderungsdetektion behandelt.
Vorraussetzung der Änderungsdetektion zweier Bilder, die von demselben Objekt stammen, ist die genaue Zuordnung der Bildpunkte. Dieser Arbeitsschritt wird als Registrierung bezeichnet. Die Registrierung läuft halbautomatisch ab, d.h. in den Bildern werden zunächst korrespondierende Bildpunkte (Paßpunkte) gesetzt. Mit diesen wird dann eine Transformation bestimmt, welche das eine Bild auf das andere abbildet.
Im ersten Teil der Diplomarbeit wird eine Methode angegeben, mit der die Registriergenauigkeit bestimmt werden kann. Die Registriergenauigkeit bewegt sich im Bereich von einem Pixel.
Im zweiten Teil werden die Grundlagen, Methoden und Probleme der Änderungsdetektion beschrieben. Methodenschwerpunkte sind die Hauptachsentransformation (HAT) und die Multivariate Alteration Detection (MAD), die sich als robuste Verfahren erwiesen haben. Desweiteren werden Verfahren erklärt, mit denen die Änderungsergebnisse interpretiert werden können.

[1] Betrieben durch das Deutsche Forschungszentrum für Luft und Raumfahrt DLR
[2] CENter for Science and International Security

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **10**

2 Grundlagen **12**
2.1 Strahlengang 13
2.2 Der Scanner 15

3 Registrierung von Luftbildern **17**
3.1 Panoramaeffekt 17
3.2 Paßpunkte 18
3.2.1 Welche Punkte eignen sich als Paßpunkte 18
3.3 Zwei Arten der Registrierung 18
3.3.1 Die Unterschiede 19
3.3.2 Welche Registrierung verwendet wurde 19
3.4 Die Transformation 20
3.4.1 Registrierung nach Akima 20
3.4.2 Hardware/Software 21
3.5 Bildmaterial 21
3.6 Genauigkeit 22

4 Änderungsdetektion **24**
4.1 Wozu sie gebraucht wird 24
4.2 Häufige Probleme 24
4.2.1 Schatten 24
4.2.2 Stereoeffekt 25
4.3 Bilddaten als Spektren 25
4.3.1 Spektren mit geringer Signalhöhe 26
4.4 Einfache Verfahren 27
4.4.1 Differenzbildung 27
4.4.2 Quotientenbildung 27
4.4.3 Vor- und Nachteile 27
4.5 Varianzbildung 28
4.5.1 Parameter des benutzten Algorithmus 28
4.5.2 Der Algorithmus 29
4.5.3 Ein Beispiel 29
4.5.4 Ein weiteres Beispiel 31

4.5.5 Vor- und Nachteile . . . 31
4.6 Hauptachsentransformation (HAT) . . . 32
4.6.1 Die Gewichtung . . . 32
4.6.2 Die Parameter des benutzten Algorithmus . . . 34
4.6.3 Schritte des Algorithmus . . . 35
4.7 Wenn zuviel Änderung . . . 37
4.7.1 Niedrige Spektren . . . 37
4.8 Groundtruthkarte . . . 37
4.9 Auswertungsmethode . . . 38
4.9.1 Konfusionsmatrix . . . 38
4.9.2 Kappa-Wert . . . 39
4.10 Darstellung der Änderungsergebnisse . . . 40
4.10.1 Betragsbildung . . . 40
4.10.2 Schwellwertbildung . . . 40
4.11 Methode für unüberwachte Schwellwertbestimmung . . . 41
4.11.1 Die Parameter . . . 42
4.11.2 Algorithmen der Methoden . . . 42
4.12 Wahrscheinlichkeitsbild . . . 44
4.12.1 Maximum Likelihood . . . 44
4.12.2 Die Parameter des Algorithmus . . . 46
4.12.3 Der beschriebene Algorithmus . . . 47
4.13 Daedalus-, Landsat- und Ikonosbilder . . . 48
4.14 Der Ikonos-Satellit . . . 49
4.15 Multivariate Alteration Detection (MAD) . . . 49
4.15.1 MAD-Transformation . . . 51

5 Auswertung **52**
5.1 Stadtgebiet . . . 54
5.1.1 Varianzmethode . . . 57
5.2 HAT - kleine Fenstergröße . . . 58
5.2.1 HAT - Große Fenstergröße . . . 60
5.2.2 NDVI - Der Vegetationsindex . . . 61
5.2.3 Die Vegetation . . . 62
5.2.4 Landsat- und Ikonoskanäle . . . 65
5.3 MAD . . . 68
5.4 Flughafenbilder . . . 70
5.4.1 Auswertung . . . 70
5.4.2 Varianzmethode . . . 72
5.4.3 Hauptachsentransformation . . . 74
5.4.4 Landsat- und Ikonoskanäle . . . 74
5.4.5 MAD . . . 77
5.5 Wenn zuviel Änderung . . . 79
5.6 Großer Vegetationsanteil . . . 84
5.6.1 Varianzmethode . . . 85
5.6.2 Hauptachsentransformation . . . 85

5.6.3 Hauptachsentransformation mit NDVI-Maske 86
5.6.4 MAD 88
5.7 Empfehlung für Parameter und Algorithmen (HAT, Varianz) 90
5.8 Empfehlung für MAD 91

6 Zusammenfassung **92**

7 Ausblick **95**
7.1 Andere Arbeiten zur Änderungsdetektion 95
7.2 Konturregistrierung 96

A Registrierter Flugstreifen **97**

B Bildausschnitte mit Kontrollpunkten **100**

C Vergleich der beiden Registrierungsverfahren **105**
C.1 CD-Sat - Das MAD-Programm 107
C.1.1 Darstellung 108

D Source-Code **111**

E Mathematische Definitionen **115**

F Canonical Correlation Analysis **117**

G Eingefärbte Ergebnisbilder der HAT-Methode **118**
G.1 Vegetationsgebiet 118
G.2 Stadtgebiet 119
G.3 Flughafengebiet 120

H Eingefärbte Ergebnisbilder des MAD-Verfahrens **121**
H.1 Vegetationsgebiet 121
H.2 Stadtgebiet 122
H.3 Flughafengebiet 123
H.4 Zirkus - MAD-Komponenten 124
H.4.1 Daedaluskanäle 124
H.4.2 Landsatkanäle 126
H.4.3 Ikonoskanäle 127

I Technische Daten **128**
I.1 Deadaluskanäle 128

Literaturverzeichnis **130**

Abbildungsverzeichnis

2.1 *Strahlenspektrum der Sonne für eine Luftmasse I=1* 13
2.2 *Reflektion an einer Oberfläche* 14
2.3 *Der Realfall des Strahlengangs zwischen Sonne, Objekt und Sensor.* . 14
2.4 *Schematischer Aufbau des Zeilenscanners* 16
2.5 *Scanbereich und Datenformat des Scanners* 16

3.1 *Segmentgröße im Nadir und Off-Nadir* 18
3.2 *Gebäudeecke im Off-Nadir. Das Problem der Projektion* 19

4.1 *Probleme mit Schatten* 25
4.2 *Sechs Pixelspektren* 26
4.3 *Varianzbeispiel 1 - Ausgangsbilder* 30
4.4 *Varianzbeispiel 1 - Varianzen* 30
4.5 *Varianzbeispiel 1 - Logarithmierte Varianzen* 30
4.6 *Varianzbeispiel 1 - Endergebnis* 30
4.7 *Varianzbeispiel 2 - Ausgangsbilder* 31
4.8 *Varianzbeispiel 2 - Varianzen* 31
4.9 *Varianzbeispiel 2 - Endergebnis* 31
4.10 *Der Realfall der Hauptachsentransformation* 33
4.11 *Beispiel für die Häufigkeit der Längen der Änderungsvektoren* 41
4.12 *Gaußanfittung an ein Histogramm* 41
4.13 *Bestimmung der Schwelle. Der Schnittpunkt beider Gaußkurven ist die Schwelle* 45

5.1 *Stadtgebiet Nürnberg 91 - Kanal 7* 54
5.2 *Stadtgebiet Nürnberg 95 - Kanal 7* 54
5.3 *Groundtruthkarte des Stadtgebietes* 56
5.4 *Änderungsergebnis der Varianzmethode auf das Stadtgebiet* 57
5.5 *Endergebnis der Hauptachsentransformation ohne Normierung auf lokale Varianz (Fenstergröße: 3x3)* 58
5.6 *Endergebnis der Hauptachsentransformation mit Normierung auf lokale Varianz (Fenstergröße: 3x3)* 59
5.7 *Endergebnis der Hauptachsentransformation ohne Normierung auf lokale Varianz (Fenstergröße: 11x11)* 60
5.8 *Die Hauptachse im Infraroten* 62
5.9 *NDVI-Maske des Stadtgebietes* 63

5.10 *Endergebnis der Hauptachsentransformation ohne Normierung. Während der HAT wurde die NDVI-Maske berücksichtigt.* 64
5.11 *Endergebnis der HAT ohne NDVI-Maske und ohne Normierung auf lokale Varianz. Das Endergebnis wurde mit der NDVI-Maske multipliziert.* 65
5.12 *MAD-Ergebnis des Stadtgebietes der Daedaluskanäle* 68
5.13 *MAD-Ergebnis des Stadtgebietes der Landsatkanäle des Daedalusbildes* 69
5.14 *MAD-Ergebnis des Stadtgebietes der Ikonoskanäle* 70
5.15 *Flughafenausschnitt der Stadt Nürnberg.* 71
5.16 *Groundtruthkarte des Flughafens 94/97* 73
5.17 *Endergebnis der Varianzmethode des Flughafenausschnitts* 73
5.18 *Ergebnis der HAT des Flughafenausschnitts mit 3x3-Fenstergröße* . . 75
5.19 *Endergebnis des MAD-Verfahrens mit den Daedaluskanälen und den Ikonoskanälen des Daedalusbildes* 78
5.20 *Zirkusausschnitt zur Demonstration von zuviel Änderung und deren Ergebnisse mit HAT* 80
5.21 *Endergebnis mit der Varianzmethode* 81
5.22 *Endergebnis mit dem MAD-Verfahren* 81
5.23 *Die 10 Hauptachsen der HAT-Transformation angewendet auf den Zirkusausschnitt.* 82
5.24 *Die 10 Hauptachsen der HAT-Transformation angewendet auf das komplette Stadtgebiet.* 83
5.25 *Ein Beispiel für eine Szene mit sehr viel Vegetation.* 84
5.26 *NDVI-Maske der Vegetationsszene* 85
5.27 *Ergebnis der Varianzmethode angewendet auf die Vegetationsszene* . 85
5.28 *HAT angewendet auf die Vegetationsszene.* 86
5.29 *Endergebnis der Änderungsdetektion mit Hauptachsentransformation mit NDVI-Maske.* 87
5.30 *Endergebnis der Änderungsdetektion mit HAT ohne NDVI-Maske.* . . 88
5.31 *Endergebnis der Änderungsdetektion mit der MAD-Methode mit und ohne Glättung* 89

A.1 *Registrierter Flugstreifen 1995.* 97
A.2 *Kanal 7 des registrierten Flugstreifens 1995 (1800m) mit allen Paßpunkten (obere Hälfte)* 98
A.3 *Kanal 7 des registrierten Flugstreifens 1995 (1800m) mit allen Paßpunkten (untere Hälfte)* 99

B.1 *Ausschnitt Stadt 2 von 1995 mit 15 Kontrollpunkten. Dieser Ausschnitt liegt im Nadir-Bereich der Aufnahme, d.h. Verzerrungen an den Außenkanten haben hier keinen Einfluss* 100
B.2 *Ausschnitt Stadt 1 von 1995 mit 20 Kontrollpunkten. Dieser Ausschnitt liegt im Off-Nadir. Hier machen sich Verzerrungen am Bildrand schon bemerkbar.* 101

B.3 *Ausschnitt Stadt 3 von 1995 mit 20 Kontrollpunkten. Ebenfalls ein Ausschnitt im Off-Nadir. Hier sind teilweise große Verzerrungen im '95er Bild vorhanden. An dieser Stelle wurden besonders viele Paßpunkte gesetzt.* 102
B.4 *Ausschnitt der Vegetation aus dem Jahre 1995 mit 12 Kontrollpunkten. Es wird der Nadir- sowie der Off-Nadirbereich abgedeckt.* 103
B.5 *Ausschnitt des Flughafens von 1995 mit 25 Kontrollpunkten. Hier sind die lokalen Verzerrungen entlang der Asphaltflächen besonders gut zu erkennen.* 104

C.1 *Bilder für den Vergleich der Registrierarten* 105
C.2 *Das CDSAT-Programm* 107
C.3 *Importieren eines multispektralen Bildes* 108
C.4 *Master- und Slaveeinstellung für das MAD-Programm* 108
C.5 *Links das Ergebnisbild. rechts der Dialog, mit dem die Kanäle eingefärbt werden können* 109
C.6 *Darstellung der MAD-Komponenten mit Hilfe einer Schwelle.* 110

G.1 *Farbige Ergebnisbilder der Vegetationsszene mit dem HAT-Verfahren mit und ohne Normierung aus lokale Varianz* 118
G.2 *Farbiges Ergebnisbild des Stadtgebietes mit dem HAT-Verfahren ohne Normierung auf lokale Varianz* 119
G.3 *Farbiges Ergebnisbild des Stadtgebietes mit dem HAT-Verfahren mit Normierung auf lokale Varianz* 119
G.4 *Farbige Ergebnisbilder der Flughafenszene mit dem HAT-Verfahren mit und ohne Normierung aus lokale Varianz* 120

H.1 *Farbige Ergebnisbilder des Vegetationsgebietes mit dem MAD-Verfahren* 121
H.2 *Farbige Ergebnisbilder des Stadtgebietes mit dem MAD-Verfahren* . . 122
H.3 *Farbige Ergebnisbilder des Flughafengebietes mit dem MAD- Verfahren* 123

Tabellenverzeichnis

3.1 *Übersicht der Registriergenauigkeiten* 23

4.1 *Kappawert zum besseren Verständnis in Worte ausgedrückt* 39

5.1 *Tabelle zur Groundtruthkarte des Stadtgebietes* 56
5.2 *Übersicht aller Kanalarten mit der HAT und der Varianzmethode* . . 67
5.3 *Groundtruthkarte des Flughafens (91/95)* 72

I.1 *Spektrale Auflösung des Daedalus-Scanners* 128

Kapitel 1

Einleitung

Das Thema der vorliegenden Diplomarbeit, die in der Arbeitsgruppe CENSIS[1] bearbeitet wurde, ist das Erweitern und quantitative Bewerten der vorhandenen Algorithmen zur Änderungsdetektion.
Änderungsdetektion ist interessant, um Veränderungen in der Umwelt und in städtischen Gebieten zu finden. Ein weiterer Aspekt ist die Abrüstungskontrolle.
Anja Speck [20] hat ein Verfahren der einfachen Hauptachsentransformation implementiert und getestet und Rafael Wiemker [26] hat dieses Verfahren zu einem iterativen Verfahren erweitert. Das Verfahren arbeiten Kanalweise. Es wird pro Kanalpaar eine Hauptachsentransformation durchgeführt. Anschließend werden die N-Ergebnissbilder vereinigt.
Dieses Verfahren wird auf seine Vor- und Nachteile an verschiedenen Bildausschnitten der Stadt Nürnberg hin untersucht. Desweiteren wird ein neues Verfahren, die Multivariate Alteration Detection (MAD), welches von Nielsen und Conradsen [18] entwickelt worden ist, getestet. Dieses Verfahren betrachtet alle Kanäle auf einmal und sucht Kanalpaare, die eine maximale Korrelation besitzen. Die so entstandenen N-Kanalbilder müssen daher anders interpretiert werden, als die Ergebnisbilder der Hauptachsentransformation.
Als Bildmaterial wurden Flugstreifen aus den Jahren 1991, 1994, 1995 und 1997 von Befliegungen der Stadt Nürnberg verwendet, welche von einem multispektralen Scanner (DAEDALUS AADS 1268) mit 10 Kanälen im sichtbaren und infraroten Spektralbereich aufgenommen worden sind.
Da es sich hier um Bildmaterial eines Zeilenscanners handelt, sind durch die Aufnahmebedingungen Verzerrungen in den Aufnahmen entstanden. Um eine Änderungsdetektion mit diesem Bildmaterial durchführen zu können, müssen die Bilder durch Entzerrung aufeinander in Deckung gebracht werden. Dieser Arbeitsschritt wird Registrierung benannt.
Die Registrierung läuft halbautomatisch ab, d.h. in den Bildern werden zunächst korrespondierende Bildpunkte (Paßpunkte) gesetzt. Mit diesen wird dann eine Transformation bestimmt, welche das eine Bild auf das andere abbildet.
In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Fernerkundung beschrieben. Im darauffolgenden Kapitel wird auf Probleme der Fernerkundungsbilder eingegangen. Insbeson-

[1] CENter for Science and International Security

dere auf Verzerrungseffekte, welche bei einer Scanneraufnahme entstehen. Hier wird eine Methode zur Entzerrung vorgestellt, welche von H. Akima [1] entwickelt wurde und von R. Wiemker [24] für das von uns verwendete Grafiksystem implementiert wurde. Hier wird auch eine Abschätzung darüber abgegeben, wie genau die Registrierung ist.
In Kapitel 4 wird ein Einführung in die Änderungsdetektion gegeben. Es werden die verschiedenen Verfahren beschrieben, sowie Aussagen zu deren Vor- und Nachteile getroffen. Methodenschwerpunkte sind die Hauptachsentransformation (HAT) und die Multivariate Alteration Detection (MAD). Desweiteren wird auch auf die Visualisierung der Endergebnisse eingegangen. Hier habe ich verschiedene Methoden ausprobiert und in die vorhandenen Programme eingefügt.
Kapitel 5 stellt die Ergebnisse der verschiedenen Methoden auf verschiedene Ausschnitte von Nürnberg dar. Die Ergebnisse werden quantitativ bewertet und Aussagen über Inhalte einer Bildszene im Bezug auf Änderungsdetektion getroffen.

Im Laufe der Diplomarbeit sind verschiedene Aufgaben angefallen, die selbständig durchzuführen waren. U.a.

- Entwickeln eines Verfahrens zur Bestimmung der Registriergenauigkeit
- Bestimmung der Anzahl der nötigen Paßpunkte
- Einarbeitung in die Methoden der Änderungsdetektion
- Interpretation und quantitative Bewertung der Änderungsergebnisse

Während der oben genannten Aufgaben sind verschiedene Programme entstanden, die in die Bildverarbeitungssoftware der Arbeitsgruppe eingefügt worden sind. U.a.

- Erstellung einer Vegetations-Maske aus einem, bzw. zwei multispektralen Bildern
- Klassifikation der Änderungsergebnisbilder in wahre und falsche Klassifikation unter Hinzunahme einer Groundtruthkarte
- Bestimmung von Zahlenwerten, die eine Aussage über die Klassifikation geben
- Eine weitere Methode, um die Ergebnisbilder darzustellen
- Vereinigung der Ergebnisbilder des MAD-Verfahrens

In den folgenden Kapiteln werde ich von Change- und NoChange-Pixeln sprechen. Damit sind die Pixel gemeint, welche sich zwischen dem ersten und dem zweiten Bildausschnitt geändert haben.

Kapitel 2

Grundlagen

Möchte man eine Änderungsdetektion durchführen, also Änderungen zwischen zwei Aufnahmen des selben Gebietes zu unterschiedlichen Zeitpunkten finden, so müssen die entsprechenden Bilder zunächst in Deckung gebracht werden. Fotos die mit einer Kamera aufgenommen worden sind, müssen eventuell nur gedreht, skaliert und verschoben werden, so dass sie in Deckung sind. Wir in der Arbeitsgruppe CENSIS verwenden Bildmaterial, welches von einem Zeilenscanner[1] aufgenommen worden ist, der in einem Flugzeug der DLR installiert ist. Während einer Überfliegung liegt das Flugzeug selten stabil in der Luft, d.h. es treten bei der Aufnahme Verzerrungen im Bild auf. Zur Korrektur dieser Verzerrungen werden während der Aufnahme die Fluglage und die Geschwindigkeit aufgezeichnet. Mit Hilfe eines Gyrometers wird eine Rollkorrektur ausgeführt, eine Korrektur der anderen Bewegungen (Nicken, Gieren) findet nicht statt. Die Rollkorrektur hat sich aber als nicht ausreichend erwiesen [21]. Aus diesem Grund beinhalten die Bilder immer noch Verzerrungen. Diese letzten Fehler müssen für eine Änderungsdetektion so gut es geht entfernt werden. Vor der Registrierung müssen die Bilder noch einem anderen Bearbeitungsschritt unterzogen werden. In den Bilddaten, die von der DLR kommen, stellen die einzelnen Pixel Strahlungsintensitäten dar. Wir benötigen zur Änderungsdetektion Reflektanzdaten, denn wir unterscheiden die Pixel anhand der Materialeigenschaften. Wird die Erzeugung der Reflektanzbilder durch eine lineare Transformation angenähert, so reichen die Rohbilder allein aus. Beleuchtungsunterschiede werden dann durch die Hauptachsentransformation herausgefiltert.
Mit einem Hausdach, das zwei schrägen Dachhälften hat, tritt ein weiteres Problem auf. Wird das Hausdach seitlich angestrahlt, so reflektiert die eine Dachhälfte mehr Licht als die andere. Nimmt man das selbe Dach zu einer anderen Zeit und/oder zu einer anderen Jahreszeit auf, so werden andere Strahlungsintensitäten aufgenommen. Obwohl sich das Dach nicht verändert hat, würde der Änderungsdetektionsalgorithmus eine Änderung anzeigen. Diese Effekte können nicht herausgefiltert werden, da wir keine Informationen über die Dachneigung haben. Wir nähern Schrägdächer als Flachdächer an.
Atmosphärische Effekte wurden bereits herausgefiltert [12].
Hinzu kommt noch die Tatsache, dass wir Höheneffekte nicht berücksichtigen. Höhen-

[1] DAEDALUS-Scanner (s. Kap. 2.2)

effekte wirken sich im Bild als leichte Verzerrungen aus, welche durch Registrierung leicht zu korrigieren sind.
Sind die Bilder aufeinander registriert, kann mit der Änderungsdetektion begonnen werden. Es kann sein, dass die eine oder andere Änderung detektiert wird, obwohl da keine ist. Liegt das nun am Algorithmus oder liegt ein Registrierfehler vor?
In den folgenden zwei Kapiteln wird der Weg des Lichts vom Scanner bis zum fertigen Bild für die Änderungsdetektion beschrieben und der Einfluß der Verzerrungen diskutiert. In diesem Teil werden zwei Flugstreifen aus den Jahren 1994 und 1995 verwendet, um die Registriergenauigkeit zu bestimmen.

2.1 Strahlengang

Der Weg des Lichts, von der Sonne zum Scanner, ist im Vakuum einfach zu beschreiben. Das Licht trifft auf ein Objekt, wird von ihm reflektiert und trifft auf den Scanner. Durch diffuse Reflektion an der Oberfläche kommt noch ein gewisses Streulicht in den Sensor.
Das selbe Prinzip läuft auch in der Atmossphäre ab, nur gibt es dort sehr viele *Objekte*. Diese Objekte sind die Moleküle in der Atmossphäre. An ihnen wird das Licht gestreut. Es handelt sich hierbei um Mie- und Rayleighstreuung. Es treten aber auch noch zusätzlich Absorbtionen des Lichts an der Luft auf. In Abb. 2.1 ist zu sehen, wie stark die Absorption in der Atmosphäre ist. Die Absorbtion tritt im wesentlichen an den Molekülen H_2, $C0_2$, 0_2 und 0_3 auf.

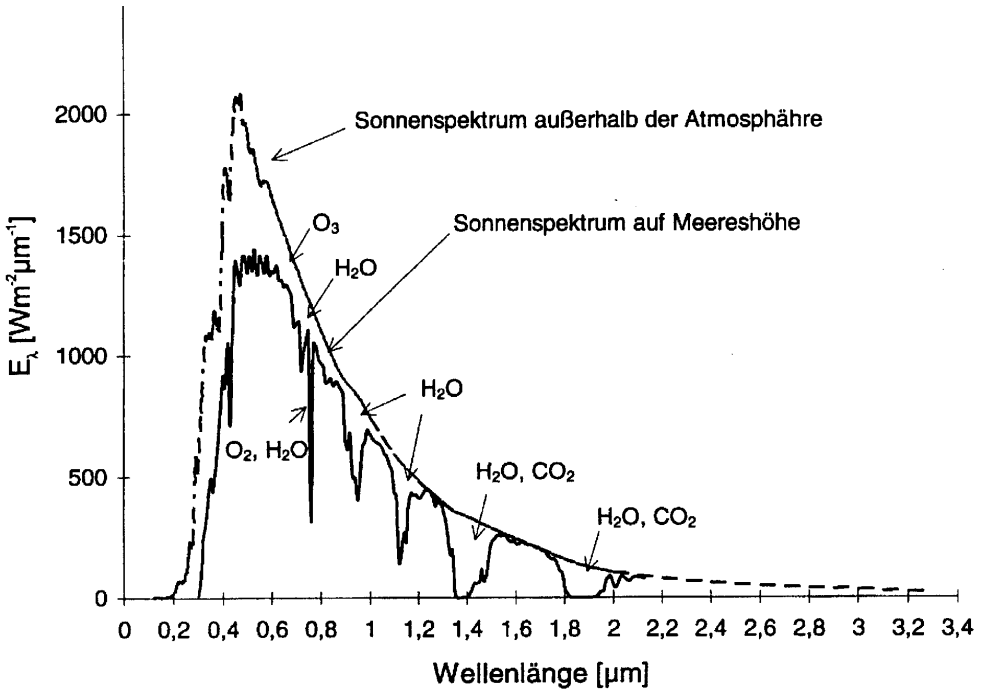


Abbildung 2.1: *Strahlenspektrum der Sonne für eine Luftmasse I=1 [29]*

Die Mie-Streuung ist eine Streuung an Aerosolen. Aerosole sind kleine Schwebpar-

tikel, deren Radius ungefähr der Wellenlänge entspricht. Sie kommt besonders bei größeren Wellenlängen zum tragen.
Bei der Rayleighstreuung induziert die elektromagnetische Strahlung ein elektromagnetisches Dipolmoment im Molekül, wodurch es zu einer von Rayleigh beschriebenen Streuung kommt. Diese Streuung ist auch für das Himmelsblau verantwortlich.
Die Reflektion an einem großen Objekt wird auch in zwei Arten unterteilt. In die direkte und diffuse Reflektion (s. Abb. 2.2). Die direkte Reflektion wird durch die Fresnelschen Gleichungen beschrieben. Die diffuse Reflektion ensteht dadurch, das eine Oberfläche nicht absolut glatt ist. Sie weist immer eine Rauigkeit auf. Alle Effekte zusammen ergeben dann die Strahlungsintensität, die vom Sensorelement im Scanner aufgenommen wird. In Abb. 2.3 wird der reale Strahlengang dargestellt.

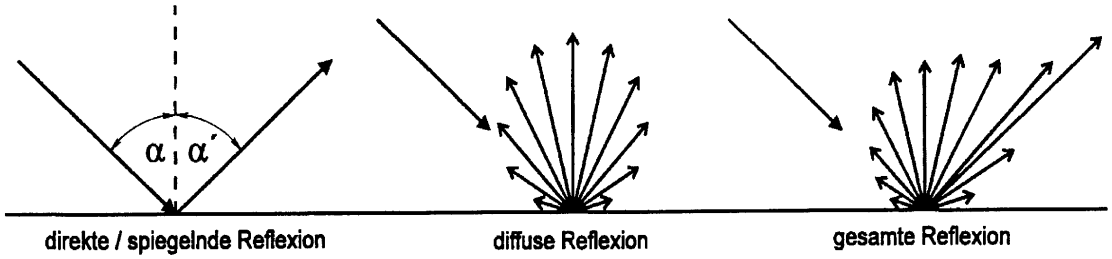


Abbildung 2.2: *Reflektion an einer Oberfläche*

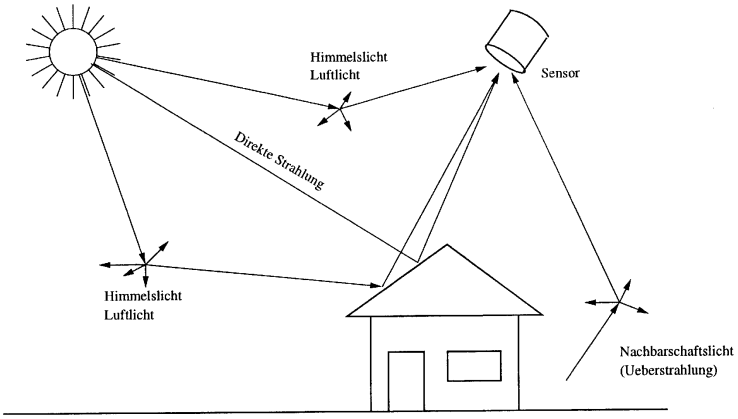


Abbildung 2.3: *Der Realfall des Strahlengangs zwischen Sonne, Objekt und Sensor.*

2.2 Der Scanner

Für die Aufnahmen wurde der 11-Kanal-Multispektralzeilenscanner DAEDALUS AADS 1268 der Firma Daedalus Enterprises Inc. verwendet.
Der Scanner besteht aus folgenden Komponenten:

- Scankopf
- Gyrometer
- AD-Wandler (zur Digitalisierung der Scanner-Meßwerte)
- Bedienungskonsole
- Magnetbandrekorder

Im Scankopf sind ein rotierender Spiegel und die nötige Optik untergebracht, um die eintreffenden Lichtstrahlen in den Detektor zu leiten (s. Abb. 2.4). Die rotierende Optik kann einen Winkelbereich von -42.96° bis +42.96° abtasten. Der Öffnungswinkel α beträgt 2.5mrad (=0.12°). Bei einer Flughöhe von 1800m resultiert daraus eine Pixelgröße b von

$$b = h[\tan(\Phi + \alpha) - \tan\Phi] \tag{2.1}$$

3.77 m/Pixel im Nadir und 7.06 m/Pixel im Off-Nadir. Um eventuelle Schwankungen des Flugzeugs auszugleichen, ist der Scanner über ein Gyrometer mit dem Flugzeug verbunden, der allerdings nur die Rollbewegungen abfängt. Der Detektor an sich besteht aus 11 Detektoreinheiten, welche die unterschiedlichen spektralen Bereiche abtasten. Welche Wellenlängen in den einzelnen Kanälen aufgezeichnet werden, ist in Anhang I.1 abgebildet.
Die so gewonnenen Daten werden seriell auf einem Band gespeichert. Der Scanbereich beträgt 716 Bytes à 11 Kanäle. Der Datenbereich der Bilddaten ist aber größer, denn es werden im eigentlichen Datenbereich der Bilddaten noch Leerbytes abgespeichert, damit die Daten der Fluglagekorrektur entsprechend korrigiert (im Datensatz verschoben) werden können. Die einzelnen Pixel werden jeweils mit 8 Bit (=256 Graustufen) abgespeichert. Zusätzlich werden noch weitere Scaninformationen abgespeichert (s. Abb. 2.5).

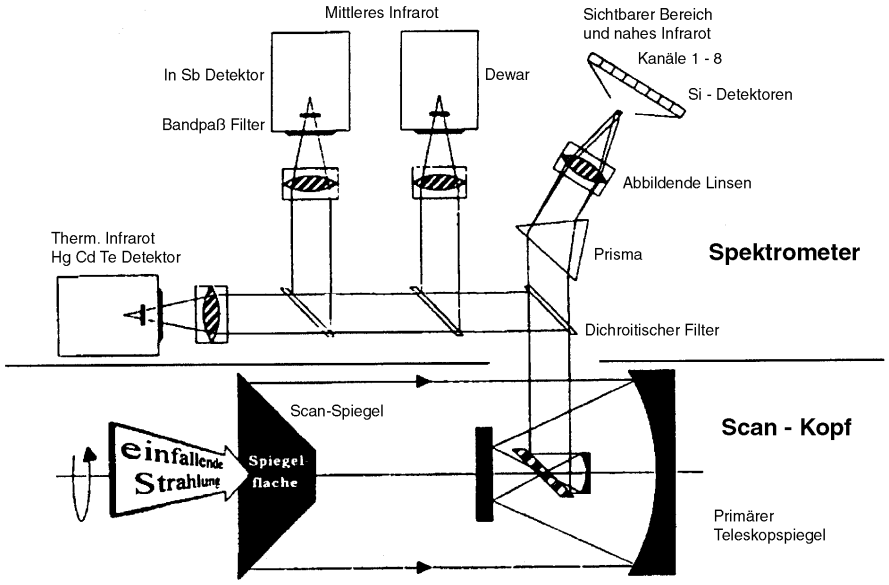


Abbildung 2.4: *Schematischer Aufbau des Zeilenscanners DAEDALUS AADS 1268, Daed. Ent. Inc. [9]. Über einen rotierenden Spiegel fällt das einfallende Licht über eine entsprechende Optik auf mehrere hintereinander angeordnete Strahlteiler. Der Scanner tastet einen Bereich von −42.96° bis +42.96° ab. Sein Öffnungswinkel beträgt 2.5 mrad (=0.12°). Nach dem ersten Strahlteiler fällt das Licht über eine abbildende Linse auf 8 CCD-Sensoren, die den sichtbaren Bereich und das nahe Infrarot abtasten. Die weiteren Strahlen werden auf InSb- und HgCdTe-Detektoren geleitet, welche das thermische und das tiefe Infrarot abtasten*

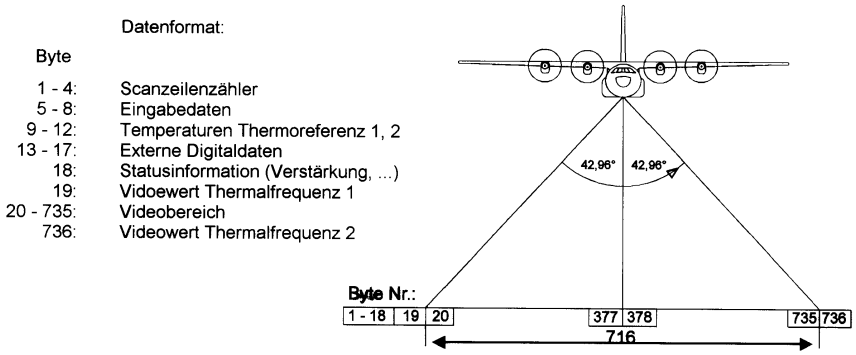


Abbildung 2.5: *Scanbereich und Datenformat des DAEDALUS (genauere Beschreibung im Text)*

Kapitel 3

Registrierung von Luftbildern

Wenn Fotos mit einem Zeilenscanner aufgenommen werden, wie es bei den verwendeten Bildern der Fall ist, so treten immer Verzerrungen auf. Diese Verzerrungen resultieren aus:

- Beschleunigung, Höhenveränderung, Roll-, Gier- und Nickbewegungen des Flugzeugs
- Geländeformationen, wie z.B. Hügel
- Panoramaeffekt

Soll mit solchen Scanneraufnahmen eine Änderungsdetektion durchgeführt werden, so müssen beide Bilder in Deckung gebracht werden, d.h. das eine Foto bleibt wie es ist und das andere wird derart transformiert, dass sich die entsprechenden Bildinformationen der beiden Bilder decken[1]. Alternativ können beide Aufnahmen auch einzeln auf eine Karte georeferenziert werden. Diese Methode erzeugt ein schlechteres Ergebnis (s. Kap. 3.3).

3.1 Panoramaeffekt

Tastet der Scanner mit gleichmäßiger Winkelgeschwindigkeit ω den Boden unter sich ab, so entsteht durch die geometrische Beziehung zwischen Scanner und Boden eine Verzerrung der Bilddaten (Abb. 3.1). Da der Öffnungswinkel des Scanners immer gleich ist, wird im Nadir (Scanner tastet rechtwinklig den Boden ab $\Phi \approx 0$) ein kleineres Bodensegment abgetastet als im Off-Nadir ($|\Phi| \gg 0$). Bezeichnet h die Flughöhe, α den Öffnungswinkel des Scanners und Φ den Scanwinkel, so ist die Breite b des aufgenommenen Bodensegmentes gegen durch Gl. 2.1 bestimmt.
Da die verwendeten Flugstreifen das selbe Gebiet abdecken, habe ich auf eine Panoramaentzerrung verzichtet, da es nur auf eine Deckungsgleichheit ankommt und nicht auf eine genaue Übereinstimmung der geographischen Positionen. Für die spätere Verarbeitung von anderen Flugstreifen ist eine Panoramaentzerrung wohl

[1] Marc Hermann hat sich ebenfalls mit diesem Problem auseinander gesetzt [8]. Das von ihm verwendete Bildmaterial war jedoch viel schwieriger zu registrieren.

u. U. vonnöten. In diesem Fall kann nur der deckungsgleiche Bereich zur Registrierung und Detektion verwendet werden.

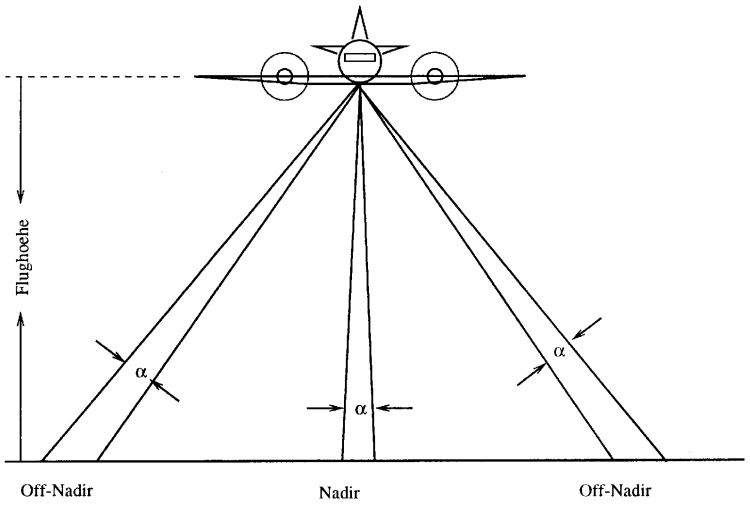


Abbildung 3.1: *Im Off-Nadir ist der abgetastete Bereich größer, als im Nadir. Das führt zu Verzerrungen die entfernt werden müssen, wenn die Fluglinie bei den Aufnahmen nicht nahezu gleich sind.*

3.2 Paßpunkte

Um ein Bild auf das andere zu registrieren, müssen korrespondierende Punkte gesetzt werden, welche in beiden Bildern die selbe geographische Lage haben.

3.2.1 Welche Punkte eignen sich als Paßpunkte

Geeignete Paßpunkte können z.B. Mittelpunkte von Kreuzungen oder Straßenmarkierungen sein. Wichtig ist, dasß alle Punkte auf dem Erdboden liegen. Gebäudeecken oder Bäume sind nicht zu empfehlen[2], da sie über dem Boden liegen und durch eine Seitenansicht (Off-Nadir) des Objektes eine andere Position im Foto haben (s. Abb. 3.2). Im Nadir können aber Hausecken und ähnliches verwendet werden. In der Vegetation ist es schwieriger Paßpunkte zu setzen, da sich Pflanzen und Bäume mit der Zeit verändern. Außerdem spielt die Jahreszeit auch eine wichtige Rolle.
Es ist an einigen Stellen schwierig Paßpunkte zu setzen, denn Kanten und Ecken sind in den Fotos unscharf, da es sich hier um 1800m Aufnahmen handelt. Straßen sind nur wenige Pixel breit.

3.3 Zwei Arten der Registrierung

Es gibt zwei Möglichkeiten, um Bilder aufeinander zu registrieren. Die eine Möglichkeit ist

[2]Siehe ebenfalls [8]

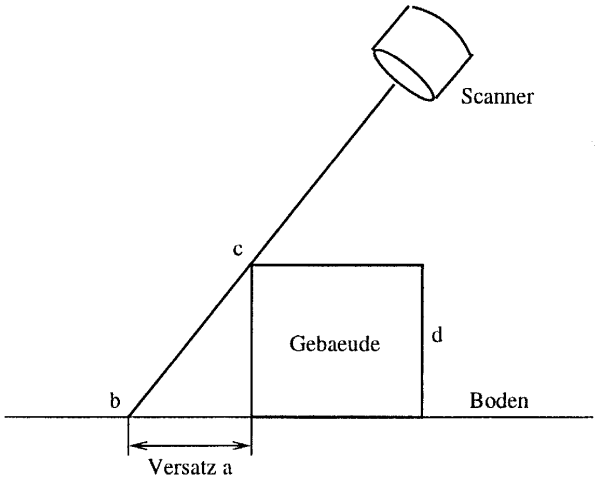


Abbildung 3.2: *Gebäudeecke im Off-Nadir. Das Problem der Projektion. Dort, wo der Bodenausschnitt (b) zu sehen sein sollte, ist die Hausdachecke (c) zu sehen. Dieser Effekt kann daran erkannt werden, das man in diesem Fall die Hauswand (d) sehen kann.*

- beide Fotos aufeinander zu registrieren, d.h. ein Bild wird auf das andere entzerrt.

Die andere Möglichkeit ist

- beide Fotos auf eine Karte der Region zu registrieren (georeferenzieren), d.h. es wird noch eine Landkarte benötigt. Beide Fotos werden dabei entzerrt.

3.3.1 Die Unterschiede

Beim Setzen der Paßpunkte werden in der Regel Fehler gemacht, da durch die Unschärfe keine exakten Ecken erkannt werden können.
Werden die Fotos aufeinander registriert so wird dieser Fehler nur einmal gemacht, während bei der Registrierung auf Karte der Fehler zweimal gemacht wird. Außerdem kommt noch erschwerend hinzu, dass nur wenige Paßpunkte gesetzt werden können, da die Karte nur eine Skizze ist. Die Karte muß auch auf dem aktuellen Stand sein.

3.3.2 Welche Registrierung verwendet wurde

Ich habe die erste Variante verwendet. In anfänglichen Versuchen habe ich die Registrierung auf Karte und aufeinander ausprobiert (s. Anhang C.1). Schon bei einem rein visuellen Vergleich habe ich feststellen können, dass die Registrierung der Bilder aufeinander viel besser ist, d.h. es war mehr Deckung in den Bildern. Dies habe ich durch einen visuellen Vergleich mit ENVI feststellen können.

3.4 Die Transformation

Bezeichnen wir das Ausgangsbild als Quellbild und das Zielbild als registriertes Bild, so werden die einzelnen Bildpixel des zu registrierenden Bildes neu gesetzt. Es kann zu Stauchungen und Dehnungen kommen. Wird ein Bildausschnitt gedehnt, so entstehen Lücken zwischen den Pixeln. Dies wird direkte Entzerrung genannt. Es gibt auch eine indirekte Entzerrung. Bei dieser werden die entstanden Lücken durch Grauwerte ausgefüllt, deren Intensitätswert aus den umliegenden Pixeln bestimmt wird. Es gibt im wesentlichen drei Methoden, wie die Grauwerte bestimmt werden:

- **Nächster Nachbar:** Als Grauwert wird der Wert des Pixels genommen, der dem neuen Pixel am nächsten liegt. Hier durch wird zwar ein Qualtitätsverlust in Kauf genommen, aber es werden keine Bildpixel mit neuen Reflektanzeigenschaften erzeugt.
- **Bilineare Interpolation:** Der neue Grauwert wird aus den vier nächsten Bildpunkten linear interpoliert, wobei der Abstand die Gewichtung darstellt.
- **Bikubische Interpolation:** Die umliegenden 5x5-Pixel des neuen Grauwertes werden zur Bestimmung verwendet, wobei die *Sinc*-Funktion als Gewichtung verwendet wird. Diese Methode liefert ein *schönes* Bild, aber die Reflektanzwerte werden, wie auch in der zweiten Variante, verändert.

Für das weitere Vorgehen wird das Verfahren der **nächsten Nachbarn** verwendet, da hier weder physikalische Meßwerte verändert noch neu erzeugt werden.

3.4.1 Registrierung nach Akima

Die Registrierung wurde nach der Akima-Methode durchgeführt. Der Algorithmus stammt ursprünglich von Hiroshi Akima 1978 [1]. Der Algorithmus wurde von Rafael Wiemker [23], [24] nach PV-Wave und später nach ENVI portiert.
Es handelt sich hierbei um ein lokales Interpolationsverfahren, für das aus den unregelmäßig verteilten Paßpunkten zunächst ein Dreiecksmaschennetz gebildet wird. Für alle Pixel innerhalb jedes Dreiecks werden zwei Polynome fünften Grades in x- und y-Richtung als Transformationsfunktion für das Zielbild der beiden Koordinaten $u = u(x, y)$ und $v = v(x, y)$ des Ausgangsbildes bestimmt (indirektes Verfahren). Polynome fünften Grades werden verwendet, da der Übergang zwischen den einzelnen Dreiecks-Segmenten stetig sein muß. In jedem Dreieck sind die Transformationsgleichungen dadurch den lokalen Gegebenheiten angepaßt.
Die Transformationsfunktionen für u und v können durch eine Funktion $z(x, y)$ ersetzt werden. z kann als Höhe bezeichnet werden, wobei die Höhe ein Maß für die Verschiebung eines Bildpunktes darstellt.
Diese *Höhen* werden durch ein bivariates Polynom fünften Grades bestimmt. Man kann sich die Höhenkarte durch viele Paraboloide zusammengesetzt vorstellen.

$$z(x, y) = \sum_{j=0}^{5} \sum_{k=0}^{5-j} q_{jk} x^j y^k$$

Zur Bestimmung der Höhenkarte müssen die Paraboloide um die einzelnen Paßpunkte bestimmt werden. Im eindimensionalen Fall genügt zur Schätzung der nächste Nachbar, um die Ableitung zu schätzen. Im eindimensionalen Akima-Modell braucht man mindestens sechs Punkte. Zum einen den zentralen Paßpunkt und dann noch fünf nächste Nachbarn, da es sich bei Akima um ein Polynom fünften Grades handelt. Für den zweidimensionlen Fall werden 11 Punkte benötigt. Einen Paßpunkt und zwei mal fünf nächste Nachbarn für die Polynome in x- und y-Richtung, da die Polynome unabhängig voneinander sind.
In dem von Rafael Wiemker in ENVI implementierten Akima Programm kann auch ein Parameter mit der Bezeichnung *nächste Nachbarn* eingestellt werden. Dieser Parameter bezieht sich auf die Anzahl der zu berücksichtigenden umliegenden Paßpunkte pro Dimension, d.h. es müssen bei einem Parameterwert von mind. Fünf mindestens 11 Paßpunkte gesetzt werden, damit der Akima Algorithmus arbeiten kann.
Nimmt man mehr Nachbarn (Standardwert ist zehn), so ist das System überbestimmt. Je nach Entfernung der einzelnen Paßpunkte von dem zentralen Paßpunkt kann die Interpolation besser oder schlechter werden. Sind die nächsten Nachbarn zu weit entfernt, wird das Ergebnis eher verschlechtert.
Bei ersten optischen Vergleichen hat sich 10 n. N. als bestes Ergebnis herausgestellt. Ich habe die Registrierung auch mit diesem Wert durchgeführt.
Im Gegensatz zu globalen Verfahren wie z.B. Transformationen mit Polynomen 2. Grades bleiben die Positionen der Paßpunkte erhalten und durch Hinzufügen von Paßpunkten kann die Genauigkeit u.U. verbessert werden.

3.4.2 Hardware/Software

Für die rechenintensiven Prozesse wurde eine Sun Ultra Sparc 60 mit 1152 MB Arbeitsspeicher verwendet. Als Software zur Registrierung wurde Envi 3.0 verwendet. Das ist eine interaktive Grafiksoftware basierend auf IDL 5. Die Paßpunkte wurden mit den ENVI-eigenen Funktionen gesetzt. Das Akima-Programm ist ein von Rafael Wiemker [23][24] hinzugefügtes Modul. Die Bestimmung der Registriergenauigkeit habe ich mit einem eigens dafür geschriebenen Programm unter PV-Wave vorgenommen. Der Source-Code befindet sich im Anhang C.

3.5 Bildmaterial

Für die Ermittlung der Registriergenauigkeit wurden zwei Flugstreifen (1800m Flughöhe) aus den Jahren 1994 und 1995 von Nürnberg verwendet. Außerdem werden noch zwei weitere Bildausschnitte aus den Jahren 91/95 verwendet, sowie aus den Jahren 94/97. Diese Ausschnitte wurden nicht weiter überprüft. Der Bilddatensatz 94 wurde am 18.10.94 um 12:05 und der von 95 am 21.07.95 um 10:48 aufgenommen. Die Flugstreifen sind im Anhang A abgebildet.
Durch die tiefstehende Sonne im Jahre 94 sind Schatteneffekte vorhanden. Diese betragen bei einer Flughöhe von 1800m eine Ausdehnung von ein bis zwei Bildpixeln,

wodurch eine Registrierung erschwert wird.
Alle Flugstreifen wurden fluglagekorrigiert. Da beide Flugstreifen nahezu das gleiche Gebiet abdecken, brauchten sie nicht panoramaentzerrt werden. In dem Jahr 95 sind an einigen Stellen starke Verzerrungen vorhanden. Schaut man sich den Flughafen an, so erkennt man auch, dass die Fluglagekorrektur nicht einwandfrei ist.

3.6 Genauigkeit

Zum Registrieren der beiden Flugstreifen wurden 254 Paßpunkte verwendet.
Wird eine Registrierung durchführt, so ist auch eine Aussage über die Genauigkeit der Registrierung wichtig. Um eine Aussage über den Fehler machen zu können, habe ich mich für folgende Methode entschlossen:
Für die Registrierung werden vorher N Paßpunkte gesetzt. Anschließend wird die Registrierung durchgeführt. Danach werden im Quellbild und im registrierten Bild in verschiedenen Gebieten Kontrollpunkte nach dem selben Prinzip[3] wie die Paßpunkte gesetzt. Kontrollpunkte sind auch Paßpunkte, nur werden sie nicht zum Registrieren, sondern zum Überprüfen der Registriergenauigkeit verwendet. Beim Setzen der Kontrollpunkte tritt eine neue Schwierigkeit auf. Im registrierten Bild sind die Kanten durch die Registrierungsmethode (nächste Nachbarn) verzerrt worden. So ist es schwieriger, im registrierten Bild einen Kontrollpunkt zu setzen als im Quellbild.
Als Genauigkeit habe ich mich für die mittlere quadratische Abweichung σ der Abstände der einzelnen Kontrollpunktpaare entschieden.

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \tag{3.1}$$

Zuerst habe ich mit 254 Paßpunkten registriert[4] und mir sieben Bereiche ausgesucht, die ich untersuchen wollte. Da in den Ausgangsflugstreifen an unterschiedlichen Orten verschieden große Verzerrungen vorhanden sind und da es drei verschiedene Arten von Regionen[5] gibt, habe ich mir markante Bereiche ausgesucht. Am linken und rechten Rand gibt es unterschiedlich starke Verzerrungen, deshalb habe ich die Ränder ebenfalls untersucht. Stadt 1 liegt im Off-Nadir und liegt somit im Bereich der Verzerrungen des linken Randes. Stadt 3 liegt ebenfalls im Off-Nadir. Im Gegensatz zur linken Bildseite sind hier teilweise starke Verzerrungen im '95er-Bild vorhanden. Ich habe an dieser Stelle auch besonders viele Paßpunkte gesetzt, um zu sehen, wie gut solch eine Verzerrung registriert werden kann. Stadt 2 dagegen liegt im Nadir. Hier werden also Randverzerrungen nicht zum Tragen kommen. Am Flughafen, welcher im Nadir liegt, ist besonders schön zu erkennen, dass die Fluglagekorrektur nicht einwandfrei ist. Die Vegetation deckt dagegen den Nadir und Off-Nadir ab.
Nach einer erstaunlich genauen Registrierung mit 254 Paßpunkten, habe ich immer jeweils 50 rein zufällig ausgewählte Paßpunkte entfernt und die Registrierung danach

[3] Mit dem selben Augenmaß
[4] Flugstreifen mit allen Paßpunkten im Anhang A
[5] Vegetation, städtische Gebiete und den Flughafen

erneut durchgeführt. Nach jeder Registrierung habe ich die Kontrollpunkte wieder an das Bild angepaßt, da die Registrierung mit weniger Paßpunkten ein etwas anderes entzerrtes Bild ergibt, und habe dann erneut die Genauigkeit bestimmt. Das Ergebnis der Genauigkeit als Funktion der Anzahl der Paßpunkte ist in Tab. 3.1 dargestellt. Die einzelnen Ausschnitte sowie eine Übersicht aller Paßpunkte sind im Anhang B abgebildet.
Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass einige Kontrollpunkte mit den Paßpunkten identisch sind.
Aus Tab. 3.1 ist ersichtlich, dass die Registrierungsgenauigkeit mit wachsender Zahl an Paßpunkten zunimmt. Sie wächst demnach bis zur Verwendung von 150 Paßpunkten. Eine weitere Erhöhung der Zahl der Paßpunkte bringt in der Regel nur eine minimale Verbesserung der Genauigkeit.
Auffallend ist die gute Registrierung der Vegetation. In dem Waldgebiet können nur wenige Paßpunkte gesetzt werden, so sind Paßpunkte und Kontrollpunkte teilweise identisch gesetzt worden. Als Setzfehler nehme ich auch einen Fehler von rund einem Pixel an. Am linken und rechten Bildrand sind die Verzerrungen am größten. Der Bereich Stadt 3 ist durch die großen Verzerrungen im '95er-Quellbild auch deutlich schlechter als der Bereich Stadt 1.

		Paßpunkte				
Gebiet	Kontrollpunkte	50	100	150	200	254
Vegetation*	12	5.60	5.09	2.74	1.61	1.04
Flughafen*	25	1.97	1.40	1.11	1.14	1.07
Stadt 1*	20	6.01	3.00	1.86	1.84	1.24
Stadt 2*	15	2.29	1.50	1.40	1.54	1.25
Stadt 3*	20	2.96	1.77	1.53	1.41	1.42
links	14	5.56	3.03	1.96	1.65	1.50
rechts	16	3.85	2.55	1.93	2.06	1.63

Tabelle 3.1: *Registriergenauigkeit nach Gl. 3.1 für verschiedene Bildregionen bei Verwendung von einer unterschiedlichen Anzahl von Paßpunkten. Die Einheit sind Bildpixel. Die mit * versehenen Gebiete sind in Anhang B mit ihren Kontrollpunkten abgebildet*

Für die Registrierung solcher Flugstreifen werden 150 bis 200 Paßpunkte benötigt, um eine Registriergenauigkeit von 1 bis 2 Pixeln zu erreichen.

Kapitel 4

Änderungsdetektion

4.1 Wozu sie gebraucht wird

Oft stellt sich die Frage nach den Änderungen, die in einer bestimmten Zeit in einem Gebiet auftreten. Wie hat sich eine städtische Fläche geändert, wie groß ist das Maß von Umweltschäden, oder werden Abrüstungsverträge eingehalten.
Dazu benötigt man zwei Bilder von der selben Region, die zu verschiedenen Zeiten aufgenommen worden sind. Je nach Zielsetzung wird auf Satellitenbilder oder Luftaufnahmen zurückgegriffen. Ein Änderungsdetektionsprogramm spürt anhand der beiden Bilder die Änderungen auf und stellt sie dar.
Änderungsdetektion ist prinzipiel mit wenig Aufwand zu realisieren. Zieht man von dem einen Bild das andere ab, so erhält man ein Differenzbild. Wenn die zwei zu vergleichenden Pixel den selben Grauwert haben, ist keine Änderung da. Sind sie verschieden, dann ist eine Änderung vorhanden. Mit zwei Bildern, die mit exakt den selben Bedingungen aufgenommen worden sind kann diese Art der Änderungsdetektion durchgeführt werden. Können aber beide Bilder unter exakt den selben Bedingungen aufgenommen werden? Nein. Nur computergenerierte, künstliche Bilder sind bis auf die Änderung identisch.

4.2 Häufige Probleme

Reale Aufnahmen, die mit einer optischen Apparatur gemacht worden sind, zeigen immer Unterschiede. Diese Unterschiede können Sonnenstand, Helligkeit des Lichtes und atmosphärische Einflüsse sein.

4.2.1 Schatten

Bei großflächigen Aufnahmen kommt noch hinzu, dass es Schatteneffekte gibt, die einen störenden Einfluß haben, wenn die Bilder zu verschiedenen Tageszeiten oder Wetterbedingungen aufgenommen worden sind (s. Abb. 4.1).
Es kommt bei Vegetation und Gebäuden noch zu einem weiteren Effekt, der auch

auf Schatten zurückgeführt werden kann. Dieser Effekt wird BRDF[1] genannt. Schaut man sich z.B. ein Kiesdach an, so erscheint es hell, wenn die Sonne im Zenit steht. Steht die Sonne aber nicht im Zenit, so werfen die kleinen Steinchen Schatten und die Fläche erscheint dunkler. Da die Steinchen nicht aufgelöst werden können (zu große Bildpixel) kann dieser Effekt als BRDF-Effekt eingestuft werden [16].
Bei Vegetation tritt dieser Effekt noch stärker auf. Bei Waldgebieten können die Schatten aber teilweise erkannt werden.

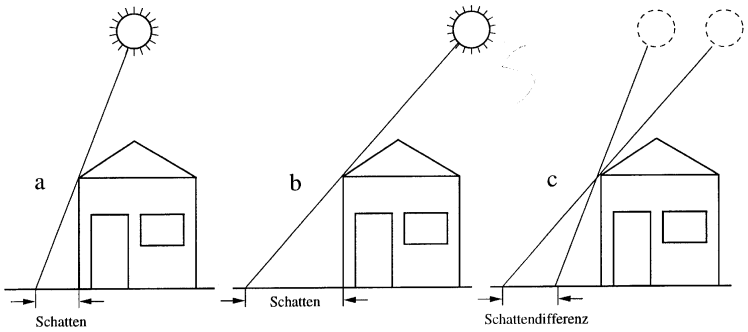


Abbildung 4.1: *Probleme mit Schatten. Schatten durch gleiche Sonnenstände erzeugt machen keine Probleme. Wenn die Sonne aber in beiden Aufnahmen, wie in a) und b) zu sehen ist steht, dann ergibt sich eine Schattendifferenz wie in c). Diese Differenz interpretiert der Algorithmus als Änderung.*

4.2.2 Stereoeffekt

Werden die Aufnahmen auch noch unter verschiedenen Beobachtungswinkeln aufgenommen, welche nicht zu weit auseinander liegen sollten, so kommt noch der Stereoeffekt dazu. Wie schon in Kap. 3.2.1 erwähnt, haben höhere Objekte (Gebäude, Bäume, etc) im Off-Nadir im Bild einen Versatz von bis zu einigen Pixeln. Ist der Versatz in beiden Bildausschnitten gleich, so macht das kein Problem bei der Änderungsdetektion. Kommt aber noch eine unterschiedliche Kameraposition hinzu, so ist der Versatz des Objektes unterschiedlich. Bei Pixeln von 3 bis 5 Meter Größe handelt es sich hier nur um 1 bis 2 Pixel Versatz. Bei feinerer Auflösung sieht das aber schon anders aus. Nun stellt sich die Frage, ob dieser Effekt irgendwie herausgerechnet werden kann. Theoretisch ist es kein großes Problem. Aus zwei Bildern, mit unterschiedlicher Aufnahmeposition können die Tiefeninformationen herausgerechnet werden. Dazu muß die Auflösung allerdings sehr fein sein.

4.3 Bilddaten als Spektren

Die Daten, mit denen hier Änderungsdetektion durchgeführt wird sind 10 Kanal-Bilder. Jedes Pixel wird durch einen Merkmalsvektor $\vec{x} = (x_0, ..., x_9)^t$ dargestellt.
Was bedeutet es, wenn sich ein Pixel grundlegend geändert hat? Es bedeutet, dass

[1] Bi-direktional Reflectance Distribution Funktion [16]

sich das Spektrum, als dass dieser Pixel interpretiert wird, sich geändert hat. Jedes Material hat ein anderes Spektrum. In Abb. 4.2 sind sechs typische Pixel-Spektren abgebildet. Probleme machen übersteuerte Sensorinformationen, wie z.B. von reflektierenden Metalldächern. Wasser dagegen liefert so gut wie keine Reflektanzwerte. Vegetation hat ein einmaliges markantes Spektrum. Im nahen Infrarot (Kanal 7) gibt es einen, im Verhältnis zu den übrigen Kanälen, starken Peak. Es ist also möglich an diesem Spektrum Vegetation zu erkennen und wenn notwendig auszublenden. Das geschieht mit dem Vegetationsindex NDVI.

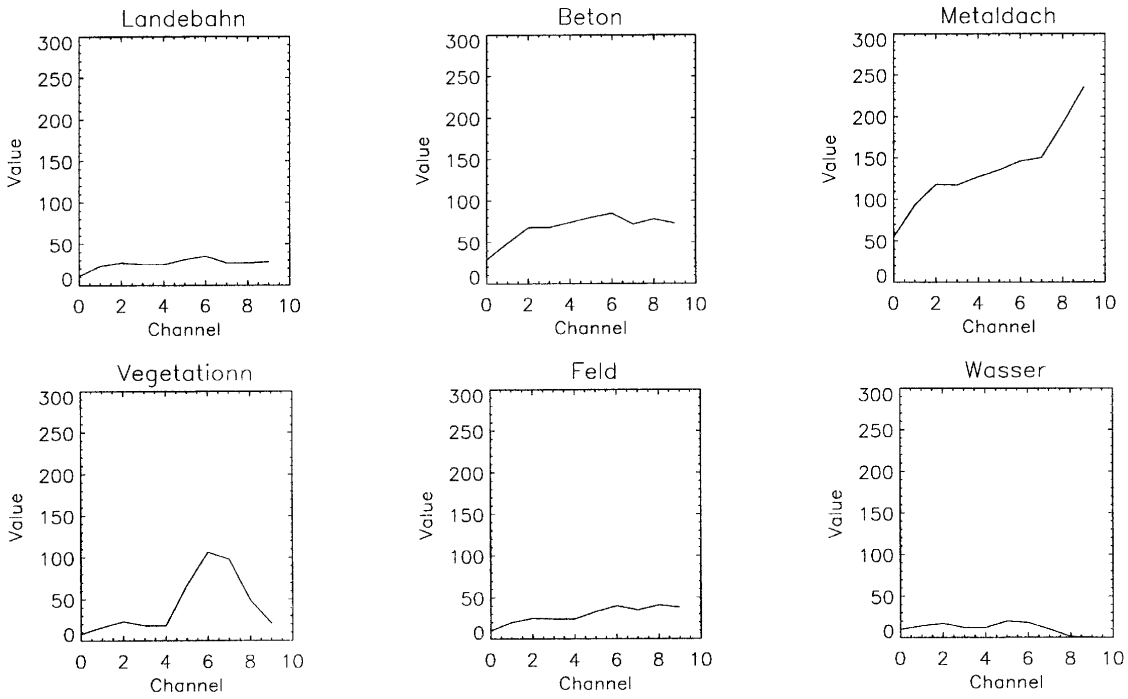


Abbildung 4.2: *Hier sind sechs häufige Pixelspektren dargestellt. Oben links ein Landebahnpixel. Daneben ein Betonpixel. Hier kann schon erkannt werden, dass es verschiedene Betonarten gibt. Rechts oben ist das Spektrum eines reflektierenden Metalldaches abgebildet. Man sieht die hohen Reflektionseigenschaften. Unten Links das markante Spektrum eines Vegetationspixels. Vegetation kann durch den Unterschied zwischen Kanal 3 (im Diagramm Channel 2) und Kanal 7 (Channel 6) eindeutig erkannt werden. In der Mitte unten ist ein Feldpixel abgebildet. Das Feld wird in diesem Fall nicht als Vegetation erkannt. Es handelt sich um ein umgepflügtes Feld. Wasser (unten rechts) hat ein sehr niedriges Reflektanzspektrum.*

4.3.1 Spektren mit geringer Signalhöhe

Wasser und Schatten haben niedrige Spektren[2] (s. Abb. 4.2 u.r.). Das wird oftmals zu einem Problem bei der Hauptachsentransformation. Da die Reflektanzen recht niedrig sind (sich im Merkmalsraum nahe des Koordinatenursprungs aufhalten) werden sie häufig als Änderung erkannt, da die Hauptachse meistens nicht durch den Koordinatenursprung läuft.

[2]Spektren mit niedriger Signalhöhe

4.4 Einfache Verfahren

In den nächsten Punkten werden verschiedene Verfahren für Bilder dargestellt, die unter fast den selben Bedingungen aufgenommen worden sind.

4.4.1 Differenzbildung

Wie oben schon erwähnt, funktioniert dieses Verfahren nur für Bilder, die mit nahezu den selben Bedingungen aufgenommen worden sind. Es wird immer eine Differenz geben, wenn beide Bilder voneinander abgezogen werden. Damit das kein Problem darstellt, kann ein Schwellwert eingeführt werden. Sämtliche Differenzwerte, die unterhalb der Schwelle liegen, werden verworfen. Dies führt zu einem allgemeinen Problem: Die Festlegung des Schwellwertes. Auf das Problem wird später näher eingegangen.

4.4.2 Quotientenbildung

Diese Methode bestimmt das Verhältnis der Grauwerte zweier Pixel und hat gegenüber der Differenzbildung einen großen Vorteil. Ob die Werte zwei und vier für die Differenzbildung benutzt werden oder 202 und 204; die Differenz ist immer die selbe. Das ist bei der Quotientenbildung nicht der Fall. Als einfache Formel könnte benutzt werden:

Wenn a=0, dann a=1,
Wenn b=0, dann b=1,
Wenn a>b, dann diff=1-b/a, sonst diff=1-a/b

So bekommt man immer Werte zwischen null und eins. Null bedeutet keine Änderung und eins bedeutet maximale Änderung. Um auf das obige Zahlenbeispiel zurückzukommen: Für zwei und vier bedeutet dies eine Differenz von 50%, während es bei 202 und 204 eine Differenz von 1% ist. Dieses Ergebnis ist akzeptabler, als dass der Differenzbildung. Nach diesem Schritt kann eine Schwelle gesetzt werden, die bestimmt, ab welchem Quotientenwert Änderung vorhanden ist.

4.4.3 Vor- und Nachteile

Die Vorteile liegen auf der Hand. Diese beiden Verfahren sind schnell und unkompliziert. Es ist aber kein unüberwachtes Verfahren. Es muß immer geschaut werden, wie das Endergebnis aussieht, und die Schwelle muß dann eventuell korrigiert werden. Das setzt voraus, daß ungefähr bekannt ist, wo die Änderungen liegen. Ein weiterer Nachteil ist, dass jedes Pixel, dessen Differenz oberhalb der Schwelle liegt, markiert wird. Haben diese Bilder einen ganz leichten Versatz von einem Pixel, so kommt es zu unakzeptablen Ergebnissen. Es wird keinerlei Nachbarschaft berücksichtigt.

4.5 Varianzbildung

Dieser Algorithmus basiert auf dem Prinzip der Quotienten-Bildung. Im ersten Schritt wird die Varianz der Grauwerte (s. Anhang E), innerhalb einer Umgebung um die Pixel herum, von beiden Bildern berechnet. Das bedeutet, dass ein Pixel, dessen Umgebungspixel ähnlich Werte haben, wie der Pixelwert, einen kleinen Wert zugewiesen bekommen. Unterscheiden sich die Werte der Umgebungspixel von dem Pixel, so wird ihm ein größerer Wert zugewiesen. Diese Berechnung findet für alle Pixel statt.
Die beiden Varianzbilder werden logarithmiert und voneinander abgezogen. Im vierten Schritt wird das Endergebnis auf den Offset korrigiert. Der Offset bestimmt sich aus dem Mittelwert aller Pixel des Ergebnisses der Subtraktion. Dies geschieht, damit die NoChange-Pixel bei 0 liegen und alle anderen Pixelwerte entweder positiv oder negativ sind. Durch eine anschließende Normierung stellen die Werte Einheiten der Standardabweichung dar.
Dieser Algorithmus ist in IDL von Rafael Wiemker implementiert und in ENVI eingefügt worden.

4.5.1 Parameter des benutzten Algorithmus

Fenstergröße : *ksize*

Fenstergröße der Umgebung um das Pixel mit der die Bilddaten gemittelt werden. Bei $ksize$=1 werden die Pixel ohne Umgebung betrachtet. Das kann bei einer Registrierenauigkeit von einem Pixel zu fatalen Folgen führen, da jeder Pixelversatz gefunden wird. Eine Fenstergröße von 11x11 ($ksize$=11) ist der Standardwert. Mit diesem Wert werden alle größeren Änderungen gefunden.

Minimale Varianzschwelle : *minvar*

Dieser Parameter ist eher experimenteller Natur. Er wird für die Logarithmierung benötigt. Der Logarithmus einer negativen Zahl ist nicht erlaubt. Deshalb wird der zu logarithmierende Wert, wenn er kleiner als diese Schwelle ist, auf den Schwellwert gesetzt.

4.5.2 Der Algorithmus

Die folgende Tabelle zeigt die einzelnen Schritte der Varianzmethode.

	Funktion	Formel	Kommentar
1)	Varianz von $bild_1$ und $bild_2$ mit der Fenstergröße $ksize$ für jedes Pixel kanalweise berechnen	$var(i,j)_n = \overline{bild(i,j)_n^2} - \overline{bild(i,j)_n}^2$	$\overline{x(i,j)}$ ist der Mittelwert der Pulshöhen in der Umgebung des Pixels (i,j) $bild_n$ ist eine Matrix mit den Pulshöhen der beiden Eingangsbilder n=1,2 steht für die Nummer des Bildes (i,j) sind die x- und y-Koordinate des Pixels
2)	Logarithmieren der Varianzbilder $bild_1$ und $bild_2$	$lnvar(i,j)_n = \ln(bild(i,j)_n) > minvar)$	$minvar$ ist ein Schwellwert, der dafür sorgt, das keine negativen Werte entstehen. Er ist auf 1.0 festgelegt.
3)	Das Changeimage berechnet sich aus der Differenz der Logarithmen	$changeimage(i,j) = lnvar(i,j)_1 - lnvar(i,j)_2$	$chim = Änderungsbild$
4)	Auf Offset korrigieren	$chim = chim - median(chim)$	median sucht den mittleren Wert einer Folge. Bsp: 2,3,25,7,9 $\rightarrow$ 7
5)	Auf RMS normieren, um Ergebnis in Einheiten von σ zu erhalten	$chim = \frac{chim}{\sqrt{\sum chim^2}}$	σ=Standardabweichung

4.5.3 Ein Beispiel

Ein einfaches Beispiel mit zwei schwarz-weiß Bildern. Es handelt sich hier um 8x8-Bilder aus einsen und nullen. Fenstergröße ist 3x3, d.h. in einer 3x3-Umgebung um das Pixel herum wird der Helligkeitswert gemittelt. Den Schwellwert $minvar$ wurde auf 0.02 gesetzt, damit die relevanten Varianzwerte nicht verändert werden.

Abbildung 4.3: *Zwei 8x8 Bilder. Schwarz steht für den Wert 0 und weiss für den Wert 1*

Abbildung 4.4: *Die Varianzergebnisse der beiden Beispielbilder. Hier steht schwarz wieder für den Wert 0 und weiss für einen Wert von* $\approx$ *0.25*

Abbildung 4.5: *Die logarithmierten Varianzen. Schwarz steht für einen Wert von* $\approx$ *-3.91 und weiss für einen Wert von* $\approx$ *-1.40*

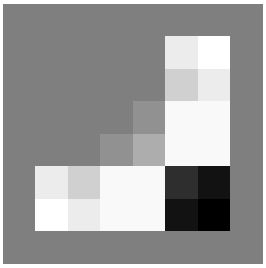


Abbildung 4.6: *Endergebnis nach Differenzbildung und Normierung*

4.5.4 Ein weiteres Beispiel

Das vorige Beispiel wurde so gewählt, dass anhand zweier kleiner Bilder der Algorithmus nachvollzogen werden kann. Um einen besser Eindruck von dem Algorithmus zu bekommen wurde, das selbe Beispiel mit einer Auflösung von 32x32 Pixeln durchgeführt.

Abbildung 4.7: *Zwei 32x32 Bilder. Schwarz steht für den Wert 0 und weiss für den Wert 1*

Abbildung 4.8: *Varianzen der Bespielbilder*

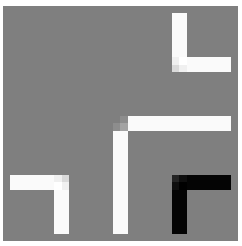


Abbildung 4.9: *Endergebnis für die 32x32-Bilder.*

Wie an dem Endergebnis zu sehen ist, handelt es sich bei dem *Varianzmethode* um einen richtungsunabhängigen Kantendetektor, der nur die Kante einer Fläche findet, die sich in einem Bild verändert hat.

4.5.5 Vor- und Nachteile

Ein Vorteil ist, dass dieser Algorithmus unempfindlich gegen einen Skalierungsfaktor der Bildintensitäten ist. Feine Änderung findet das Verfahren sehr gut. Großflächige Änderung bereiten dem Algorithmus Schwierigkeiten. Wie an dem zweiten Beispiel zu sehen ist, ist dieser Algorithmus ein richtungsunabhängiger Kantendetektor.
Dieser Algorithmus empfiehlt sich für große Flugstreifen, in denen sehr viel Vegetation ist. Die Erklärung hierfür kommt im Abschnitt der Hauptachsentransformation.

4.6 Hauptachsentransformation (HAT)

Bei ungenügender Atmosphärenkorrektur stellen atmosphärische Effekte in den Bildern ein Problem dar. Diese Effekte sind Verluste durch atmosphärische Absorbtion und Streulicht (Luftlicht, Himmelslicht). Das bedeutet dass ein Pixel, das sich in Wirklichkeit nicht geändert hat, in beiden Bildern unterschiedliche Grauwerte annehmen kann. Ein einfaches pixelvergleichendes Änderungsdetektionsverfahren würde diese Pixel als Änderung finden.
Eine andere Methode ist die Hauptachsentransformation. Hierbei bilden die Pulshöhen der einzelnen Bildpixel der beiden Bilder jeweils pro Kanal einen bitemporalen Merkmalsraum mit den Punkten $[x_i(t1), x_i(t2)]^t$ auf, wobei i die Nummer des Kanals ist. Die nichtgeänderten Pixel liegen dabei entlang einer Hauptachse, der ersten Hauptachse (pc1). Durch die bereits erwähnten Einflüsse geht diese Hauptachse weder durch den Ursprung noch hat sie die Steigung 1 (s. Abb. 4.10). Hauptachse. Der Abstandsvektor liegt parallel zur zweiten Hauptachse (pc2). Die Drehung und der Nullpunktsversatz berechnet sich mit

$$c'_i(\mathbf{x_i}) = g_{1,i}\,(x_i(t_1) - m_{i,1}) + g_{2,i}\,(x_i(t_2) - m_{i,2}) \tag{4.1}$$

mit

$$\mathbf{g_i} = [g_{1,i}, g_{2,i}]^t \tag{4.2}$$

(dem 2. Eigenvektor) und

$$\mathbf{m_i} = [m_{1,i}, m_{2,i}]^t \tag{4.3}$$

den Mittelwerten von $x_i(t_1)$ und $x_i(t_2)$.
Der zweite Eigenvektor wird aus der Kovarianzmatrix

$$\mathbf{C}_i = \frac{1}{n}\sum_x (\mathbf{x_i} - \mathbf{m_i})(\mathbf{x_i} - \mathbf{m_i})^t \tag{4.4}$$

(2x2 Matrix) des i-ten Bandes bestimmt.
Um zu verhindern, dass die Änderungspixel die Schätzung der ersten Hauptachse verzerren, werden alle Pixel nach der Wahrscheinlichkeit ihrer Änderung gewichtet. Diese Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Abstand zur aktuellen NoChange-Achse. Die Iteration konvergiert bei vernünftigen Szenen schon nach wenigen Schritten. Nach diesen Schritten liegt für jedes Pixel ein Änderungsvektor vor, der die positive oder negative Abweichung von der NoChange-Achse angibt. Der Änderungsvektor liegt parallel zur zweiten Hauptachse (pc2). Seine Länge ist in Einheiten der Standardabweichung σ angegeben.

4.6.1 Die Gewichtung

Jedes Pixel wird einer von 2 Klassen zugeordnet, einer Change- oder NoChange-Klasse. Die Entscheidung wird durch die Bayesregeln getroffen, welche den Fehler minimieren. Die *a priori* Wahrscheinlichkeit $P(\omega)$ für die Klasse ω ist proportional zu N_ω/N_{tot}, wobei $N_{tot} = \sum_\omega N_\omega$ die totale Anzahl von Pixeln ist und N_ω die Summe aller Wahrscheinlichkeiten der Klasse ω für alle Pixel ist $N_\omega = \sum P(\omega \mid x)$. Die

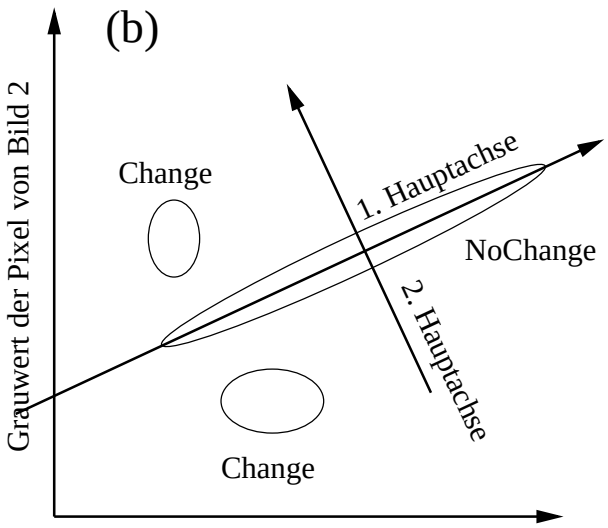


Abbildung 4.10: *Der Realfall der Hauptachsentranformation. Atmosphärische- und Sensoreigenschaften machen sich in der verschobenen und der von der Winkelhalbierenden abweichenden Hauptachse bemerkbar.*

normierte bedingte Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus:

$$p_i(\mathbf{x}_i \mid \omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2_{\omega,i}}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\frac{c_i(\mathbf{x}_i)}{\sigma^2_{\omega,i}}} \tag{4.5}$$

mit dem Abstand des Pixels von der NoChange-Achse c_i und

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_i dc_i = 1. \tag{4.6}$$

Die *a postpriori* Wahrscheinlichkeit $P(\omega \mid \mathbf{x})$ ergibt sich aus dem Produkt der *a priori* Wahrscheinlichkeit und den spektralen und räumlichen Wahrscheinlichkeiten. Mit $\sum_\omega = P(\omega \mid \mathbf{x}) = 1$ ergibt sich folgende *a postpriori* Wahrscheinlichkeit:

$$P(\omega \mid \mathbf{x}) = \frac{N_\omega/N \cdot p_{con}(\mathbf{x} \mid \omega) \cdot \Pi_i p_i(\mathbf{x_i} \mid \omega)}{\sum_\omega [N_\omega/N \cdot p_{con}(\mathbf{x} \mid \omega) \cdot \Pi_i p_i(\mathbf{x_i} \mid \omega)]} \tag{4.7}$$

p_{con} wird die Markov'sche Wahrscheinlichkeit genannt. Sie gibt die Klassenzugehörigkeitswahrscheinlichkeit eines Pixels zur Klasse ω in Bezug auf die benachbarten Pixel an. Es wird eine $k \times k$-Fensterumgebung um das Pixel herum betrachtet. Mit einer Potentialfunktion $U(\mathbf{x} \mid \omega)$ wird die Gewichtung der umgebenden Pixel angegeben.

Mit einem Parameter β kann die Größe des Einflusses der Umgebung bestimmt werden. Mit der Nachbarschaftspixelmenge $\mathcal{N}(x)$ ergibt sich für p_{con}:

$$p_{con}(\mathbf{x} \mid \omega) = \frac{1}{Z} \cdot e^{-\beta U(\mathbf{x}|\omega)} \qquad \text{mit} \qquad U(\mathbf{x} \mid \omega) = \sum_{\mathbf{x}' \in \mathcal{N}(x)} [1 - P(\omega \mid \mathbf{x}')]. \quad (4.8)$$

4.6.2 Die Parameter des benutzten Algorithmus

max number of PC iterations : *maxiter*

Die Anzahl der Iterationen, die maximal bei der Suche nach der optimalen Hauptachse durchlaufen werden können. Mehr Iterationsschritte haben wenig Sinn, da sich die Hauptachse schnell stabilisiert. Der Standardwert beträgt fünf. Oftmals wird die Hauptachse auch schon nach weniger als fünf Schritten gefunden.

neightborhood window size (1,3,5,...) : *ksize*

Die Fenstergröße mit der die Pixelwerte innerhalb einer Umgebung gemittelt werden. Mit *ksize*=1 werden die Pixel ohne Umgebung betrachtet, was bei einer Registriergenauigkeit von einem Pixel zu fatalen Folgen führen kann, da jeder Pixelversatz gefunden wird. *ksize*=3 ist daher der Standardwert. Möchte man aber keine so genaue Auflösung haben, sondern nur wissen, wo in einer großen Fläche Änderung ist, kann der Parameter auch höher gesetzt werden.

normalize by local variance : *normalize*

Durch die Registrierung und einen Pixelversatz von einem Pixel kann es bei Aufnahmen mit einer Pixelgröße von einigen Meter zu einem Versatz (im Bildmaterial) von einigen Metern kommen. Sind in diesen Bildern Bereiche, die eine feine Textur haben, so würde durch diesen Pixelversatz die ganze Fläche detektiert werden. Werden die Bildpixel durch die lokale Varianz geteilt[3], so entstehen folgende vier Fälle:

Differenz der Grauwerte	mittlere lokale Varianz	Änderungswahrscheinlichkeit
klein	klein	klein
klein	groß	klein
groß	klein	groß
groß	groß	groß

[3]Es wird durch die Wurzel aus der Summe beider Varianzen geteilt. Im weiteren wird diese mittlere lokale Varianz lokale Varianz genannt.

Minimum Variance Threshold (>0) : *minval*

Im Varianzbild (Wahrscheinlichkeitsbild) werden alle Werte die unterhalb dieser Schwelle liegen auf den Schwellwert gesetzt. Da aus den Varianzwerten mit einem weiteren Programm die Änderungswahrscheinlichkeiten errechnet werden, nimmt die Menge der gefundenen Änderungen zu, je weiter diese Schwelle erhöht wird. Aber inwiefern dieser Parameter Sinn macht ist fraglich, da er eigentlich nur die Aufgabe hat, die Varianzwerte auf einen Wert größer null zu setzen, da das Programm sonst mit einem mathematischen Fehler abbricht.

4.6.3 Schritte des Algorithmus

	Funktion	Formel	Kommentar
1)	Initialisierung	$cov = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$	Bilddaten werden von der Matrixform in einen Vektor umgeformt $image(x,y) \rightarrow image(x \cdot y)$
2)	Alte Kovarianzmatrix merken	$oldcov = cov$	Wird für späteren Vergleich benötigt
3)	Mittelwert des Bildes unter Berücksichtigung der Gewichte aller Bildpixel kanalweise bestimmen.	$mean_n = \frac{\sum image(i)_n \cdot weight(i)}{\sum weight(i)}$	Die Gewichte sämtlicher Pixel werden am Anfang auf 1 gesetzt n steht für die Nummer des Bildes i ist der Index des Pixels
4)	Grauwertspektrum durch pixelweises subtrahieren des Mittelwertes von den Bildpixeln erzeugen	$spectra(i)_n = image(i)_n - mean_n$	
5)	Spektrum gewichten	$wspectra(i)_n = spectra(i)_n \cdot weight(i)$	
6)	Kovarianzmatrix bilden	$cov = spectra(i)_n \cdot wspectra(i)_n$	Die Kovarianzmatrix ist eine 2x2-Matrix
7)	Eigenvektoren der Kovarianzmatrix für beide Hauptachsen ermitteln		

	Funktion	Formel	Kommentar
8)	Spektrum nach 2. Hauptachse transformieren (drehen, verschieben)	$pc_2(i) = spectra(i)_n \cdot ev_2$	$pc_2(i)$ ist das Wahrscheinlichkeitsbild ev_2 ist der 2. Eigenvektor
9)	Mittlere lokale Varianz ermitteln	$locvar = \sqrt{\lvert\overline{x_1^2} - \overline{x_1}^2\rvert + \lvert\overline{x_2^2} - \overline{x_2}^2\rvert}$	Werte die kleiner als $minvar$ sind auf $minvar$ setzen Die lokale Umgebung wird mit $ksize$ festgelegt $locvar = locvar > minvar$ $x_n = spectra_n$
10)	pc_2 auf lokale Varianz normieren	$pc_2 = \frac{pc_2}{locvar}$	genauere Beschreibung im Parameterteil Schritt 9) und 10) können durch Abschalten der Normierung auf lokale Varianz übersprungen werden
11)	pc_2 mit $ksize$ glätten		
12)	Neue Gewichtung bestimmen	$newweight(i) = \frac{e^{-\frac{pc_2(i)^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}}$	Neue Gewichte sind kleiner als 1 Siehe Text *Die Gewichtung* Je größer der Abstand von der NoChange-Achse ist, um so kleiner wird das Gewicht des Pixels gesetzt.
13)	Änderungswahrscheinlichkeit neu bestimmen	$pc_2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sum pc_2 \cdot weight}{\sum weight}}} \cdot newweight$ $weight = newweight$	
14)	Abbruchbedingung testen	wenn $\max(\frac{cov - oldcov}{cov}) > 0.1$ oder wenn die Anzahl der Iterationen gleich der maximalen Anzahl der Iterationen ist dann zu 1)	Berechnung erfolgt komponentenweise
14)	Das Endergebnis steht in $pc2$		Die Werte beinhalten die Abstände der Pixel von der ersten Hauptachse in Einheiten von Standardabweichungen σ

Das Endergebnis, welches in $pc2$ steht, ist eine Matrix mit Fließkommazahlen. Die Pixel, die sich nicht geändert haben, liegen bei null. Je weiter der Wert von null

abweicht, um so wahrscheinlicher ist es, dass an dieser Stelle im Bild Änderung ist. Eine einfache Art das Ergebnis auszuwerten ist alle Werte zu quadrieren und einen Schwellwert anzugeben. Alle Werte, die über dieser Schwelle liegen, sind Änderung und alles darunter keine Änderung. Für einen Kanal ist das sehr einfach zu realisieren. Wir arbeiten aber mit Multispektralbildern, welche mehrere Bilder (Kanäle) beinhalten. Wie solche mehrere Änderungswahrscheinlichkeitsbilder ausgewertet werden können, wird in Kap. 4.9 erklärt.

4.7 Wenn zuviel Änderung

Die 1. Hauptachse wird aus allen Pixeln eines Kanals bestimmt. Eine Voraussetzung für akzeptable Ergebnisse ist eine nicht zu große Änderung in den Bildern. Doch was passiert, wenn dieser Fall nicht gegeben ist. Ein großes Problem ist die Vegetation. Werden zwei Bilder miteinander verglichen, die zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommen worden sind, so wird die Vegetation unterschiedlich sein. Bei solchen Bildern kann es schnell passieren, das durch die Vegetation mehr Änderung im Bild vorhanden ist, als der Algorithmus vertragen kann. Die 1. Hauptachse kommt nicht durch die NoChange-Pixel zu liegen, sondern durch die Change-Pixel. Das hat zur Folge, dass alle nichtgeänderten Pixel als Änderung angezeigt werden und umgekehrt. Einer Invertierung kommt dies aber nicht gleich, da in dem Bereich, in dem sich die richtige 1. Hauptachse und die falsch gefundene 1. Hauptachse schneiden, die Klassifizierung richtig ist.

4.7.1 Niedrige Spektren

Wasser und Schatten haben Spektren mit sehr niedrigen Grauwerten (s. Abb. 4.2). Das wird oftmals zu einem Problem bei der Hauptachsentransformation. Da die Reflektanzen recht niedrig sind (sich im Merkmalsraum nahe des Koordinatenursprungs aufhalten) werden sie häufig als Änderung erkannt. Die 1. Hauptachse verläuft meistens nicht durch den Koordinatenursprung.

4.8 Groundtruthkarte

Die Änderungsdetektionsprogramme erzeugen eine Menge an Bildmaterial, welches ausgewertet werden muß. Um überhaupt erstmal etwas über die Ergebnisbilder sagen zu können, wird eine Karte benötigt, in der die tatsächlichen Änderungen eingezeichnet werden. So eine Karte wird *Groundtruthkarte* genannt.
Eine solche Karte wird manuell erstellt. Als Referenzmaterial wurden die als digitale Bilddaten vorliegenden Multispektralbilder verwendet und die dortigen Spektren mit CIR-Fotos verglichen, welche parallel zu den Scanneraufnahmen erstellt worden sind.
An dieser Stelle stellt sich der Anwender die Frage, was er als Änderung ansieht und was nicht. Ich habe mich hauptsächlich auf künstliche Veränderungen beschränkt,

wie Gebäude, Felder und Autos. Vegetation ist allgemein schwer als Änderung oder Nicht-Änderung zu klassifizieren, wegen starker Variabilität ein und der selben Fläche (z.B. Rasen). Außerdem spielen Wetterbedingungen, Jahreszeit, Ort und Intensität der Nutzung eine Rolle.
Große Änderungen in der Vegetation habe ich aber trotzdem mit aufgenommen.

4.9 Auswertungsmethode

Nachdem die Endergebnisse mit allen Algorithmen bearbeitet worden sind, sind Schwarz-Weiss-Bilder entstanden, die die einfachste Form einer klassifizierten Karte darstellen. Es gibt nur zwei Klassen; eine Change- und eine NoChange-Klasse.
Die Groundtruthkarte ist genauso eine Karte, nur mit dem Unterschied, dass diese Karte von Hand erstellt worden ist.
Um eine Bewertung der computergestützten Änderungsdetektion in einem sinnvollen Rahmen durchführen zu können, kann man sich anschauen, wie gut das vom Computeralgorithmus gelieferte Änderungsbild und die Groundtruthkarte übereinstimmen. Wieviele NoChange-Pixel sind in beiden Bildern identisch, wieviele Change-Pixel und wieviele Fehlklassifikationen gibt es? Für diese Frage empiehlt sich der Kappawert [4],[14], der eine Aussage über die Klassifikationsergebnisse gibt. Es ist ein allgemeines Bewertungsverfahren für klassifizierte Daten.

4.9.1 Konfusionsmatrix

Diese Informationen können in einer Matrix dargestellt werden. Diese Matrix wird Konfusionsmatrix genannt. Hier ein Beispiel:

	a	b	$\sum_Z$
a	36	5	41
b	10	48	58
$\sum_S$	46	53	99

Beispiel für eine Konfusionsmatrix mit zwei Klassen. 36 Pixel sind richtig mit der Klasse **a** *klassifiziert worden und 48 der Klasse* **b**. *5 Pixel* **b**-*Pixel sind als* **a**-*Pixel falsch klassifiziert worden und 10* **a**-*Pixel als* **b**-*Pixel. Insgesamt gibt es 99 Pixel.*

Aus dieser Matrix können verschiedene Informationen extrahiert werden. Es kann beispielsweise bestimmt werden, mit welcher Genauigkeit ein Pixel richtig klassifiziert worden ist. Dies wird erreicht, indem das entsprechende Diagonalelement durch die Spaltensumme geteilt wird. Dieser Zahlenwert wird als *Wiedererkennungsgenauigkeit* G_W (producer accuracy) bezeichnet. Wird stattdessen durch die Zeilensumme geteilt, so erhält man die prozentuale Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein bestimmtes Pixel, das bei der Klassifizierung der entsprechenden Klasse zugewiesen wurde, dieser auch tatsächlich angehört. Dieser Wert wird als *Zuweisungsgenauigkeit* G_Z (user accuracy) bezeichnet. Summiert man die Diagonalelemente der Matrix, so erhält man die *Gesamtgenauigkeit* G_G (overall accuracy).

	GW	GZ	
A	78.2%	87.8%	GG=84.8%
B	90.2%	82.6%	

Kappa-Wert %	Qualität
< 0.0	Sehr schlecht
0 bis 20	Schlecht
20 bis 40	Akzeptabel
40 bis 60	Gut
60 bis 80	Sehr gut
80 bis 100	Ausgezeichnet

Tabelle 4.1: *Kappawert zum besseren Verständnis in Worte ausgedrückt*

4.9.2 Kappa-Wert

Die Informationen, die aus der Konfusionsmatrix herausgeholt werden können, sind zwar schon aufschlußreich, aber es wäre besser, einen einzigen Zahlenwert zu haben, der aussagt, ob die Klassifikation gut oder weniger gut ist. Dieser Zahlenwert, der nach vielen Versuchen die Konfusionsmatrix auszuwerten, entstanden ist, wird Kappa-Wert genannt. Er wurde 1983 von Congalton & Mead eingeführt [4].
Der Kappa-Wert berechnet sich aus allen Elementen der Konfusionsmatrix K und nicht nur aus den Elementen der Diagonalen. Der Kappa-Wert wird wie folgt berechnet:

$$\kappa = \frac{p_0 - p_z}{1 - p_z} \tag{4.9}$$

$$\text{mit} \qquad p_0 = \sum_i \frac{Ki,i}{N} \quad \text{und} \quad p_z = \sum_i \left(\sum_j \frac{Ki,j}{N} \cdot \sum_j \frac{Kj,i}{N} \right) \tag{4.10}$$

N steht für die Gesamtzahl aller Pixel und Ki,j für das Element in der Konfusionsmatrix, das sich in der i-ten Spalte und der j-ten Zeile befindet. p_0 ist äquivalent zur Gesamtgenauigkeit G_G. p_z steht für die Anzahl der Pixel, die zufällig richtig klassifiziert worden sind.
Tritt der Fall der 100% richtigen Klassifikation ein, so ist der Kappa-Wert eins. Normal schwankt der Wert zwischen null und eins. Nimmt er den Wert null an, so bedeutet dies, dass das Ergebnis von der Güte her einer zufälligen Auswahl gleich kommt. Er kann aber auch negative Werte annehmen. Das bedeutet, dass das Ergebnis schlechter als zufällig ist.
Für das Zahlenbeispiel in dem vorigen Kapitel ist der Kappa-Wert: 0.69
Der Kappa-Wert kann mit Tabelle Tab. 4.1 auch mit einem Wort beschrieben werden.

4.10 Darstellung der Änderungsergebnisse

Das Ergebnis der Änderungsdetektion mit der Hauptachsenransformation liefert pro Kanal je eine Matrix, in der die relativen Abstände der Pulshöhen (Grauwerte) aller Pixel von der ersten Hauptachse enthalten sind. Mit einem geübten Blick kann an dieser Matrix starke Änderung von weniger starker Änderung unterschieden werden. Es ist aber angenehmer, einen weiteren Algorithmus zu besitzen, der eine Binärkarte erstellt, in der jede größere Änderung markiert ist.
Um ein solches Binärbild zu erstellen, muß ein Schwellwert bestimmt werden, welcher Änderung von Nichtänderung trennt. Dieser Schwellwert soll automatisch ermittelt werden.
In diesem Abschnitt werden verschiedene Verfahren vorgestellt, die verwendet werden können. U.a. wird der Algorithmus von Rafael Wiemker erklärt, welcher nach dem Prinzip der Maximum-Likelihood-Klassifizierung arbeitet.
Da mit multispektralen Bildern gearbeitet wird und deshalb auf jeden Kanal der entsprechende Algorithmus einzeln angewendet wird, entstehen genauso viele Bilder mit Änderungswahrscheinlichkeiten wie Kanäle. Die N Bilder müssen vereinigt werden, damit am Ende ein Bild entsteht, welches alle Informationen aus allen Bildern trägt. In allen folgenden Methoden werden die Pixel der einzelnen Änderungsergebnisbilder zu einem 10-dimensionalen Vektor zusammengefaßt.

$$Pixelvektor(i,j) = \{bild(i,j)_0, ..., bild(i,j)_9\} \quad , \quad (i,j) = \text{x-y-Koordinate des Pixels}$$

Dieser Vektor wird Merkmalsvektor genannt Von einem Vektor kann die euklidische Länge bestimmt werden. Diese Länge wird Längenvektor genannt.

4.10.1 Betragsbildung

Eine einfache und schnelle Methode ist, von den Längenvektoren das Betragsquadrat zu bilden. Auf diese Art werden alle negativen Werte entfernt. Größere Änderungen treten so auch stärker hervor, als wenn nur einfach der Betrag der Längenvektoren genommen wird. Wird ein solches Ergebnis dargestellt, so kann an ihm schon erkannt werden, was Change ist und was NoChange ist. Trotzdem muß der Benutzer die ganze Szene anschauen und die Graustufenwerte selber bewerten.

4.10.2 Schwellwertbildung

Normalerweise muß der Benutzer selbst eine Schwelle setzen, mit der er entscheidet, welche Pixel als NoChange- und welche als Changepixel gesetzt werden sollen. Die Schwelle kann automatisch bestimmt werden. Im folgenden werden einige mögliche Verfahren beschrieben.

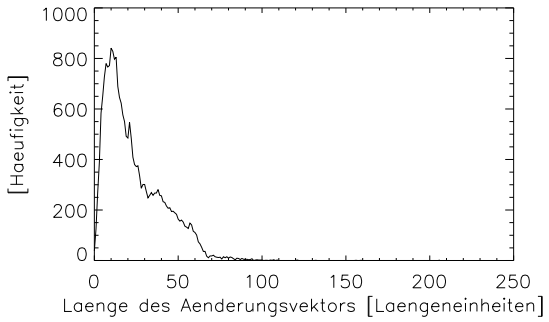


Abbildung 4.11: *Beispiel für die Häufigkeit der Längen der Änderungsvektoren*

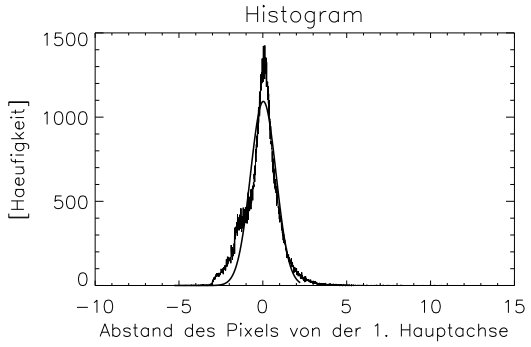


Abbildung 4.12: *Anfittung eines Gauß an das Histogramm. Die angefittete Gaußkurve ist als eine dickere Kurve dargestellt. Die Standardabweichung σ beträgt in diesem Beispiel 0.76 Standardabweichungen.*

4.11 Methode für unüberwachte Schwellwertbestimmung

- **Schwerpunkt aus Histogramm**
  Wird aus den Längenvektoren ein Histogramm gebildet und trägt somit die Häufigkeit der Vektorlängen gegen die Längen auf, so erhält man beispielsweise einen Kurvenverlauf, wie er in Abb. 4.11 dargestellt ist. Dieses Histogramm ist ein Plot des Ergebnisses der Hauptachsentransformation.
  Die Fläche, die diese Kurve beschreibt, hat einen Schwerpunkt. Dieser Schwerpunkt kann als Schwelle benutzt werden. Sinnvoll ist es, wenn hier noch zusätzlich ein Skalierungsfaktor angegeben wird, der den Schwellwert skaliert.

- **Anfittung an eine Gaußkurve**
  Das vorige Verfahren ist weniger mathematisch, sondern mehr ein rein experimenteller Ansatz, der auch zu entsprechenden Ergebnissen führt. Hier muß nur geschaut werden, ob der Skalierungswert auch gut ist. Ein mehr mathematischer Ansatz ist die Standardabweichung σ und entsprechend ein Vielfaches davon. Die Standardabweichung bekommt man durch ein Anfitten einer Gaußkurve an das Histogramm der Abstände der Bildpixel von der 1. Hauptachse (s. Abb. 4.12). Diese Methode ist ein Schritt zu einer unüberwachten Methode.

- **Medianfilter** Zur Schwellwertbestimmung kann auch der Medianfilter benutzt werden [11]. Der Medianfilter ist ein nichtlinearer Filter. Es werden alle Werte auf- bzw sortiert absteigend. Danach wird der Wert der im mittleren Feld des Datensatzes steht, genommen.
  Eine monoton ansteigende Rampe bleibt ebenso unverändert wie die Kante zwischen zwei Bereichen konstanter Grauwerte. Dafür werden einzelne *Ausreißer* eliminiert, ohne dass dies die Nachbarpixel wesentlich verfälscht.

4.11.1 Die Parameter

Fenstergröße: *ksize*

Mit *ksize* wird die Fenstergröße angegeben, über die gemittelt wird. Mit $ksize = 1$ werden die Daten, ohne gemittelt zu werden, zur Auswertung benutzt. Der Standardwert ist 3.

Skalierung: *scale*

Dieser Parameter wird mit dem Schwellwert multipliziert. In Bildern, in denen wenig Änderung vorhanden ist, muß der Parameter höher gesetzt werden. In Bildern mit viel Änderung niedriger. Der Standardwert ist 2.

4.11.2 Algorithmen der Methoden

Das Endergebnis ist ein Binärbild, in dem alle geänderten Pixel mit einem Wert ungleich null gesetzt sind und alle nichtgeänderten Pixel mit null.
Auf Binärbilder kann dieser Algorithmus nicht angewendet werden, da auf Binärbildern weder eine Histogrammfunktion, bzw. ein Gaußfit, noch ein Medianfilter angewendet werden kann. Es macht auch überhaupt keinen Sinn, für Binärbilder einen der bereits erklärten Änderungsdetektionsverfahren anzuwenden. Hier sollte einfach nur die Differenz genommen werden.
In den folgenden drei Tabellen werden die verschiedenen Methoden im einzelnen erklärt.

Schritt 1:

	Funktion	Formel	Kommentar
1)	mit Fenstergröße *ksize* glätten		Je nach Auflösungsgrad

Schwerpunkt aus Histogramm

	Funktion	Formel	Kommentar
2)	Vektorlängen der N-dimensionalen Abstandsvektoren der Pixel von der 1. Hauptachse bestimmen	$len(i,j) = \sqrt{\sum_{k=0}^{n} chim(i,j)_k^2}$	$chim$ = Ergebnisbild der Änderungsdetektion i, j = x und y-Koordinaten k = Nummer des Kanals

	Funktion	Formel	Kommentar
3)	Histogramm der Längen erstellen		x-Achse: Länge y-Achse: Häufigkeit
4)	Schwerpunkt der Fläche bestimmen	$threshold = \frac{\sum_{i=0}^{n}(i+1)y_i}{\sum_{i}^{n} y_i}$	

Anfittung an eine Gaußkurve

	Funktion	Formel	Kommentar
2)	Histogram der Abstände der Bildpixel von der 1. Hauptachse bestimmen		x-Achse: Abstand y-Achse: Häufigkeit
3)	Schwellwert durch Bestimmung eines Gaußfits des Histogramms der Abstände bestimmen	$threshold = \sigma$	

Medianfilter

	Funktion	Formel	Kommentar
2)	Vektorlänge bestimmen	$len(i,j) = \sqrt{\sum_{k=0}^{n} chim(i,j)_k^2}$	$chim$ = Ergebnis der Änderungsdetektion i, j = x und y-Koordinaten k = Nummer des Kanals
3)	Histogramm der Längen erstellen		x-Achse: Länge y-Achse: Häufigkeit
4)	Schwellwert durch Median aller Längenvektoren bestimmen	aufsteigend sortieren $threshold$ = mittlerer Wert	

Abschließende Schritte

	Funktion	Formel	Kommentar
5)	Schwellwert mit *scale* multiplizieren	$threshold = threshold \cdot scale$	
6)	Alle Pixel, deren Vektorlänge größer als der Schwellwertvektor sind, werden als Änderungspixel markiert		

4.12 Wahrscheinlichkeitsbild

Im vorigen Kapitel wurde ein einfaches Verfahren beschrieben, mit dem das Endergebnis der Änderungsdetektion ausgewertet werden kann. Die Schwelle, die dort bestimmt wird hängt allerdings von den Bilddaten ab. Um die Änderungswerte stattdessen in allgemeinere Änderungswahrscheinlichkeiten umzurechnen kann das *Maximum-Likelihood*-Verfahren angewendet werden. Auch hier werden von den N Änderungswahrscheinlichkeitsbildern die Längen der Abstände von der 1. Hauptachse bestimmt und als Merkmal verwendet.

4.12.1 Maximum Likelihood

Es werden zwei Klassen ω betrachtet, eine Change- und eine NoChange-Klasse (ω={Ch,Nc}). Beide Klassen werden um den Mittelpunkt c_i als gaußverteilt angenommen. Die NoChange-Klasse hat eine kleine Varianz, die der Meßgenauigkeit entspricht und die Change-Klasse eine große Varianz, welche sich als breiter Untergrund bemerkbar macht.
Normalerweise bilden sich drei Bereiche aus. Ein NoChange-Bereich, der sich um den Nullpunkt verteilt, und links und rechts von der Null-Linie jeweils ein Change-Bereich. Die Changebereiche sind jedoch sehr breit gestreut, so dass es einfacher ist eine einzige Gaußkurve hierfür anzunehmen. Bei einer Change-Gaußkurve, die um den Nullpunkt herum liegt, braucht nur ein Parameter, die Standardabweichung, geschätzt werden, während bei zwei Change-Gaußkurven beide Mittelpunkte und beide Standardabweichungen, also vier Parameter geschätzt werden müssen. Zum Zweiten ist die Wahrscheinlichkeit im Nullpunkt nicht unbedingt null. In dem einem Kanal kann z.B. die Änderungswahrscheinlichkeit null sein, während in den anderen Kanälen eine Änderungswahrscheinlichkeit größer null vorhanden sein kann. Also

darf die Annahme, dass im Nullpunkt keine Änderung ist, nicht null sein.
Die Trennung zwischen Change und NoChange sind die Schnittpunkte beider Gaußkurven (s. Abb. 4.13).

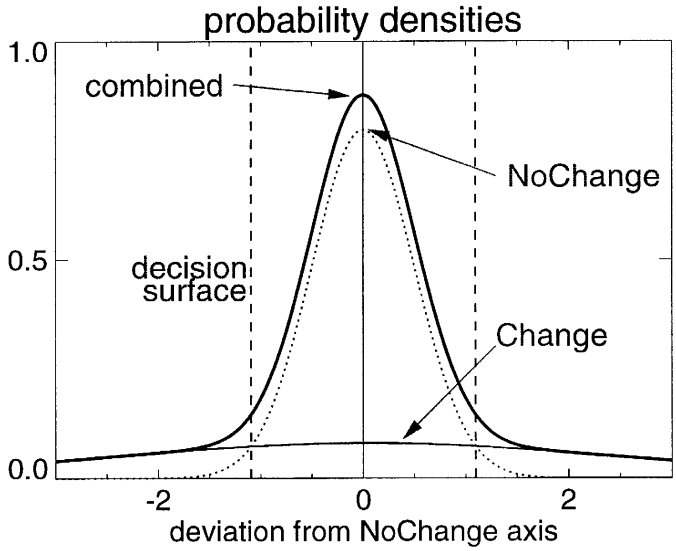


Abbildung 4.13: *Bestimmung der Schwelle. Der Schnittpunkt beider Gaußkurven ist die Schwelle [26].*

Die aus den Daten abgeschätzten Wahrscheinlichkeiten $p(\mathbf{x} \mid \omega)$ für beide Klassen, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass Change oder NoChange aufgetreten ist, ergeben sich aus:

$$p(\mathbf{x} \mid \omega) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \det \mid\mid \sum_\omega \mid\mid}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\mathbf{x}^t \sum_\omega^{-1} \mathbf{x}} \tag{4.11}$$

Dabei geben die Vektoren $\mathbf{x}$ den Abstand eines Pixels von der ersten Hauptachse an. Mit den relativen Klassenhäufigkeiten[4] N_{NC} und N_{Ch} als geschätzte *a priori* Wahrscheinlichkeiten und den Kovarianzmatrizen Σ_ω ($\omega = \{CH, Nc\}$) ergeben sich die Bayes'schen Klassenzugehörigkeitswahrscheinlichkeiten $\mathrm{P}(\omega \mid \mathbf{x})$

$$P(\omega \mid \mathbf{x}) = N_\omega \cdot \frac{p(\mathbf{x} \mid \omega)}{p(\mathbf{x})} \quad , \quad \omega = \{NC, Ch\}$$

mit

$$p(\mathbf{x}) = N_{NC} \cdot p((\mathbf{x} \mid NC) + N_{Ch} \cdot p(\mathbf{x} \mid Ch)),$$

so dass

$$P(NC \mid \mathbf{x}) + P(Ch \mid \mathbf{x}) = 1$$

Die Kovarianzmatrizen $\sum_\omega$ ($\omega = \{NC, Ch\}$) und die Anzahl der Pixel N_ω, die der Klasse ω angehören, können durch wohlbekannte iterative Clusteringverfahren aus den Daten selbst unüberwacht geschätzt werden citeopen,[5].

[4] Zahl der Pixel, die der Klasse Change, bzw. NoChange angehören

$$
\begin{aligned}
\sum_{NC} &= \frac{\sum_{\mathbf{x}} P(NC|\mathbf{x}) \cdot \mathbf{x}\mathbf{x}^t)}{\sum_{\mathbf{x}} P(NC|\mathbf{x})} \\
\sum_{Ch} &= \epsilon \cdot \sum_{NC} \quad ; \quad \epsilon = \frac{\mathrm{trace}(\sum^*_{Ch})}{\mathrm{trace}(\sum_{NC})} \quad ; \quad \epsilon \gg 1 \\
\sum^*_{Ch} &= \frac{\sum_{\mathbf{x}} P(Ch|\mathbf{x}) \cdot x\mathbf{x}^t}{\sum_{\mathbf{x}} (P(Ch|\mathbf{x})} \\
N_{NC} &= \frac{\sum_{\mathbf{x}} P(NC|\mathbf{x})}{\sum_{\mathbf{x}} [P(NC|\mathbf{x}) + P(Ch|\mathbf{x})]} \\
N_{Ch} &= \frac{\sum_{\mathbf{x}} P(Ch|\mathbf{x})}{\sum_{\mathbf{x}} [P(NC|\mathbf{x}) + P(Ch|\mathbf{x})]}
\end{aligned}
\tag{4.12}
$$

Anschließend wir das Ergebnis eingefärbt. Starke Einfärbung ist gleichbedeutend mit hoher Änderungswahrscheinlichkeit. Als Referenz wird ein Graustufenbild eines Bandes hinter das Änderungsbild gelegt. In Anhang H sind Ergebnisbilder abgebildet, auf die im Auswertungsteil eingegangen wird.

4.12.2 Die Parameter des Algorithmus

Maximale Anzahl von Iterationen : *maxiter*

Zur Parameterfindung muß der Algorithmus iterativ durchlaufen werden. Dieser Parameter legt fest, wie oft. Der Standardwert ist 20.

Fenstergröße : *ksize*

Die Fenstergröße, mit der die Bilddaten innerhalb einer Umgebung gemittelt werden. Bei *ksize*=1 werden die Pixel ohne Umgebung betrachtet. *ksize*=3 ist daher der Standardwert. *ksize* sollte dem *ksize*-Wert des Änderungsdetektionsprogrammes (HAT Kap. 4.6.2, Varianzbildung Kap. 4.5.1) entsprechen.

Gauß- oder Boxwindow : *gauß*

Dieser Parameter gibt an, wie die Umgebungspixel berücksichtigt werden sollen. Gaußförmig um das Pixel oder rechteckig. Bei der gaußförmigen Betrachtung wird in einem rechteckigen Fenster, mit der Größe *ksize*, eine Gewichtung der Pixel mit einer zweidimensionalen Gaußfunktion bestimmt. Standardeinstellung ist Boxwindow.

Resampling Mode : *resample*

Dies ist ein Vorverarbeitungsschritt, bei dem die Pixel geglättet werden können. Es kann angegeben werden, ob geglättet werden soll oder nicht. Bei **bilinearer Interpolation** wird eine Mittelung der Werte der Änderungsbilder mit der Fenstergröße *ksize* pro Kanal vorgenommen. Erst danach werden die Längenvektoren berechnet.

Bei **Nearest Neighbour** werden die Daten unverfälscht übernommen.

4.12.3 Der beschriebene Algorithmus

Auch hier werden die Bildinformationen, die pro Kanal in Form einer Matrix vorliegen, in einen eindimensionaler Vektor umgeformt. Der Ausdruck *Abstandsvektor* steht für den Abstand eines Pixels von der 1. Hauptachse. Das gilt auch für die Varianzmethode. Beide Algorithmen liefern Ergebniswerte in Einheiten von Standardabweichungen.

	Funktion	Formel	Kommentar
1)	Abschätzung von Change und NoChange setzen. Annahme: 10% Änderung	NoChange = 90% Change = 10% NCC(k,k)=0.1 CC(k,k)=10.0	NoChangeCov (NCC) und ChangeCov (CC) sind N zwei N×N-Kovarianzmatrizen N steht für die Anzahl der Kanäle k ist die Nummer eines Kanäle ($k = 0..N-1$)
2)	NoChange-Wahrscheinlichkeit ermitteln	N Eigenwerte $ncew$ aus NCC bestimmen $tspec(i,k) = chim(i,k) \cdot ncew(k)$ $dists = (i) \sum_k \ln(ncew(k))$ $dists(i) = dists(i) - 2 \cdot \ln(NoChange)$ $dists = \sum_k \frac{tspec(i,k)^2}{cew(k)}$ $NCim(i) = \frac{e^{-\frac{1}{2}dists(i)}}{\sqrt{(2\pi)^N}}$	i = Index des Abstandsvektors $chim(i,k)$ = Abstandsvektoren im Änderungsbild $tspec(i,k)$ = Transformiertes Spektrum der Abstandsvektoren $dists(i)$ = Längenmaße der Abstandsvektoren $ncew(k) = N$ NoChange-Eigenwerte $NCim(i)$ = NoChange-Wahrscheinlichkeitsbild
3)	Change-Wahrscheinlichkeit ermitteln	N Eigenwerte cew aus CC bestimmen Eigenvektoren bestimmen $sigratio = \frac{\sum_k cew(k)}{\sum_k ncew(k)}$ $dists(i) = \sum_k \ln(ncew(k) \cdot sigratio)$ $dists(i) = dists(i) - 2 \cdot \ln(Change)$ Für alle Kanäle: $dists(i) = dists(i) + \frac{tspec(i,k)^2}{ncew(k)} \cdot sigratio$ $Cim(i) = \frac{e^{-\frac{1}{2}dists(i)}}{\sqrt{(2\pi)^N}}$	$Cim(i)$ = Change-Wahrscheinlichkeitsbild $cew(k) = N$ NoChange-Eigenwerte $sigratio$ = Verhältnis der Summe von $cew(k)$ zur Summe von $ncew(k)$
4)	Wahrscheinlichkeiten normieren	$totalprob(i) = Cim(i) + NCim(i)$ $Cim(i) = \frac{Cim(i)}{totalprob(i)}$ $NCim(i) = \frac{NCim(i)}{totalprob(i)}$	$totalprob(i)$ = Summe der Wahrscheinlichkeiten Division unter Berücksichtigung eventueller Nullen

	Funktion	Formel	Kommentar
5)	Wahrscheinlichkeiten mit $ksize$ glätten		
6)	Wahrscheinlichkeiten wie in 4) normieren		
7)	Kovarianzen der Klassen neu abschätzen	$oldNCC = NCC$ $estichange = \sum Cim$ Für alle Kanäle: $wspec_k = spectra_k \cdot Cim$ $CC = \frac{wspec \cdot spectra}{\sum Cim}$ $estiNoChange = \sum NCim$ Für alle Kanäle: $wspec_k = spectra_k \cdot NCim$ $NCC = \frac{wspec \cdot spectra}{\sum NCim}$	In $oldNCC$ wird die alte Kovarianzmatrix gespeichert
8)	Abbruchbedingung	Wenn max$\mid NCC - oldNCC \mid$<0.001 oder $iter > maxiter$ dann zu 2)	
9)	Endergebnis steht in $Cim(x, y)$		Der eindimensionale Vektor wird wieder in eine Matrix mit den Bilddimensionen X, Y umgeformt

4.13 Daedalus-, Landsat- und Ikonosbilder

Ein weiterer Aspekt der Änderungsdetektion ist, inwieweit das Verfahren auf anderes kommerzielles Bildmaterial angewendet werden kann.
Ich habe für diesen Test kein Bildmaterial vom Landsat-Satelliten und Ikonos-Satelliten verwendet, da mir keins zur Verfügung stand. Ich habe stattdessen die entsprechenden Kanäle des Daedalus genommen. Die Kanäle und Wellenbereiche sind im Anhang I.1 in Form einer Tabelle abgebildet.
Die Landsat-Kanäle sind interessant, weil an dem Forschungszentrum in Jülich unter Leitung von Dr. Morton Canty Änderungsdetektion mit Landsatbildern und der MAD-Methode von Nielsen und Conradsen [18] gemacht wird. Zum Vergleich der MAD- und der HAT-Ergebnisse ist es sinnvoll, die selben Kanäle zu nehmen.

4.14 Der Ikonos-Satellit

Am 24. September 1999 wurde der Fernerkundungssatellit Ikonos ins All geschossen, welcher Aufnahmen mit einer Pixel Auflösung von 1 Meter (panchromatisch) und 4 Meter (multispektral) erlaubt. Beide Bilder werden später fusioniert, so dass multispektrale Bilder mit einer Auflösung von nahezu 1 Meter entstehen. Um einen Eindruck zu geben, ob und wie gut sich die Änderungsdetektion mit der Hauptachsentransformation auf IKONOS-Bildern eignet, werden auch multispektrale Bilder mit den IKONOS-Kanälen untersucht.

4.15 Multivariate Alteration Detection (MAD)

Ein vielseitigeres Maß von Änderung ist der Ansatz, alle Kanäle der Bilder für die Zeiten t_1 und t_2 zu zwei neuen Bildern zusammenzufassen. Das Bild zur Zeit t_1 mit p Kanälen bekommt eine Gewichtung $a_{1..p}$ und das Bild zur Zeit t_2 mit q Kanälen entsprechend $b_{1..q}$. Dabei werden die Grauwerte des Kanals i (repräsentiert durch die Größe X_i) mit dem Gewicht a_i multipliziert. Anschließend werden die Kanäle der beiden Bilder mit ihrer Gewichtung aufsummiert und zu zwei neuen Bildern zusammengefasst. Mit diesen beiden zusammengefaßten Bildern kann dann Änderungsdetektion betrieben werden. Diese Methode ist deshalb schon von Vorteil, weil es mit ihr möglich ist, Bilder mit unterschiedlich vielen Kanälen miteinander zu vergleichen. Z.B. ein Landsat-Satellitenbild (p=6) zur Zeit t_1 mit einem SPOT-Satellitenbild (q=3) zur Zeit t_2.

$$\mathbf{a}^t\mathbf{X} = a_1X_1 + ... + a_pX_p \tag{4.13}$$

$$\mathbf{b}^t\mathbf{Y} = b_1Y_1 + ... + b_qY_q \tag{4.14}$$

und die Differenz dazwischen ist:

$$\mathbf{a}^t\mathbf{X} - \mathbf{b}^t\mathbf{Y}. \tag{4.15}$$

Mit jeder beliebigen Wahl von **a** und **b** wird man eine Änderung finden. Es ist aber sinnvoller **a** und **b** nicht willkürlich zu wählen. Eine Möglichkeit zur Bestimmung von **a** und **b** ist die HAT[5]. Mit ihr kann ein optimales **a** aus **X** und **b** aus **Y** gefunden werden. **a** und **b** sind voneinander unabhängig. Mit dieser Methode sind mehrere Versuche gemacht worden ([18] S.4f).
Eine bessere Methode ist, **a** und **b** gleichzeitig zu bestimmen. Dazu maximieren wir

[5]Hauptachsentransformation

auch hier, genau wie bei der HAT, die Differenz der Varianz.
Die Erwartungswerte der beiden Bilder $E(\mathbf{X})$ und $E(\mathbf{Y})$ werden als null angenommen.

$$\text{maximize Var}(\mathbf{a}^t\mathbf{X} - \mathbf{b}^t\mathbf{Y}) \tag{4.16}$$

mit

$$\text{Var}(\mathbf{a}^t\mathbf{X}) = \text{Var}(\mathbf{b}^t\mathbf{Y}) = 1 \tag{4.17}$$

Mit diesem Ansatz und den Definitionen in Anhang E erhalten wir:

$$\begin{aligned} Var\left\{\mathbf{a}^t\mathbf{X} - \mathbf{b}^t\mathbf{Y}\right\} &= Var(a^T\mathbf{X}) + Var(b^T\mathbf{Y}) - 2Cov(a^T\mathbf{X}, b^T\mathbf{Y}) \\ &= 2(1 - Corr\{\mathbf{a}^t\mathbf{X}, \mathbf{b}^t\mathbf{Y}\}). \end{aligned} \tag{4.18}$$

Damit wir von Änderungsdetektion reden können, wünschen wir uns, dass $\mathbf{a}^t\mathbf{X}$ und $\mathbf{b}^t\mathbf{Y}$ positiv korreliert[6] sind, $Corr\{\mathbf{a}^t\mathbf{X}, \mathbf{b}^t\mathbf{Y}\} \geq 0$.
Vor diesem Schritt bestimmen wir die Differenz zwischen der Linearkombination mit maximaler Varianz ($Var\left\{\mathbf{a}^t\mathbf{X} - \mathbf{b}^t\mathbf{Y}\right\}$) durch Bestimmung der Linearkombination mit minimaler positiver Korrelation ($2(1 - Corr\{\mathbf{a}^t\mathbf{X}, \mathbf{b}^t\mathbf{Y}\})$). $\mathbf{a}$ und $\mathbf{b}$ müssen so gewählt werden, dass die Korrelation positiv ist.
Dies führt zur CCA[7] (canonical correlation analysis). Die CCA untersucht den Zusammenhang zwischen zwei Gruppen von Variablen und maximiert und diesem Fall die Varianz Gl. 4.16.
Die ersten beiden Linearkombinationen sind die mit der größten Korrelation. Diese Korrelation wird erste kanonische Korrelation genannt und beide Linearkombinationen werden kanonische Variate[8] genannt. Die nächsten beiden Linearkombinationen stehen senkrecht auf der ersten kanonischen Variate und haben ebenfalls die größten Korrelation. Höhere Ordnungen werden ähnlich definiert. Dieses Verahren wurde erstmals von H. Hotelling [10] 1936 entwickelt.
Die Grundidee der MAD ist, dass korrespondierende Paare von kanonischen Variaten Linearkombinationen der Originalvariablen sind, sortiert nach der Korrelation oder den Variaten zwischen Paaren.
Es ist sinnvoll eine Änderungsdetektion basierend auf der Änderung zwischen Paaren von Variaten zu machen, welche die geringste Ähnlichkeit haben.
Die mathematische Grundidee ist, die Theorie der MAD dorthin zu modifizieren, die kanonischen Variaten zu benutzen.

[6] Definition siehe Anhang E
[7] Siehe Anhang F
[8] Für dieses Wort gibt es keinen deutschen Ausdruck

4.15.1 MAD-Transformation

Durch die Bestimmung von **a** und **b** mit der CCA wird die MAD-Transformation wie folgt definiert:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{a}_p\mathbf{X} - \mathbf{b}_p\mathbf{Y} \\ \vdots \\ \mathbf{a}_1\mathbf{X} - \mathbf{b}_1\mathbf{Y} \end{bmatrix}. \tag{4.19}$$

Die MAD-Transformation hat die wichtige Eigenschaft, dass wenn wir uns eine Linearkombination von zwei Sätzen von Variablen mit p und q Variablen und positiver Korrelation denken, die p-te Differenz uns die maximale Varianz zwischen den Variablen zeigt. Wenn $p < q$, dann ist die Projektion von $\mathbf{Y}$ auf die Eigenvektoren entsprechend den Eigenwerten gleich null und unabhängig von $\mathbf{X}$. Dieser Teil ist der extremste Fall von multivariater Änderungsdetektion.
Mit Gl. 4.19 können, im Falle $p = q$ jetzt die Differenzen der einzelnen Kanäle gebildet werden. Die Differenzen werden im folgenden als Komponenten bezeichnet. Anschließend werden Schwellen definiert, die die NoChange-Pixel ausblenden. Die Schwellen werden automatisch bestimmt. Das Verfahren der Schwellwertbestimmung wurde von Bruzzone [2] entwickelt. Dieses Verfahren arbeitet ebenfalls nach den Bayes'schen Entscheidungsregeln. Es nimmt ebenfalls je eine Gaußsche Verteilungsfunktion pro Klasse an. Das Verfahren arbeitet iterativ.
Ein wesentliches Problem dieses Verfahrens ist derzeit, das noch keine Glättung der Bilddaten stattfindet, so wie bei den anderen beiden Verfahren (s. Kap. 4.5 und Kap. 4.6). Das hat zur Folge, das Registrierfehler von einem Pixel sofort als Änderung gefunden werden. Eine Möglichkeit ist die Glättung der Komponentenbilder vor der Darstellung.

Kapitel 5

Auswertung

Im folgenden werden alle drei Methoden (Varianzbildung, HAT und MAD) auf das Stadtgebiet angewendet. Um die Methoden gleich bewerten zu können, werden sie mit Hilfe der selbst erstellten Groundtruthkarte (Kap. 4.8 und Abb. 5.3) und des sich damit ergebenden Kappa-Wertes (Kap. 4.9.2) verglichen. Außerdem werden auch noch die Verhältnisse von gefundenen Objekten und Änderungspixeln betrachtet.
In der Groundtruthkarte habe ich mich auf künstliche Änderungen beschränkt, d.h. Vegetation habe ich nur teilweise berücksichtigt.
Die Kappawerte, die im folgenden entstehen, sind deshalb auch relativ niedrig.
Alle Bildausschnitte, zu denen es eine Groundtruthkarte gibt, werden mit einer Tabelle der folgenden Art bewertet:

Gefundene Objekte : **e** von **f**
entspricht : **g**%
Gefundene Fläche : **h**%
Changepixel richtig : **i**%

Konf.	Change	NoChange
Change	**a**	**b**
NoChange	**c**	**d**

Kappawert : **j** → **k**
Eigene Einstufung : **l**% → **m**

#	Bezeichner	Beschreibung
a, **b**, **c**, **d**	Konfusionsmatrix	Die Werte der Matrix. **a** bedeutet Anzahl der richtig klassifizierten Change-Pixel, **d** die Anzahl der richtig klassifizierten NoChange-Pixel, **b** sind die Pixel, die in der Groundtruthkarte als Änderung markiert sind, aber nicht gefunden wurden und **c**, die Pixel, die gefunden wurden, aber nicht in der Groundtruthkarte verzeichnet sind.

#	Bezeichner	Beschreibung
e, **f**	Objekte gefunden	**e** ist die Anzahl aller gefundenen Objekte, die mindestens 20% des entsprechenden Objektes in der Groundtruthkarte ausfüllen. Bei dieser Prozentzahl würde sich der Benutzer das Objekt anschauen.
g	entspricht	In **g** ist das Verhältnis von **e** und **f** als Prozentzahl angegeben.
h	Gefundene Fläche	Eine Angabe darüber, wieviel von der Fläche der Groundtruthkarte von dem Algorithmus gefunden wurde. 100% bedeutet, dass die gesamte Fläche der Groundtruthkarte gefunden wurde. Dieser Wert wird allerdings nie erreicht, da die Objekte in der Groundtruthkarte scharfkantig sind, während die Objekte die gefunden wurden aufgrund der Kantenglättung weiche (runde) Kanten haben.
i	Von allen Changepixel richtig	Das Verhältnis aller gefundener Changepixel zu den richtig gefundenen Changepixel. 100% bedeutet, das alle gefundenen Changepixel richtig klassifiziert worden sind.
j	Kappawert	Der Kappawert der Szene mit der zur Bewertung herangezogenen Groundtruthkarte
k	Einstufung	Die Einstufung laut Tab. 4.1.
l, **m**	Eigene Meinung	Meine eigene Einschätzung des Endergebnisses. Die Bewertung erfolgt mit der Idee, dass alle drei Prozentangaben (**g**, **h**, **i**) die gleiche Gewichtung bekommen (Gewichtung = 1/3) und aufsummiert werden (Maximalwert ist 100%). Die Summe **l** wird in fünf gleiche Teile unterteilt. Die Unteilung wird dann in **m** mit *sehr gut, gut, befriedigend, schlecht* und *sehr schlecht* betitelt.

Ein ideales Endergebnis wäre, wenn **g**, **h**, **i** zusammen möglichst groß sind. Es bringt wenig, wenn sehr viele Objekte gefunden worden sind, aber wenig richtig klassifizierte Pixel dabei sind, bzw. wenig von der Groundtruthkarte gefunden wurde.
In den Abschnitten der Bewertung der Satellitenkanäle[1] der Daedalusbilder wird die gleiche Übersicht gezeigt, nur ohne Konfusionsmatrix.

In allen folgenden Ergebnisbildern sind mit Hilfe der Groundtruthkarte die Ergebnisse der Änderungsdetektionen entsprechend nach richtiger und falscher Klassifizierung eingefärbt. Dieses Einfärben geschieht mit einem von mir entwickeltem Programm[2], welches ebenfalls unter ENVI eingefügt worden ist. Die schwarzen Flächen sind richtig gefundene Änderungen und die dunkelgrauen Flächen sind falsch gefundene Änderungen. Die Groundtruthkarte ist mit hellgrau hinterlegt.

[1] Landsat und Ikonos
[2] CENSIS-Funktion-Name: Classify: Change/NoChange

5.1 Stadtgebiet

Abbildung 5.1: *Stadtgebiet Nürnberg 91 - Kanal 7*

Abbildung 5.2: *Stadtgebiet Nürnberg 95 - Kanal 7*

In diesem Teil wird eine Teilszene ausgewertet. Dazu werden Ausschnitte aus den Jahren 1991 und 1995 verwendet. Das Bild aus dem Jahre 1991 wurde mit einer Flughöhe von 900m aufgenommen. Das Bild aus dem Jahre 1995 wurde mit einer Flughöhe von 300m aufgenommen. Bedingt durch die schlechtere Bodenauflösung (s.

Gl. 2.1) wurde das 1991-Bild als Referenz verwendet (s. Abb. 5.1), d.h. das 1995-Bild wurde mit Akima (s. Kap. 3.4.1) auf die Szene von 1991 registriert[3] und dadurch auch in der Auflösung an die 1991-Szene skaliert.
In dieser Szene sind große Änderungen vorhanden. Die markanteste Änderung ist der Zirkus, der im Jahre 95 (s. Abb. 5.2 rechts oben) gastiert hat. Es haben sich aber auch eine Menge Gebäude verändert.
Das Bild aus dem Jahre 1991 wurde am 21.08.91 um 14:58 aufgenommen und das 1995-Bild am 21.07.95 um 9:57 Uhr.
In Abb. 5.3 ist eine Groundtruthkarte dargestellt. In ihr sind alle von mir erkannten künstlichen Änderungen verzeichnet. Zusätzlich habe ich auch noch einige Änderungen in der Vegetation eingetragen. Eine Beschreibung der Änderungen befindet sich in Tab. 5.1.

[3]durch Rafael Wiemker

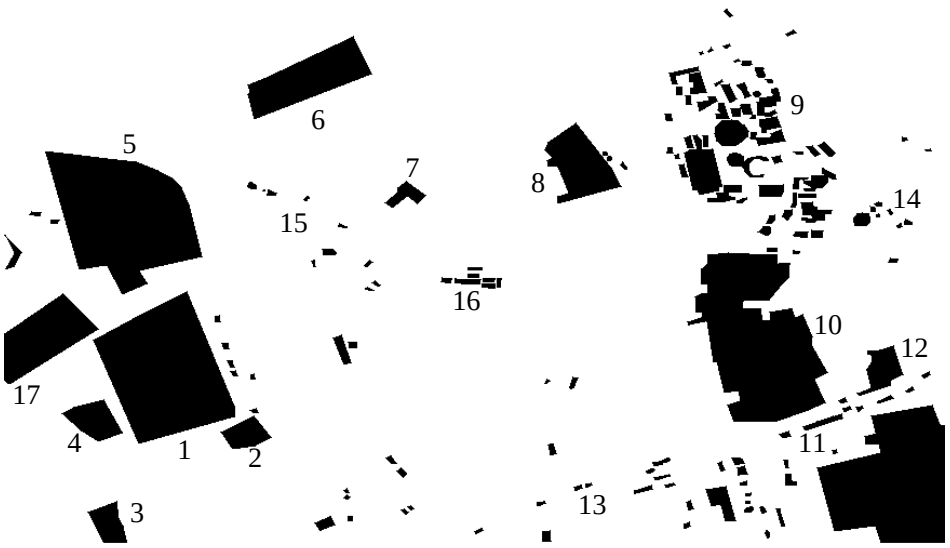


Abbildung 5.3: *Groundtruthkarte zur Änderung zwischen den Bildern des Stadtgebietes. Eine nähere Beschreibung der durch Nummern gekennzeichneten Änderungen befindet sich in Tab. 5.1*

Nr	Bildinhalt Szene 1991	Bildinhalt Szene 1995	Kommentar
1	Feld	Feld	umgepflügt
2	Baustelle	Kleiner Parkplatz	
3	Feld	Teich	Neubau
4	Feld	Feld	umgepflügt
5	Baustelle	Gebäudekomplex	
6	Feld	Feld	umgeflügt
7	Vegetation	Betonfläche	Neubau
8	Alte Häuser	Neue Häuser	Umbau
9	Rasenfläche	gastierender Zirkus	
10	Rasenfläche mit einigen Gebäuden	Neuer Gebäudekomplex mit Betonflächen	Neubau
11	Altes Gebäude	Neues Gebäude	Umbau (gleiches Dachmaterial)
12	Rasenfläche	Rasenfläche	Trocken bzw feucht
13	Vereinzelnte Autos	Vereinzelnte Autos	
14	Vereinzelnte Autos	Vereinzelnte Autos	
15	Vereinzelnte Autos	Vereinzelnte Autos	
16	Straße	Straße mit Bussen und Containern	
17	Feld/Wiese	Feld/Wiese	Trocken bzw feucht

Tabelle 5.1: *Übersicht über die Änderungen, die in der Grountruthkarte (s. Abb. 5.3) verzeichnet sind.*

5.1.1 Varianzmethode

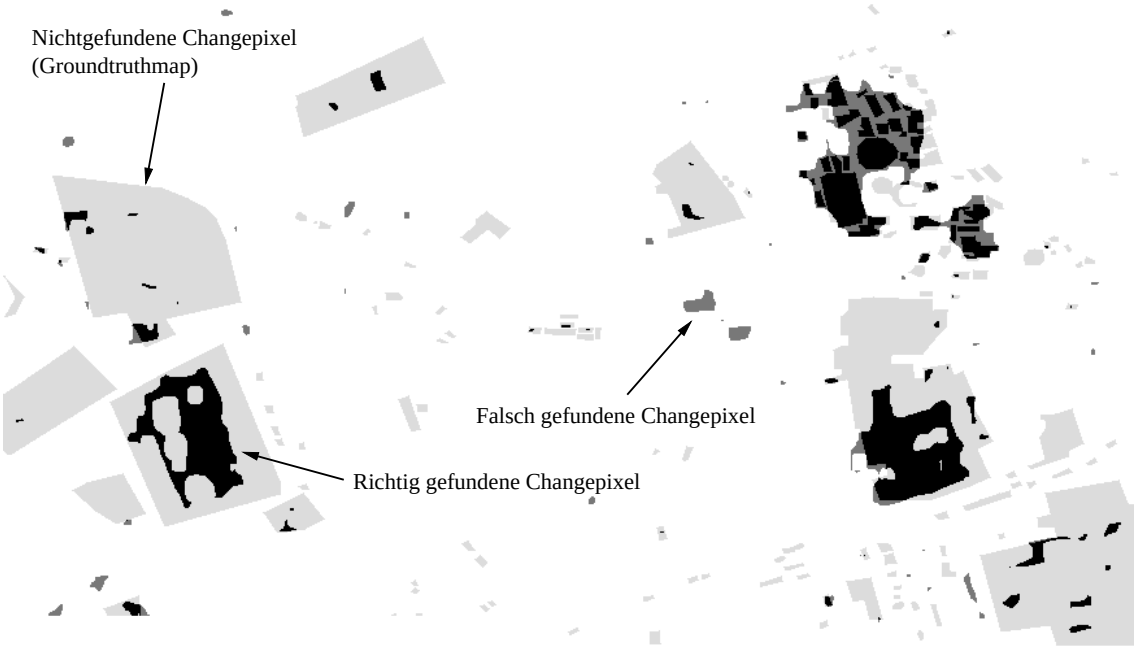


Abbildung 5.4: *Änderungsergebnis mit der Varianzmethode. Nur der Zirkus und die Gebäudeänderung darunter kommen deutlich hervor, sowie das Feld links. Mit einem Kappawert von 0.27 ist das Ergebnis eher unbefriedigend. Schwarze Gebiete sind als richtig erkannt worden, während die dunkelgrau schattierten Gebiete falsch klassifiziert worden sind. Die Groundtruthkarte ist hellgrau hinterlegt.*

Die Varianzmethode betrachtet nur ein Fenster um das Pixel (i, j) und nicht den gesamten Bildinhalt auf einmal. In diesem Beispiel ein 11x11-Fenster. Da hier nicht das ganze Bild betrachtet wird, wird die Vegetation, die sich auch teilweise geändert hat, das Ergebnis nicht beeinflussen. Bei der Hauptachsentransformation ist dies der Fall, wie in Kap. 5.2.3 zu sehen ist. Das Endergebnis ist nicht sehr zufriedenstellend. Das Hauptmerkmal, der Zirkus (9), wird gefunden und die Gebäudeänderung (10) auch, sowie das Feld (1). Die restlichen Gebiete haben in der 11x11 Fensterumgebung zu wenig Varianz, als dass sie als Änderung klassifiziert werden konnten. Eine kleinere Fenstergröße, wie z.B. 3x3 (wie bei der HAT), zu nehmen hat wenig Sinn. Es werden dann zwar alle kleinen Änderungen wie Autos etc. gefunden, aber auch jeder kleine Pixelversatz. Durch Fehlregistrierung ist in einem solchen Endergebnis nicht mehr zu erkennen, was wahre Änderung ist, und was nicht. Es hängt von dem Szeneninhalt ab, welche Fenstergröße gute Ergebnisse liefert. In diesen Bildausschnitten haben sich eine Pixelumgebung von 11x11 gut bewährt.

Gefundene Objekte	:	38 von 150
entspricht	:	25.33%
Gefundene Fläche	:	19.92%
Changepixel richtig	:	75.12%

Konf.	Change	NoChange
Change	14297	57464
NoChange	4735	372940

Kappawert	:	**0.27**	→	**akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	39.72%	→	**schlecht**

5.2 HAT - kleine Fenstergröße

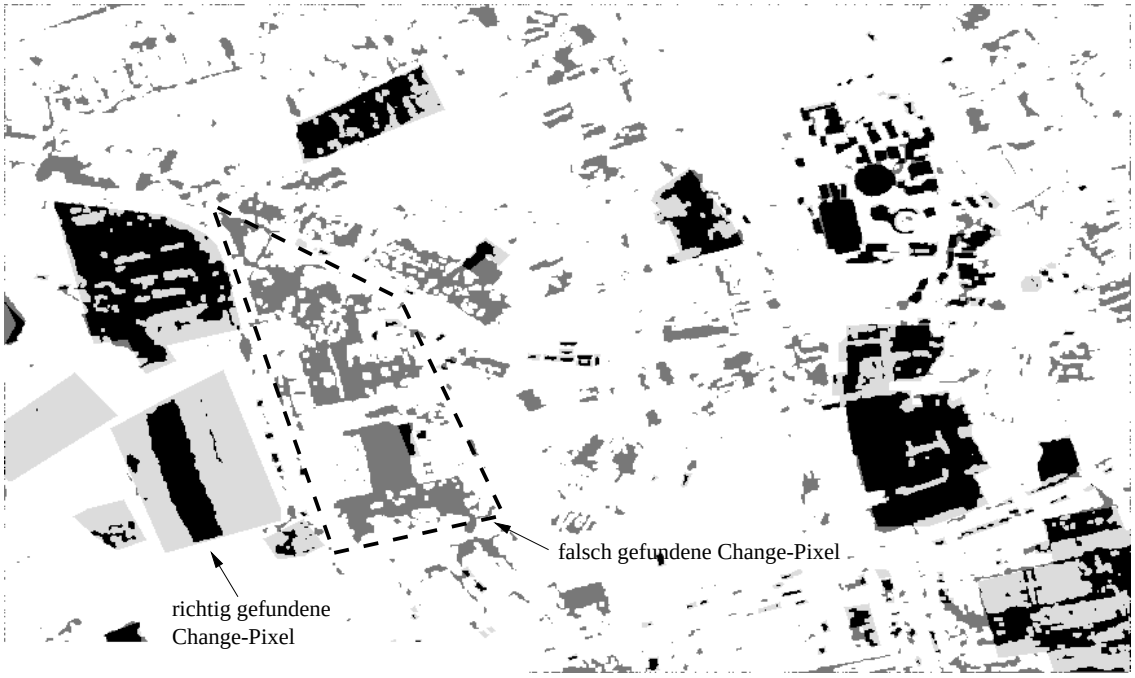


Abbildung 5.5: *Endergebnis der Hauptachsentransformation ohne Normierung auf lokale Varianz (Fenstergröße: 3x3). Die schwarzen Bereiche sind richtig klassifizierte Änderungen, während die dunkelgrauen falsche Ergebnisse darstellen. Die hellgrauen Flächen stellen die unterlegte Groundtruthkarte dar. Das eingerahmte Gebiet ist fehlklassifiziert.*

Ohne Normierung (Abb. 5.5, Abb. G.2) ist das Endergebnis recht akzeptabel. Es fällt jedoch sofort auf, dass in der linken Hälfte des Ergebnisbildes zwei große Flächen fehlklassifiziert worden sind (eingerahmtes Gebiet). Das liegt daran, dass bei den Aufnahmen ein unterschiedlicher Sonnenstand vorhanden war. Es handelt sich hierbei um Flachdächer, welche höchstwahrscheinlich mit Kies bedeckt sind. In diesem Fall würde es sich um BRDF-Effekte handeln. Der Zirkus (9) kommt sehr gut hervor. Auch die Gebäudeänderung unter dem Zirkus (10). Unten rechts im Bild hat auch eine große Änderung stattgefunden (11), die aber nur teilweise gefunden wurde. Das liegt daran, dass hier zwar eine Änderung der Gebäudeform stattgefunden hat, aber das gleiche Dachmaterial verwendet wurde. Dadurch hat sich die spektrale Signatur nur unwesentlich verändert (nach solchen sucht der Algorithmus), wodurch in diesem Fall nur die Umrisse der Gebäudeänderung gefunden wurden. Außerdem sind die Autos (13,14,15) sehr gut gefunden worden.

Gefundene Objekte	:	126 von 150		
entspricht	:	84.00%		
Gefundene Fläche	:	52.47%		
Changepixel richtig	:	53.77%		
Kappawert	:	**0.44**	→	**gut**
Eigene Einstufung	:	62.78%	→	**gut**

Konf.	Change	NoChange
Change	37651	34110
NoChange	32377	345298

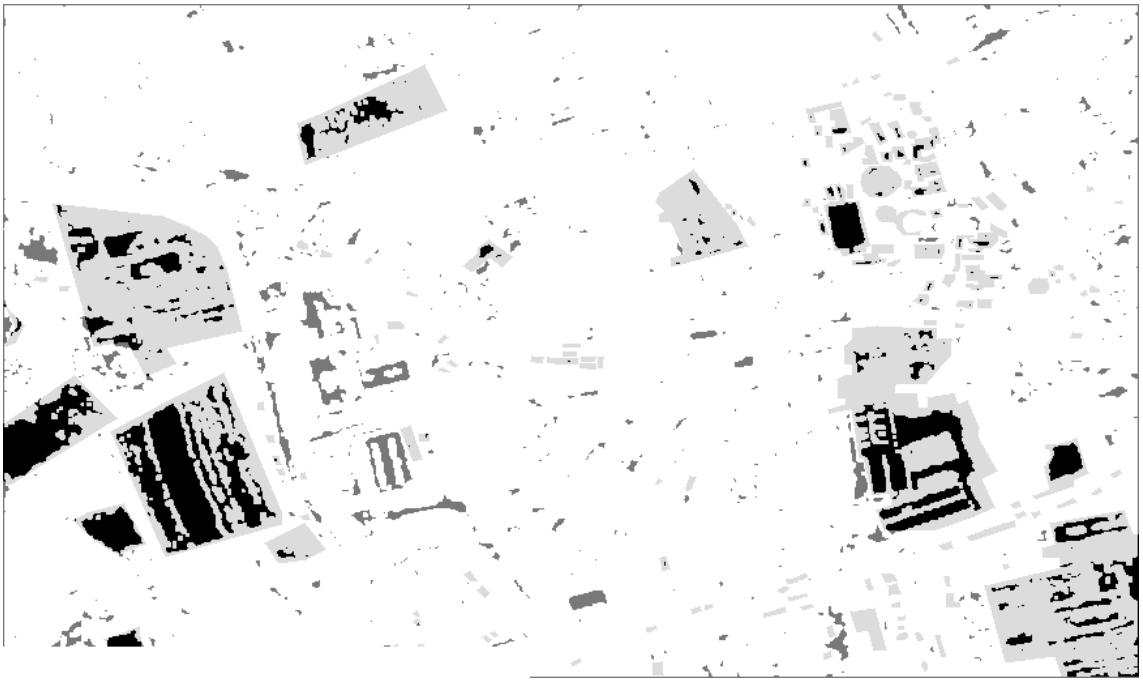


Abbildung 5.6: *Endergebnis der Hauptachsentransformation mit Normierung auf lokale Varianz (Fenstergröße: 3x3). Es gilt dieselbe Legende wie in Abb. 5.5*

Mit Normierung (Abb. 5.6, Abb. G.3) ist das Ergebnis deutlich schlechter. Die Großbaustelle (5) wird fast gar nicht angezeigt. Das hat aber eine einfache Ursache: Da die Abstandsvektoren durch die lokale Varianz (in der jeweiligen Fensterumgebung des Pixels) geteilt werden, werden die Vektorlängen verkleinert. Ist die Varianz jedoch nahezu null, so werden sie stark verlängert (s. Kap. 5.6.2). Aus diesem Grund wird von dem Zirkus (9) nur ein großes Zelt gefunden. Die kleinen Wagen haben eine zu große Varianz und gehen deshalb unter.

Gefundene Objekte	:	13 von 150		
entspricht	:	8.67%		
Gefundene Fläche	:	27.06%		
Changepixel richtig	:	64.12%		
Kappawert	:	**0.32**	→	**akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	32.95%	→	**schlecht**

Konf.	Change	NoChange
Change	19418	52343
NoChange	10867	366808

Wird die Normierung ausgeschaltet, so wird viel mehr Änderung gefunden. Das ist auch nicht verwunderlich, da durch die Normierung Änderungen in Texturen nicht angezeigt werden (s. Kap. 4.6.2).

Vegetationspixel verhalten sich anscheinend entgegengesetzt (s. Kap. 5.6.2). Das Feld (1) wird ohne Normierung nur teilweise gefunden, während es mit Normierung sehr deutlich hervortritt. Schaut man sich die Ausgangsbilder an, so sieht man auch eine Gleichmäßigkeit in dem Feld.

5.2.1 HAT - Große Fenstergröße

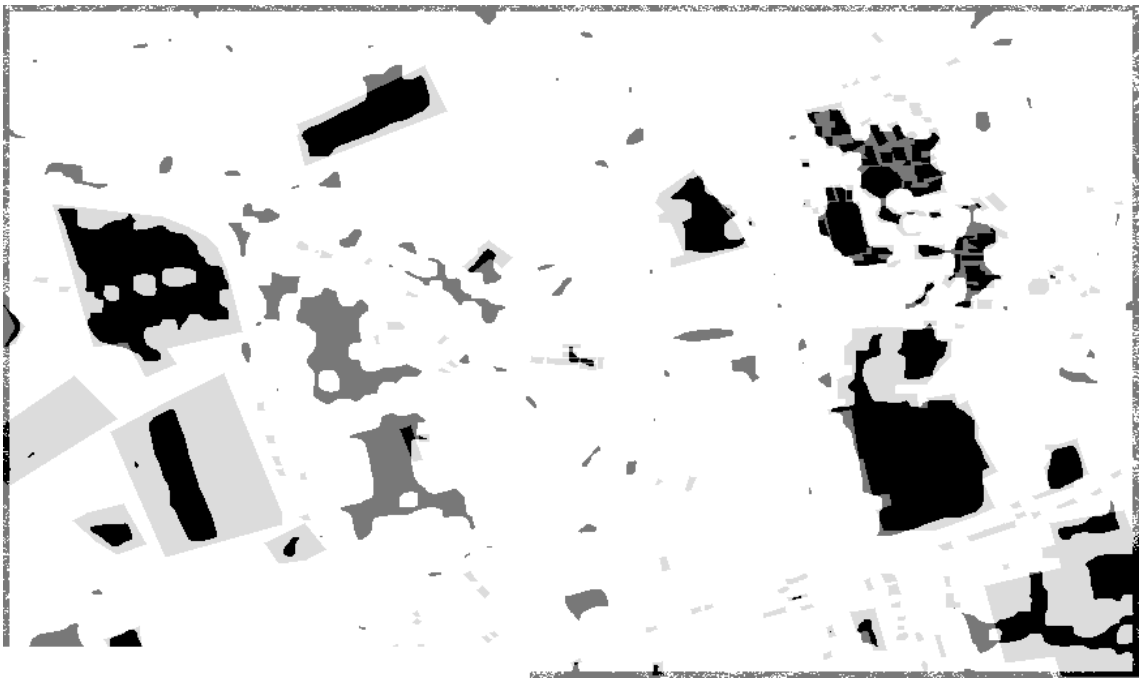


Abbildung 5.7: *Endergebnis der Hauptachsentransformation ohne Normierung auf lokale Varianz (Fenstergröße: 11x11). Es gilt dieselbe Legende wie in Abb. 5.5*

Oftmals möchte man einfach nur wissen, wo sich etwas verändert hat. Kleine Objekte wie z.B. Autos sind dann nur störend. Für diesen Fall sollte die Fenstergröße hinaufgesetzt werden. In Abb. 5.7 wurde eine Fenstergröße von 11x11 ohne Normierung auf Varianz verwendet. An diesem Ergebnis sind die wesentlichen Änderungen gut zu sehen. Aber auch wieder das große fehlklassifizierte Gebiet (eingerahmtes Gebiet). Aufgrund der räumlichen Ausdehnung können sie durch Mittelung auch nicht verschwinden.

Gefundene Objekte	:	53 von 150		
entspricht	:	35.33%		
Gefundene Fläche	:	48.58%		
Changepixel richtig	:	58.55%		
Kappawert	:	**0.45**	→	**gut**
Eigene Einstufung	:	47.01%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	34865	36896
NoChange	24682	352993

5.2.2 NDVI - Der Vegetationsindex

Möchte man Bilder miteinander vergleichen, in denen die Vegetation einen großen Teil der Änderung ausmacht, so sollte die Vegetation ausgeblendet werden, wenn in ihr zuviel Änderung vorhanden ist, da sie die Lage der Hauptachse stark beeinflußt. Die Vegetation hat ein besonderes Merkmal, an der sie erkannt werden kann. Im nahen Infrarot hat sie im Verhältnis zu den anderen Kanälen ein starkes Maximum im Reflektanzspektrum. Dieser Peak ist einmalig. So kann nun mit dem Kanal 4 und dem Kanal 7 ein Verhältnis bestimmt werden[4]. Mit einer Schwelle kann dann festgelegt werden, ob es sich um Vegetation handelt oder nicht.

$$\text{NDVI-Maske} = \left[\frac{\text{Band}_7 - \text{Band}_4}{\text{Band}_7 + \text{band}_4} > threshold\right] \tag{5.1}$$

NDVI-Maske

Bevor die Vegetation ausgeblendet werden kann, muß eine entsprechende Maske erstellt werden. Diese Maske sollte aus beiden Bildern erstellt werden. Dazu wird von beiden Bildern jeweils eine NDVI-Maske erstellt. Diese beiden NDVI-Masken werden dann über die logische Funktion UND miteinander verknüpft. Das heißt, dass nur die Pixel in der Endmaske als Vegetationspixel markiert sind, die auch in beiden Bildern Vegetationspixel sind. So wird gewährleistet, dass Pixel, die sich von Vegetation zu z.B. Beton geändert haben auch als Änderung angezeigt werden. Eine ODER-Verknüpfung darf nicht verwendet werden, da sonst Pixel, die in dem einen Bild Vegetation darstellen und in dem anderen Nichtvegetation in die Maske mit aufgenommen werden. So fallen diese geänderten Pixel aus der Änderungdetektion heraus.

$$\text{NDVI-Maske} = \text{NDVI-Maske}_1 \cap \text{NDVI-Maske}_2 \tag{5.2}$$

Die Grundeinstellung[5] benutzt, wie oben schon erwähnt, Kanal 4 und 7. Der Schwellwert ist 0.4. Je kleiner die Schwelle gesetzt wird, um so mehr Pixel werden potentiell als Vegetation interpretiert. Diese so erstellte Maske muß dem Algorithmus dann nur noch übergeben werden.

Ein Problem

Wird die Vegetation ausgeblendet, so tritt ein Problem auf. In den Kanälen des Infraroten stellen die Vegetationspixel die Pixel mit den höchsten Reflektanzen im

[4] Es kann auch statt Kanal 4 ein anderer gewählt werden

[5] Dieser Filter ist in ENVI implementiert

Merkmalsraum dar und tragen wesentlich zur Stabilisierung der Lage der Hauptachse bei. Wird die Vegetation ausgeblendet, so sind nur noch im unteren Reflektanzbereich Pixel vorzufinden, welche sich oftmals im Merkmalsraum kugelförmig ansammeln. In so einem Fall wird es dann schwierig die Hauptachse durchzulegen.

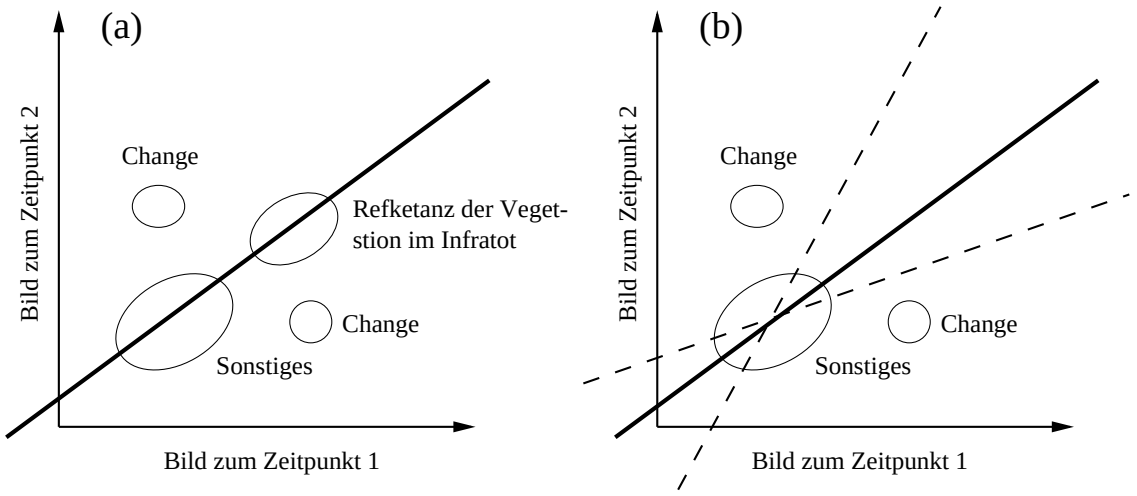


Abbildung 5.8: *Die infraroten Kanäle enthalten den für die Vegetation ausschlaggebenden hohen Reflektanzen. In a) ist der Merkmalsraum mit Vegetationspixeln skizziert. Die Vegetationspixel machen sich hauptsächlich im hohen Reflektanzbereich bemerkbar. Fehlt dieser Reflektanzbereich, so wird es schwerer, eine stabilie Hauptachse zu finden. Die Hauptachse kann so schnell in einer falschen Lage zum liegen kommen.*

5.2.3 Die Vegetation

Macht es es einen so großen Unterschied, ob eine NDVI Maske verwendet wird oder nicht? Zum Vergleich wird das Stadtgebiet benutzt. In Abb. 5.9 ist die Vegetationsmaske dargestellt. Alle schwarzen Pixel, sind Vegetationspixel, die in beiden Bildern vorhanden sind.
Für eine Bewertung wurde die HAT[6] einmal mit NDVI-Maske angewendet (Abb. 5.10) und einmal ohne. Bei dem Endergebnis ohne NDVI-Maske wurde das Endergebnis hinterher mit der NDVI-Maske multipliziert. Durch die Multiplikation werden die Vegetationpixel im Ergebnisbild entfernt (Abb. 5.11).
Die Idee ist, dass ein Unterschied erwartet wird, da bei der Hauptachsentransformation ohne NDVI-Maske die Hauptachsen durch die Vegetation beeinflusst werden und mit NDVI-Maske bleibt die Achse durch die Vegetation unbeeinflusst. Das führt schlussendlich zu anderen Ergebnissen.
Die Ergebnisse bestimmen sich jetzt aus dem entsprechenden Änderungsbild und der Groundtruthkarte, welche mit der NDVI-Maske multipliziert wird.

[6] 3x3-Fenstergröße ohne Normierung auf lokale Varianz

Abbildung 5.9: *NDVI-Maske generiert aus beiden Bildern durch eine UND-Verknüpfung. D.h. nur Pixel, die in beiden Bildern als Vegetationspixel erkannt worden sind, sind in der NDVI-Maske ebenfalls Vegetationspixel (schwarz). Der Vegetationsanteil beträgt 44%.*

Ohne Normierung:

Ergebnisse der Hauptachsentransformation mit NDVI-Maske (vgl. Abb. 5.10):

Gefundene Objekte	:	134 von 150	
entspricht	:	89.33%	
Gefundene Fläche	:	70.25%	
Changepixel richtig	:	39.80%	
Kappawert	:	**0.38**	→ **akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	65.80%	→ **gut**

Konf.	Change	NoChange
Change	50409	21352
NoChange	76237	301438

Ergebnisse ohne NDVI-Maske mit anschließender Multiplikation des Ergebnisses mit der NDVI-Maske (vgl. Abb. 5.11):

Gefundene Objekte	:	125 von 150	
entspricht	:	83.33%	
Gefundene Fläche	:	51.40%	
Changepixel richtig	:	54.33%	
Kappawert	:	**0.44**	→ **gut**
Eigene Einstufung	:	62.39%	→ **gut**

Konf.	Change	NoChange
Change	36885	34876
NoChange	31005	346670

Das zweite Ergebnis ist nahezu mit dem Ergebis ganz ohne NDVI-Maske (s. Kap. 5.2) identisch. Das bedeutet, dass nur wenig Vegetation als Änderung detektiert wurde.

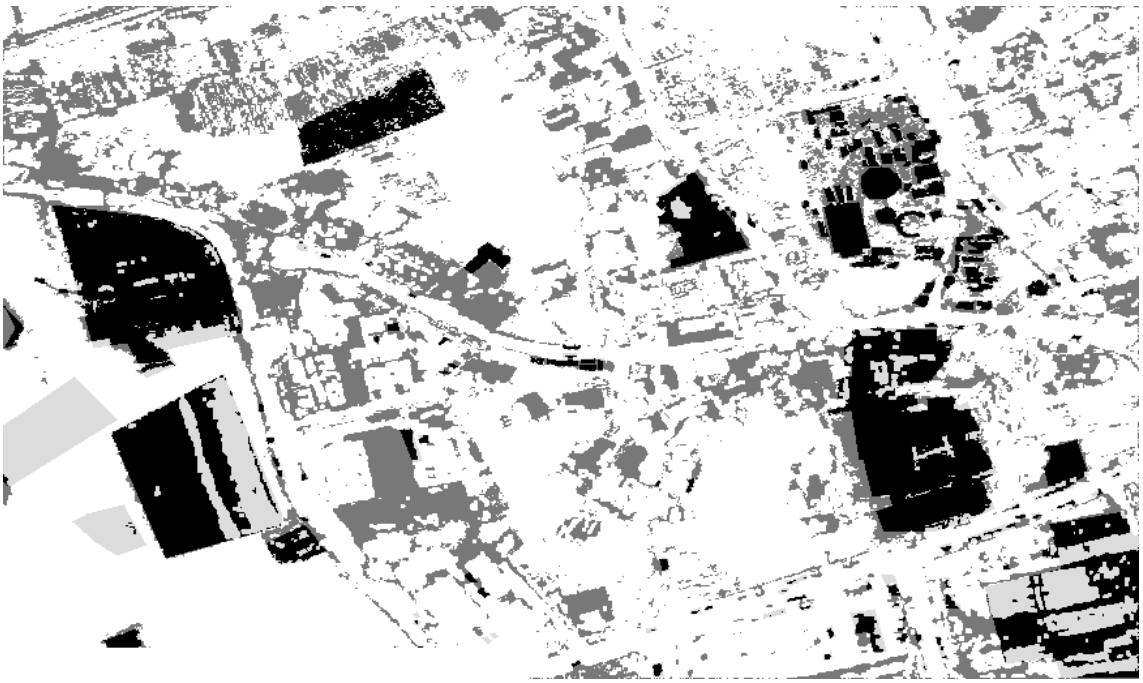


Abbildung 5.10: *Endergebnis der Hauptachsentransformation ohne Normierung. Während der HAT wurde die NDVI-Maske berücksichtigt.*

Mit Normierung:

Ergebnisse der Hauptachsentransformation mit NDVI-Maske und mit Normierung auf lokale Varianz:

Gefundene Objekte	:	15 von 150	
entspricht	:	10.00%	
Gefundene Fläche	:	26.35%	
Changepixel richtig	:	62.12%	
Kappawert	:	**0.30**	→ **akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	32.49%	→ **schlecht**

Konf.	Change	NoChange
Change	18907	52854
NoChange	11529	366146

Ergebnisse ohne NDVI-Maske mit anschließender Multiplikation des Ergebnisses mit der NDVI-Maske:

Gefundene Objekte	:	11 von 150	
entspricht	:	7.33%	
Gefundene Fläche	:	22.54%	
Changepixel richtig	:	67.66%	
Kappawert	:	**0.28**	→ **akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	32.19%	→ **schlecht**

Konf.	Change	NoChange
Change	16174	55587
NoChange	7731	369944

Beide Endergebnisse ohne Normierung sind gut. Sie sind mit den Ergebnissen ganz ohne NDVI-Maske nahezu identisch (s. Kap. 5.11). Das ist bei dieser Szene aber nicht sehr verwunderlich, da sich in den Vegetationsbereichen nur wenig geändert hat, d.h. die Hauptachse wurde nur ein wenig von der Vegetation beeinflusst. Die Ergebnisse mit Normierung sind, wie zu erwarten war, schlechter.

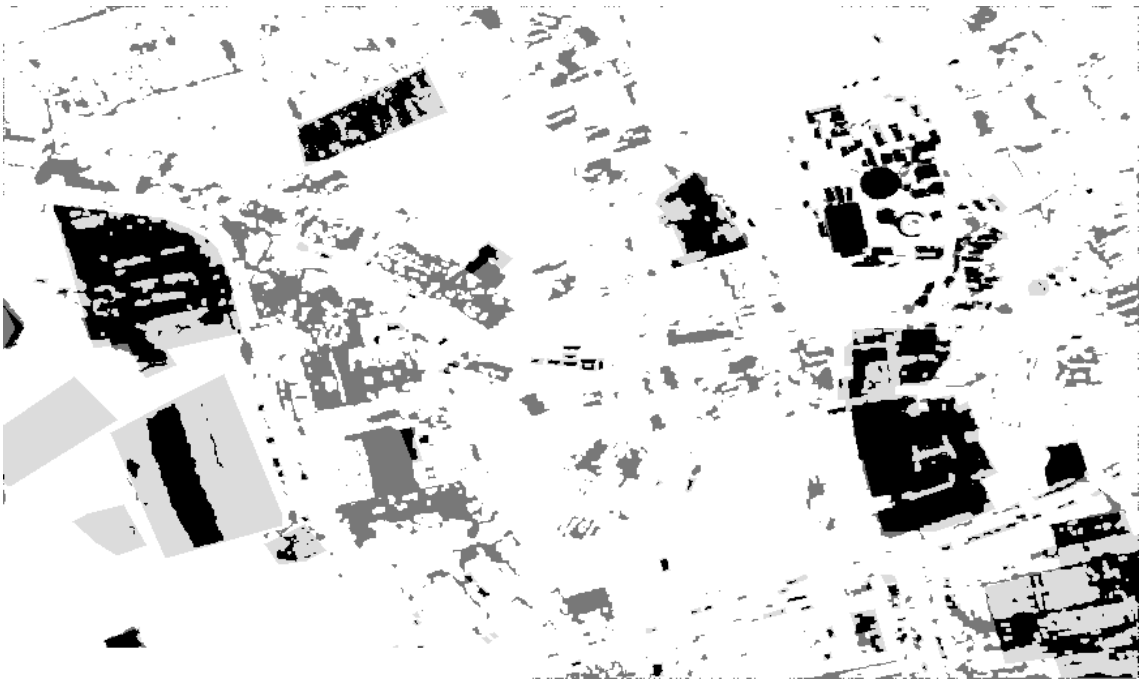


Abbildung 5.11: *Endergebnis der HAT ohne NDVI-Maske und ohne Normierung auf lokale Varianz. Das Endergebnis wurde mit der NDVI-Maske multipliziert.*

Bei diesem Ausschnitt empfiehlt es sich nicht unbedingt, die NDVI-Maske während der HAT zu verwenden. Es werden zwar mehr Objekte und mehr Flächen von der Groundtruthkarte gefunden, aber weniger richtige Changepixel. HAT ohne NDVI-Maske, mit anschließender Multiplikation mit der NDVI-Mske, liefert ein Ergebnis derselben Güte, wie ganz ohne NDVI-Maske.

5.2.4 Landsat- und Ikonoskanäle

Um einen Vergleich zwischen den Änderungsergebnissen der HAT, Varianzbilung und MAD-Methode machen zu können müssen für beide Verfahren die gleichen Kanäle verwendet werden. In diesem Fall sind es die Landsatkanäle. In diesem Abschnitt sind nur die Kappawerte und deren Konfusionsmatrizen dargestellt.
An der Übersichtstabelle Tab. 5.2 ist erkennbar, dass mit allen drei Bildtypen ohne Normierung auf die Varianz gute Ergebnisse erzielt werden können. Mit Normierung sind die Ergebnisse bei den Ikonos- und Landsatkanälen, wie bei den Daedaluskanälen schlechter.
Die Ergebnisse der HAT sind mit einer Fenstergröße von 3x3 entstanden, während die Ergebnisse der Varianzmethode mit einer Fenstergröße von 11x11 entstanden sind.

Bei Normierung auf lokale Varianz werden die Ergebnisse mit abnehmender Kanalzahl schlechter. Diese Ergebnisse hängen von Texturen (Varianzen) ab, deshalb ist dies nicht verwunderlich. Mit abnehmender Kanalzahl stehen weniger Informationen zur Verfügung.
Die Ergebnisse ohne Normierung auf lokale Varianz werden dagegen mit abnehmender Kanalzahl besser. Das kann mit der Art der Erstellung der Groundtruthkarte erklärt werden. Ich habe mich hauptsächlich an Merkmalen im sichtbaren Spektralbereich orientiert. In den Daedaluskanälen sind neben den RGB-Kanälen (Kanel 2,3 und 5) noch 7 weitere Kanäle. Die Informationen in diesen Kanälen habe ich bei der Erstellung der Groundtruthkarte nur an einigen Stellen hinzugezogen. Je weniger Kanäle verwendet werden, um so ähnlicher werden die Informationen, die der Algorithmus bekommt und die bei der Erstellung der Groundtruthkarte verwendet wurden. Deshalb der leichte Anstieg der Kappawerte.

An den Ergebnissen ohne Normierung auf lokale Varianz kann aber dennoch erkannt werden, dass es keinen wesentlichen Unterschied macht, mit welchen Kanalarten gearbeitet wird. Wichtig ist allerdings, dass die Kanäle im Sichtbaren und nahen Infrarot dabei sind. Der Infrarotkanal ist wegen der Vegetation in der Hauptachsentransformation wichtig.

Typ	**Ergebnisse aller Kanalarten mit HAT ohne Normierung**				
Daed.	Gefundene Objekte	: 126 von 150	Kappawert	:	0.44
	entspricht	: 84.00%	Einstufung	:	gut
	Gefundene Fläche	: 52.47%	Meinung	:	62.78
	Changepixel richtig	: 53.77%	Einstufung	:	gut
Land.	Gefundene Objekte	: 131 von 150	Kappawert	:	0.45
	entspricht	: 87.33%	Einstufung	:	gut
	Gefundene Fläche	: 59.16%	Meinung	:	65.20
	Changepixel richtig	: 51.08%	Einstufung	:	gut
Ikon.	Gefundene Objekte	: 118 von 150	Kappawert	:	0.47
	entspricht	: 78.67%	Einstufung	:	gut
	Gefundene Fläche	: 54.14%	Meinung	:	62.45
	Changepixel richtig	: 56.44%	Einstufung	:	gut
Typ	**Ergebnisse aller Kanalarten mit HAT mit Normierung**				
Daed.	Gefundene Objekte	: 13 von 150	Kappawert	:	0.32
	entspricht	: 8.67%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 27.06%	Meinung	:	32.95
	Changepixel richtig	: 64.12%	Einstufung	:	schlecht
Land.	Gefundene Objekte	: 13 von 150	Kappawert	:	0.27
	entspricht	: 8.67%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 22.80%	Meinung	:	31.16
	Changepixel richtig	: 62.97%	Einstufung	:	schlecht
Ikon.	Gefundene Objekte	: 11 von 150	Kappawert	:	0.26
	entspricht	: 7.33%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 20.07%	Meinung	:	31.76
	Changepixel richtig	: 68.84%	Einstufung	:	schlecht
Typ	**Ergebnisse aller Kanalarten mit der Varianzmethode**				
Daed.	Gefundene Objekte	: 38 von 150	Kappawert	:	0.27
	entspricht	: 25.33%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 19.92%	Meinung	:	39.72
	Changepixel richtig	: 75.12%	Einstufung	:	schlecht
Land.	Gefundene Objekte	: 48 von 150	Kappawert	:	0.30
	entspricht	: 32.00%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 23.40%	Meinung	:	42.39
	Changepixel richtig	: 73.05%	Einstufung	:	schlecht
Ikon.	Gefundene Objekte	: 55 von 150	Kappawert	:	0.34
	entspricht	: 36.67%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 28.88%	Meinung	:	44.23
	Changepixel richtig	: 68.49%	Einstufung	:	befriedigend

Tabelle 5.2: *Übersicht aller Kanalarten mit der HAT und der Varianzmethode*

5.3 MAD

In diesem Teil der Auswertung wird auf die Ergebnisse des MAD-Verfahrens eingegangen. Alle MAD-Komponenten sind mit dem Programm CDSAT entstanden. Die Endergebnisse habe ich auch hier wieder mit der Groundtruthkarte bewertet.
Da dieses Verfahren N Komponentenbilder erzeugt, welche aus allen Kanälen erzeugt werden, liegt es nahe, dass in den verschiedenen Komponenten identische Änderungen vorhanden sind. Aus diesem Grund sind im Anhang H.4 die 10 Komponenten des Stadtgebietes abgebildet, ebenso die für die Ikonos- und Landsatkanäle der Daedalusbilder. An den Komponenten der verschiedenen Bilddaten ist gut zu erkennen, wie sich die Repräsentation der Änderungen der einzelnen Komponenten verändert. Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Bilder das CDSAT-Programm nur unvollständig gearbeitet hat, mußten die Komponenten mit einem selbstgeschriebenen Schwellwertprogramm[7] vereinigt und eingefärbt werden. Als Schwellwert habe ich durch Austesten den Wert 70 genommen. Außerdem habe ich die vereinigten Bilder noch mit einem 3x3-Fenster geglättet um störende einzelne Pixel zu entfernen, die die Darstellung extrem stören.
Das Endergebnis des MAD-Verfahrens für die Daedaluskanäle ist in Abb. 5.12 dargestellt. Eine Darstellung der ersten drei Komponenten in Farbe ist im Anhang in Abb. H.2 dargestellt.

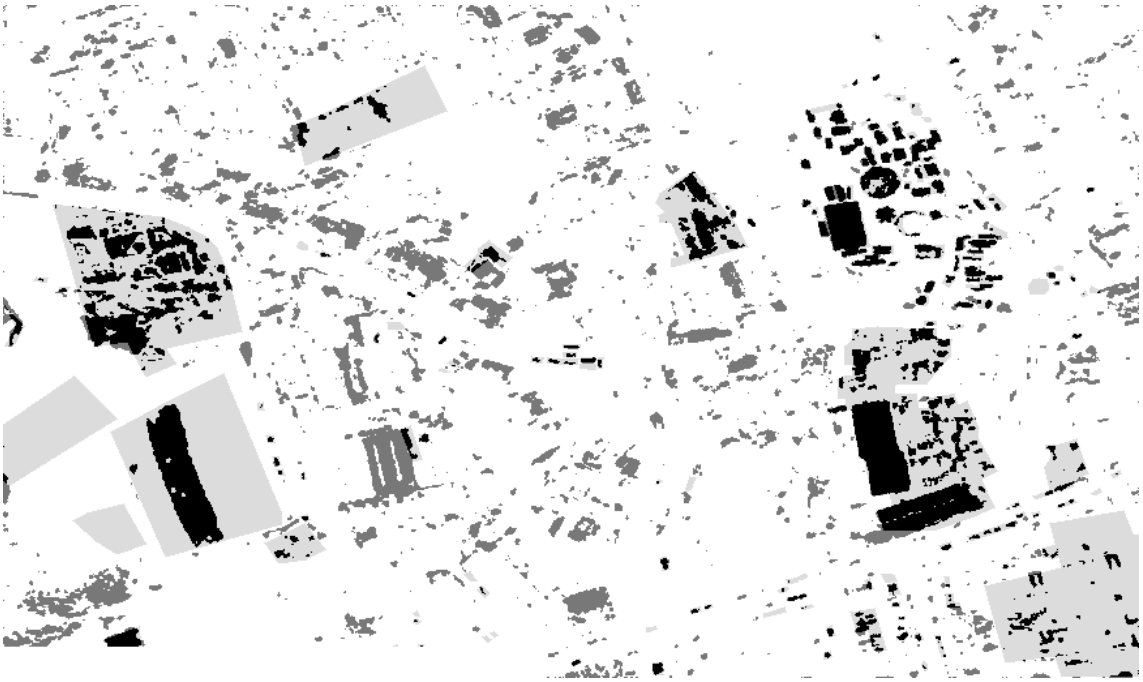


Abbildung 5.12: *Endergebnis mit der MAD-Methode der Daedaluskanäle. Der Kappawert beträgt 0.26.*

[7]Erst werden alle Komponentenbilder ODER-Verknüpft. Anschließend wird auf das Ergebnis eine Schwelle angewendet, die aus den Graustufenwerten eine Binärkarte macht (s. Anhang D showmad.pro).

Die Daedaluskanäle:

Gefundene Objekte	:	109 von 150		
entspricht	:	72.67%		
Gefundene Fläche	:	30.47%		
Changepixel richtig	:	42.58%		
Kappawert	:	**0.26**	→	**akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	48.08%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	24862	49899
NoChange	29482	348193

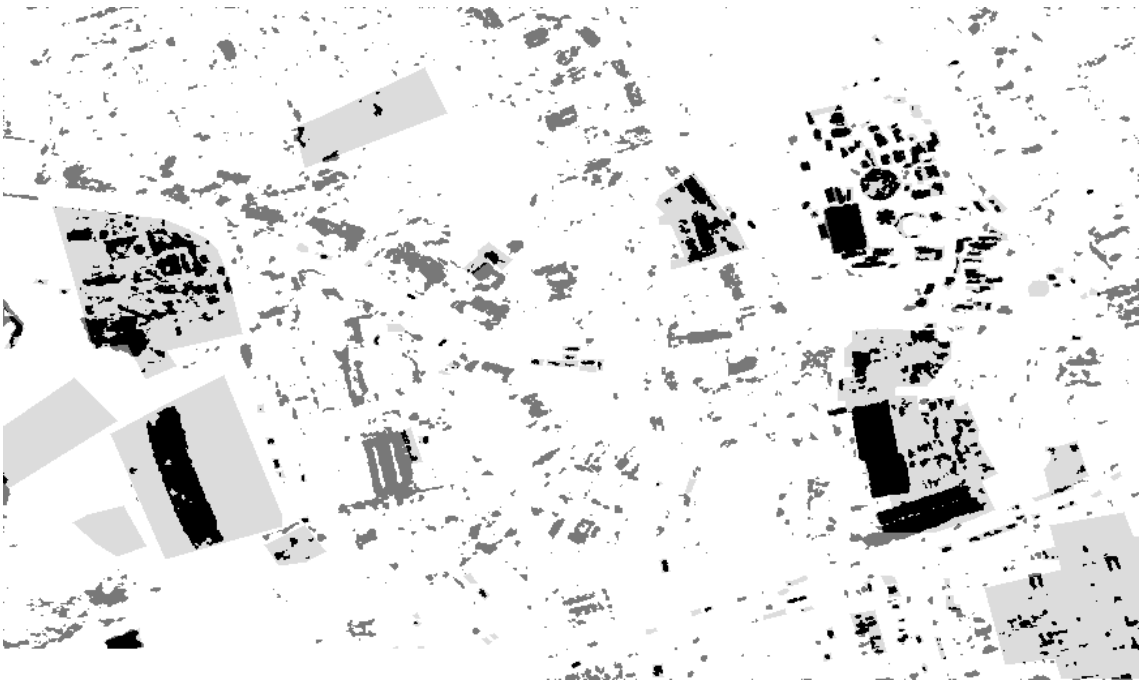


Abbildung 5.13: *Endergebnis mit der MAD-Methode der Landsatkanäle des Daedalusbildes. Der Kappawert beträgt 0.25.*

Die Landsatkanäle des Daedalusbildes:

Gefundene Objekte	:	101 von 150		
entspricht	:	67.33%		
Gefundene Fläche	:	27.90%		
Changepixel richtig	:	44.25%		
Kappawert	:	**0.25**	→	**akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	46.03%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	20024	51737
NoChange	25224	352451

Die Ikonoskanäle des Daedalusbildes:

Gefundene Objekte	:	93 von 150		
entspricht	:	62.00%		
Gefundene Fläche	:	27.73%		
Changepixel richtig	:	50.79%		
Kappawert	:	**0.28**	→	**akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	46.37%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	19898	51863
NoChange	19278	358397

Es werden alle wesentlichen Änderungen gefunden. Das Verfahren scheint aber gegenüber unterschiedlich starken Änderungen ähnlich sensitiv zu sein. Schwache Änderungen findet es genauso wie starke Änderungen. Deshalb findet das Verfahren mehr

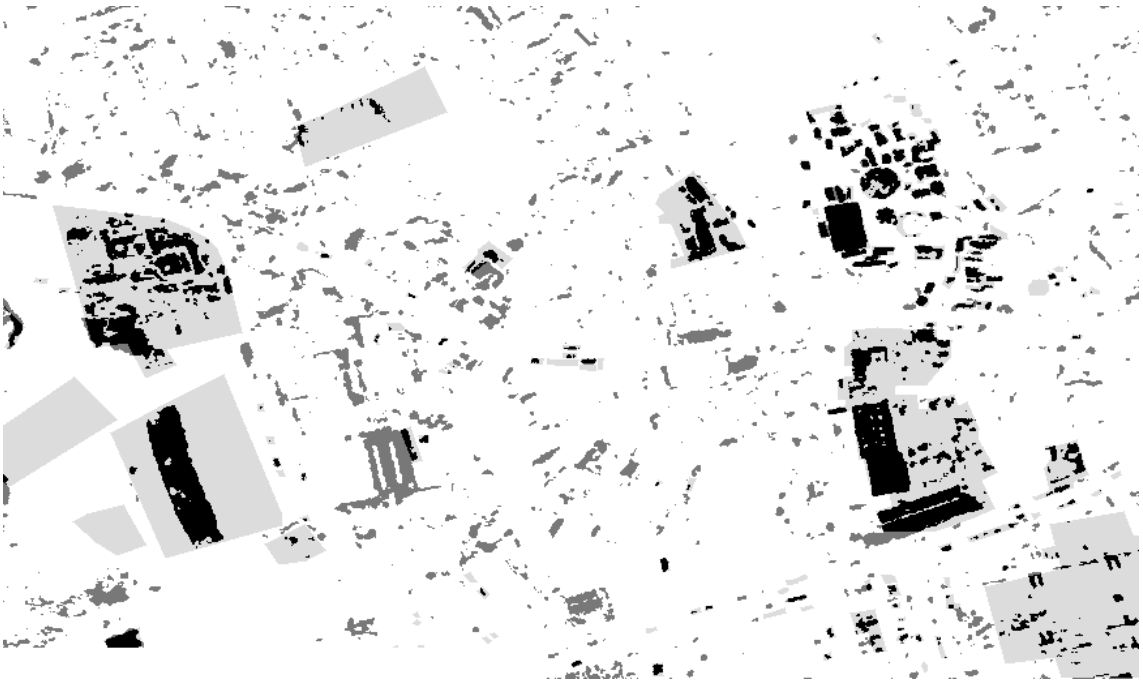


Abbildung 5.14: *Endergebnis mit der MAD-Methode der Ikonoskanäle des Daedalusbildes. Der Kappawert beträgt 0.28.*

Änderungen, als die Hauptachsentransformation. Wird die Schwelle erhöht, so werden die fehlklassifizierten Änderungen zwar nicht mehr angezeigt, aber die wirklichen Änderungen auch nicht.

Das Ergebnis für den Kappawert ist aber um ca. 20 Prozentpunkte schlechter als bei der Hauptachsentransformation. Das kann an der Art der Vereinigung der Komponentenbilder liegen, bzw. an der Schwellwertbildung. An einer Verbesserung des MAD-Programms wird derzeit gearbeitet.

5.4 Flughafenbilder

In diesem Abschnitt wird eine Teilszene ausgewertet, in der Änderungen künstlicher Flächen vorhanden sind, wie z.B. Umbauarbeiten und Parkplätze.
Dazu werden Ausschnitte aus den Jahren 1991 und 1995 verwendet. Es handelt sich hierbei um 900m Bilder, die den Flughafen von Nürnberg darstellen.

5.4.1 Auswertung

Im Folgenden werden auch hier alle drei Methoden (Varianzbildung, HAT und MAD) auf den Flughafenausschnitt angewendet. Um die Methoden gleich bewerten zu können, werden sie wieder mit einer selbst erstellten Groundtruthkarte (Abb. 5.16)

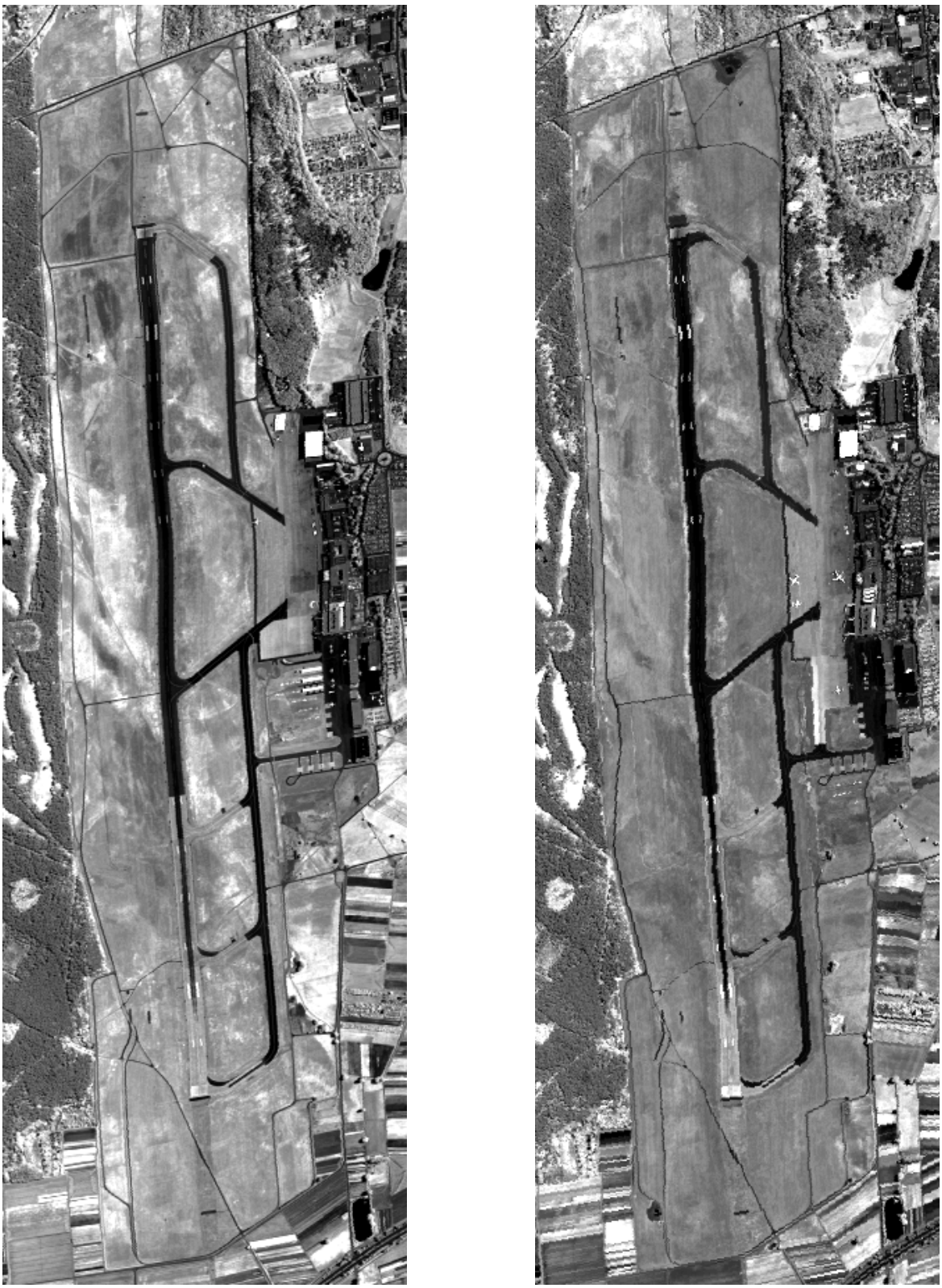


Abbildung 5.15: *Flughafenausschnitt der Stadt Nürnberg. Links ist das Jahr 1991 dargestellt und rechts das Jahr 1995. Jeweils Kanal 7.*

Nr	Bildinhalt Szene 1991	Bildinhalt Szene 1995	Kommentar
1	Felder	Felder	umgepflügt
2	Betonfläche	Betonfläche	erneuert
3	Felder	Felder	umgepflügt
4	Rasenfläche	Betonfläche	Ausbau des Flughafens
5	Keine Flugzeuge	Flugzeuge	
6	Feld	Parkplatz	
7	See	See	
8	Wiese	Wiese	Trocken bzw. feucht
9	Wiese	Beton	Erweiterung der Landebahn
10	Betonfläche	Betonfläche	Erneuerung
11	Wiese	Sandfläche	
12	Gebäude	Gebäude	Neubau/Umbau
13	Fahrzeuge	Fahrzeuge	verschiedene Positionen

Tabelle 5.3: *Übersicht über die Änderungen, die in der Flughafen Groundtruthkarte Abb. 5.16 verzeichnet sind.*

und dem sich damit ergebenden Kappa-Wert (Kap. 4.9.2) verglichen. Die Änderungen in diesem Bildausschnitt sind in Tab. **??** beschrieben.

5.4.2 Varianzmethode

An dem Ergebnis (s. Abb. 5.17) kann erkannt werden, dass nur im unteren rechten Bereich des Bildes Änderungen gefunden worden sind. Flächen konstanter Spektralwerte findet dieser Algorithmus nicht. Deshalb auch nicht die erneuerte Flughafenfläche (2), (9) und (4). Einige geänderte Felder findet dieses Verfahren in dieser Szene auch nicht.

Gefundene Objekte	:	21 von 82		
entspricht	:	25.61%		
Gefundene Fläche	:	26.77%		
Changepixel richtig	:	57.55%		
Kappawert	:	**0.33**	→	**akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	36.28%	→	**schlecht**

Konf.	Change	NoChange
Change	5539	15154
NoChange	4085	236540

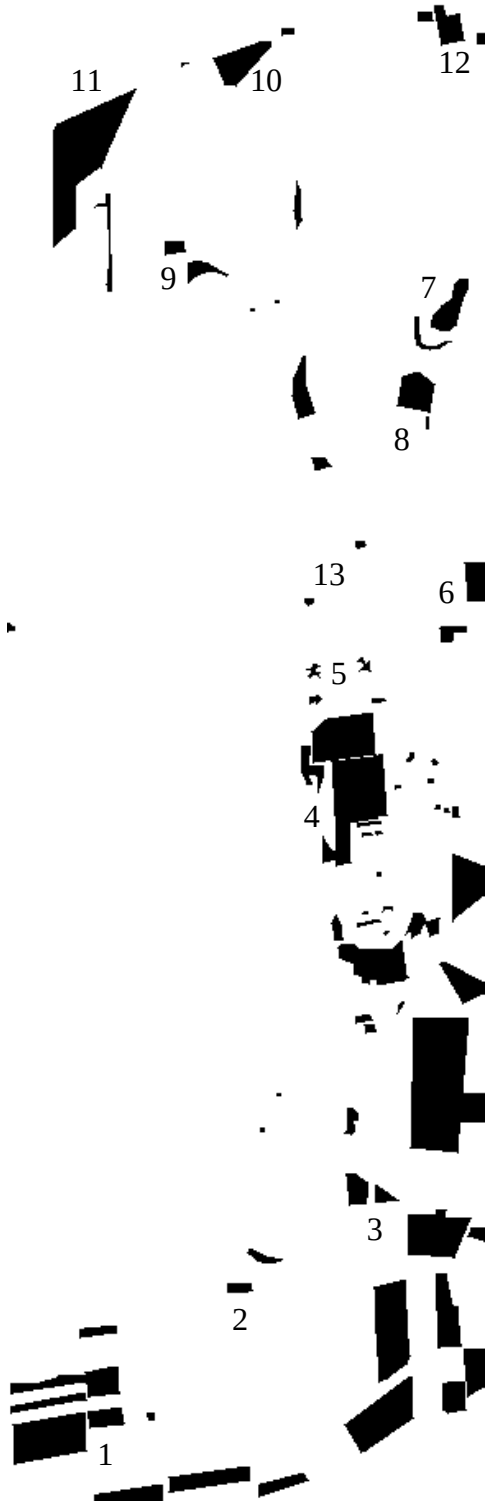


Abbildung 5.16: *Groundtruthkarte zur Änderung zwischen den Bildern der 'Flughafenausschnitt'. Eine nähere Beschreibung der durch Nummern gekennzeichneten Änderungen findet sich in Tab. 5.3*

Abbildung 5.17: *Endergebnis der Änderungsdetektion mit der Varianzmethode.*

5.4.3 Hauptachsentransformation

Ohne Normierung:

Das Ergebnis (s. Abb. 5.18 l., Abb. G.4 l.) ohne Normierung ist gut. Es werden alle größeren Änderungen gefunden. Vegetation findet das Verfahren nur teilweise. Es werden auch alle Flugzeuge (5) gefunden.

Endergebnis ohne Normierung auf lokale Varianz:

Gefundene Objekte	:	49 von 82		
entspricht	:	59.76%		
Gefundene Fläche	:	46.60%		
Changepixel richtig	:	66.03%		
Kappawert	:	**0.51**	→	**gut**
Eigene Einstufung	:	56.89%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	9643	11050
NoChange	4960	235665

Mit Normierung:

Mit Normierung ist das Ergebnis (s. Abb. 5.18 r., Abb. G.4 r.) wie erwartet schlechter. Es werden wesentlich mehr Änderungen in der Vegetation gefunden.

Endergebnis mit Normierung auf lokale Varianz:

Gefundene Objekte	:	28 von 82		
entspricht	:	34.15%		
Gefundene Fläche	:	33.92%		
Changepixel richtig	:	37.91%		
Kappawert	:	**0.30**	→	**akzeptabel**
Eigene Einstufung	:	34.97%	→	**schlecht**

Konf.	Change	NoChange
Change	7018	13675
NoChange	11496	229129

5.4.4 Landsat- und Ikonoskanäle

Zum Vergleich werden alle Ergebniswerte außer den Konfusionsmatrizen für die Landsat- und Ikonoskanäle der Daedalusbilder gezeigt, sowie für die Daedaluskanäle selber dargestellt. Wie im Teil des Stadtgebietes sind hier alle Kanalarten und Methoden in Form einer Tabelle abgebildet.
Die Ergebnisse der HAT sind mit einer Fenstrgröße von 3x3 enstanden, während die der Varianzmethode mit einem 11x11-Fenster entstanden sind.

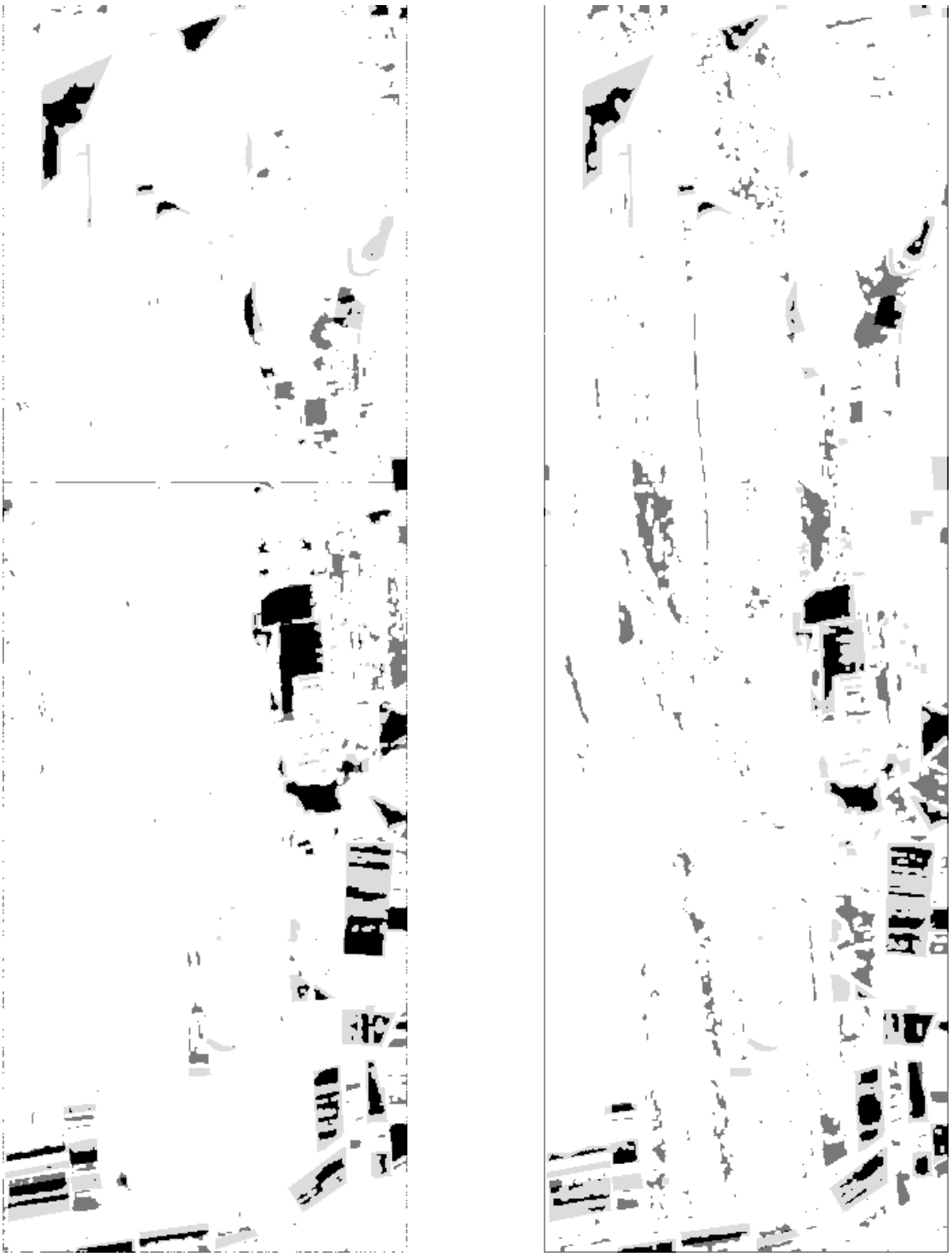


Abbildung 5.18: *Endergebnisse der Änderungsdetektion mit der HAT ohne Normierung auf lokale Varianz (links) und mit Normierung (rechts) mit einer Fenstergröße von 3x3.*

Typ	**Ergebnisse aller Kanalarten ohne Normierung**				
Daed.	Gefundene Objekte	: 49 von 82	Kappawert	:	0.51
	entspricht	: 59.76%	Einstufung	:	gut
	Gefundene Fläche	: 46.60%	Meinung	:	56.89
	Changepixel richtig	: 66.03%	Einstufung	:	befriedigend
Land.	Gefundene Objekte	: 52 von 82	Kappawert	:	0.57
	entspricht	: 63.41%	Einstufung	:	gut
	Gefundene Fläche	: 54.43%	Meinung	:	60.95
	Changepixel richtig	: 66.84%	Einstufung	:	gut
Ikon.	Gefundene Objekte	: 41 von 82	Kappawert	:	0.44
	entspricht	: 50.00%	Einstufung	:	gut
	Gefundene Fläche	: 35.96%	Meinung	:	50.30
	Changepixel richtig	: 66.45%	Einstufung	:	befriedigend
Typ	**Ergebnisse aller Kanalarten mit Normierung**				
Daed.	Gefundene Objekte	: 28 von 82	Kappawert	:	0.30
	entspricht	: 34.15%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 33.92%	Meinung	:	34.97
	Changepixel richtig	: 37.91%	Einstufung	:	schlecht
Land.	Gefundene Objekte	: 26 von 82	Kappawert	:	0.34
	entspricht	: 31.71%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 31.71%	Meinung	:	36.96
	Changepixel richtig	: 48.56%	Einstufung	:	schlecht
Ikon.	Gefundene Objekte	: 23 von 82	Kappawert	:	0.25
	entspricht	: 28.05%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 26.26%	Meinung	:	29.79
	Changepixel richtig	: 35.95%	Einstufung	:	schlecht
Typ	**Ergebnisse aller Kanalarten mit der Varianzmethode**				
Daed.	Gefundene Objekte	: 21 von 82	Kappawert	:	0.33
	entspricht	: 25.61%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 26.77%	Meinung	:	36.28
	Changepixel richtig	: 57.55%	Einstufung	:	schlecht
Land.	Gefundene Objekte	: 29 von 82	Kappawert	:	0.36
	entspricht	: 35.37%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 33.28%	Meinung	:	39.47
	Changepixel richtig	: 50.95%	Einstufung	:	schlecht
Ikon.	Gefundene Objekte	: 22 von 82	Kappawert	:	0.26
	entspricht	: 26.83%	Einstufung	:	akzeptabel
	Gefundene Fläche	: 23.47%	Meinung	:	30.40
	Changepixel richtig	: 41.81%	Einstufung	:	schlecht

5.4.5 MAD

Die Endergebnisse der MAD-Methode. Genauso wie bei der Zirkusszene wurden wieder die Komponentenbilder mit dem selbstgeschriebenen Programm vereinigt. Der Schwellwert beträgt 70 und die Fenstergröße ist 3x3.
Das Ergebnis mit den Daedaluskanälen (s. Abb. 5.19 l.):

Gefundene Objekte	:	49 von 82		
entspricht	:	59.76%		
Gefundene Fläche	:	38.65%		
Changepixel richtig	:	55.56%		
Kappawert	:	**0.42**	→	**gut**
Eigene Einstufung	:	50.81%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	7997	12696
NoChange	6396	234229

Das Ergebnis mit den Landsatkanälen des Daedalusbildes:

Gefundene Objekte	:	56 von 82		
entspricht	:	68.29%		
Gefundene Fläche	:	48.91%		
Changepixel richtig	:	53.55%		
Kappawert	:	**047**	→	**gut**
Eigene Einstufung	:	56.35%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	10120	10573
NoChange	8777	231848

Das Ergebnis mit den Ikonoskanälen des Daedalusbildes (s. Abb. 5.19 r., Abb. H.3 r.):

Gefundene Objekte	:	48 von 82		
entspricht	:	58.54%		
Gefundene Fläche	:	38.21%		
Changepixel richtig	:	55.64%		
Kappawert	:	**0.42**	→	**gut**
Eigene Einstufung	:	50.29%	→	**befriedigend**

Konf.	Change	NoChange
Change	7907	12786
NoChange	6305	234320

Die Ergebnisse sind gut. Es werden zwischen der Hälfte und einem Drittel aller Änderungen gefunden, die in der Groundtruthkarte verzeichnet sind. Die gefundenen Änderungen sind allerdings teilweise ein wenig schwach ausgeprägt. Im Anhang sind die ersten drei Komponenten in Farbe dargestellt (Abb. H.1).

Abbildung 5.19: *Endergebnis des MAD-Verfahrens mit den Daedaluskanälen (links) und den Ikonos-Kanälen des Daedalusbildes (rechts).*

5.5 Wenn zuviel Änderung

Die 1. Hauptachse wird aus allen Pixeln eines Kanals bestimmt. Eine Voraussetzung für akzeptable Ergebnisse ist eine nicht zu große Änderung in den Bildern. Doch was passiert, wenn dieser Fall nicht gegeben ist. Ein großes Problem ist die Vegetation. Werden zwei Bilder miteinander verglichen, die zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgenommen worden sind, so wird die Vegetation unterschiedlich sein. Bei solchen Bildern kann es schnell passieren, dass durch die Vegetation mehr Änderung im Bild vorhanden ist, als der Algorithmus vertragen kann. Die 1. Hauptachse kommt nicht durch die NoChange-Pixel zum liegen, sondern durch die Change-Pixel. Das hat zur Folge, das die meisten der nichtgeänderten Pixel als Änderung angezeigt werden und umgekehrt. Einer Invertierung kommt dies aber nicht gleich, da in dem Bereich, in dem sich die richtige 1. Hauptachse und die falsch gefundene 1. Hauptachse schneiden, die Klassifizierung richtig ist.

Ein Beispiel für den Fall von viel Änderung. Es kann gut erkannt werden, dass der ganze Bildinhalt Einfluss auf den Algorithmus hat.
In Abb. 5.20 (links) sind die Bildausschnitte dargestellt, mit denen der Extremfall demonstriert werden soll. Wird auf diese Ausschnitte die HAT mit Normierung auf lokale Varianz (s. Abb. 5.20 mitte oben) und ohne (s. Abb. 5.20 mitte unten) angewendet, so ist das Ergebnis nicht zu gebrauchen. Wie in den Hauptachsendiagrammen (Abb. 5.23) zu sehen ist, weichen die Achsen sehr stark von der Diagonalen ab. So werden alle Pixel, die auf dieser Achse liegen, als NoChange klassifiziert, obwohl sie eine starke Änderung repräsentieren. Die Unterschiede zwischen dem Ergebnis mit Normierung und dem ohne haben mit der Hauptachse nichts zu tun.
In Abb. 5.20 rechts sind die Ausschnitte aus den Ergebnisbildern von Abb. 5.6 und Abb. 5.5 zum Vergleich dargestellt.
In Abb. 5.23 sind die Hauptachsen für den Zirkusausschnitt für alle 10 Kanäle dargestellt. In Abb. 5.24 die Hauptachsen des gesamten Stadtgebietes, welche in Kap. 5.2 verwendet wurde. An diesen Diagrammen ist der Einfluss von unterschiedlichen Anteilen von Änderung auf die Hauptachse deutlich zu erkennen.

Die Schlussfolgerung aus diesem Beispiel ist, dass sich nicht zuviel geändert haben darf. Ab ca. 20% Änderung fängt dieses Verfahren an instabil zu werden. Das ist bei der Varianzbildung nicht der Fall. Da sie unabhängig von der Gesamtszene[8] ist, muß ihr Ergebnis schon besser sein. In Abb. 5.21 ist das Ergebnis der Varianzbildung dargestellt. Es werden alle Änderungen problemlos gefunden. Das große viereckige Zelt zeigt sich auf Grund der Kantendetektionseigenschaften dieser Methode nur als Umriß.

[8] Pixel werden nur in einem kleinen Fenster betrachtet

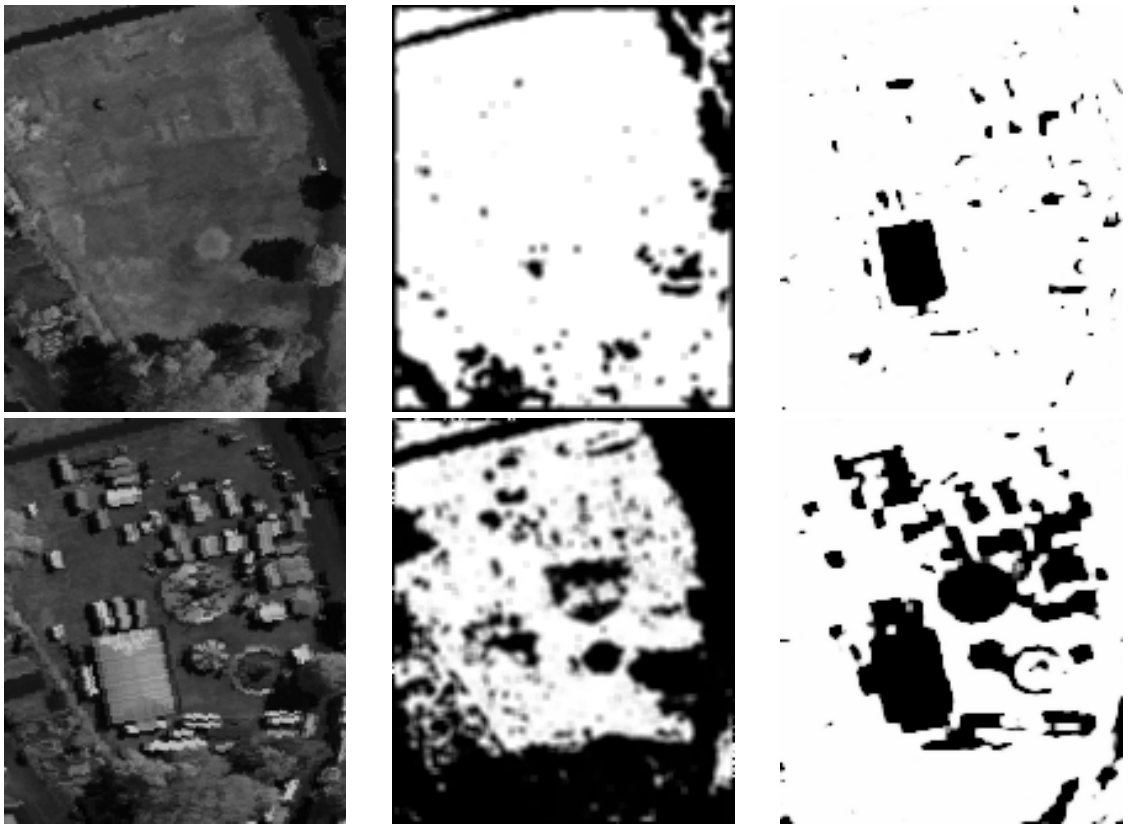


Abbildung 5.20: *Der Zirkusausschnitt, an dem gezeigt werden soll, welche Auswirkung zuviel Änderung in den Bilddaten hat. Links oben ist der Ausschnitt aus dem Jahre 1991 dargestellt. Darunter das Jahr 1995. In der Mitte oben das Ergebnis der HAT mit 3x3-Fenster und Normierung auf lokale Varianz. Darunter ensprechend ohne Normierung. Rechts die Ausschnitte aus Abb. 5.6 und Abb. 5.5 der Endergebnisse der Gesamtszene auch wieder mit Normierung (oben) und ohne (unten)*

Abbildung 5.21: *Das Endergebnis mit der Varianzmethode bei einer Fenstergröße von 3x3 ist mit dem Programm Changemap (Gaußfit mit scale=3) entstanden, da der Maximum-Likelihood-Klassifier kein Endergebnis gebracht hat. Das große Zelt (leicht gedrehtes viereckiges Objekt) kommt hier nur durch seine Außenkanten zum vorschein. Das liegt daran, daß innerhalb der Flächen kaum Varianz vorhanden ist. Alle anderen schwarzen Flächen deuten daraufhin, dass hier eine starke Textur vorhanden ist.*

Abbildung 5.22: *Das Ergebnis des MAD-Verfahrens. Es hat die wesentlichen Änderung gefunden. Die gefundenen Flächen sind teilweise nicht gut ausgeprägt. Aber auch hier werden schwache Änderungen genauso angezeigt wie starke Änderungen.*

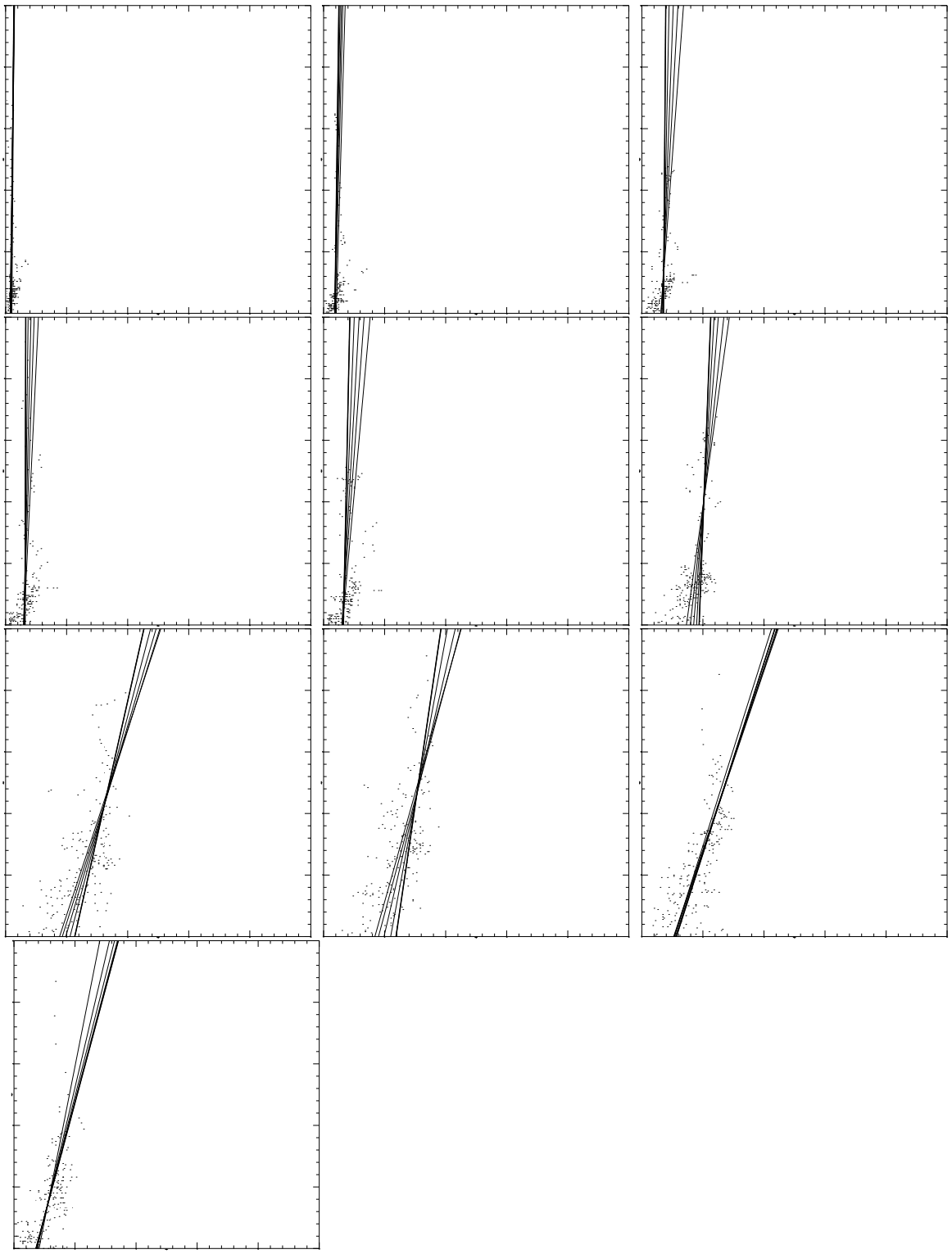


Abbildung 5.23: *Die 10 Hauptachsen der HAT-Transformation angewendet auf den Zirkusauschnitt. Es handelt sich um einen Ausschnitt, der viel Änderung enthält. In sämtlichen Kanälen weichen die gefundenen 1. Hauptachsen stark von den realen NoChange-Achsen (s. Abb. 5.24) ab. Die dicke Linie ist jeweils die resultierende Hauptachse.*

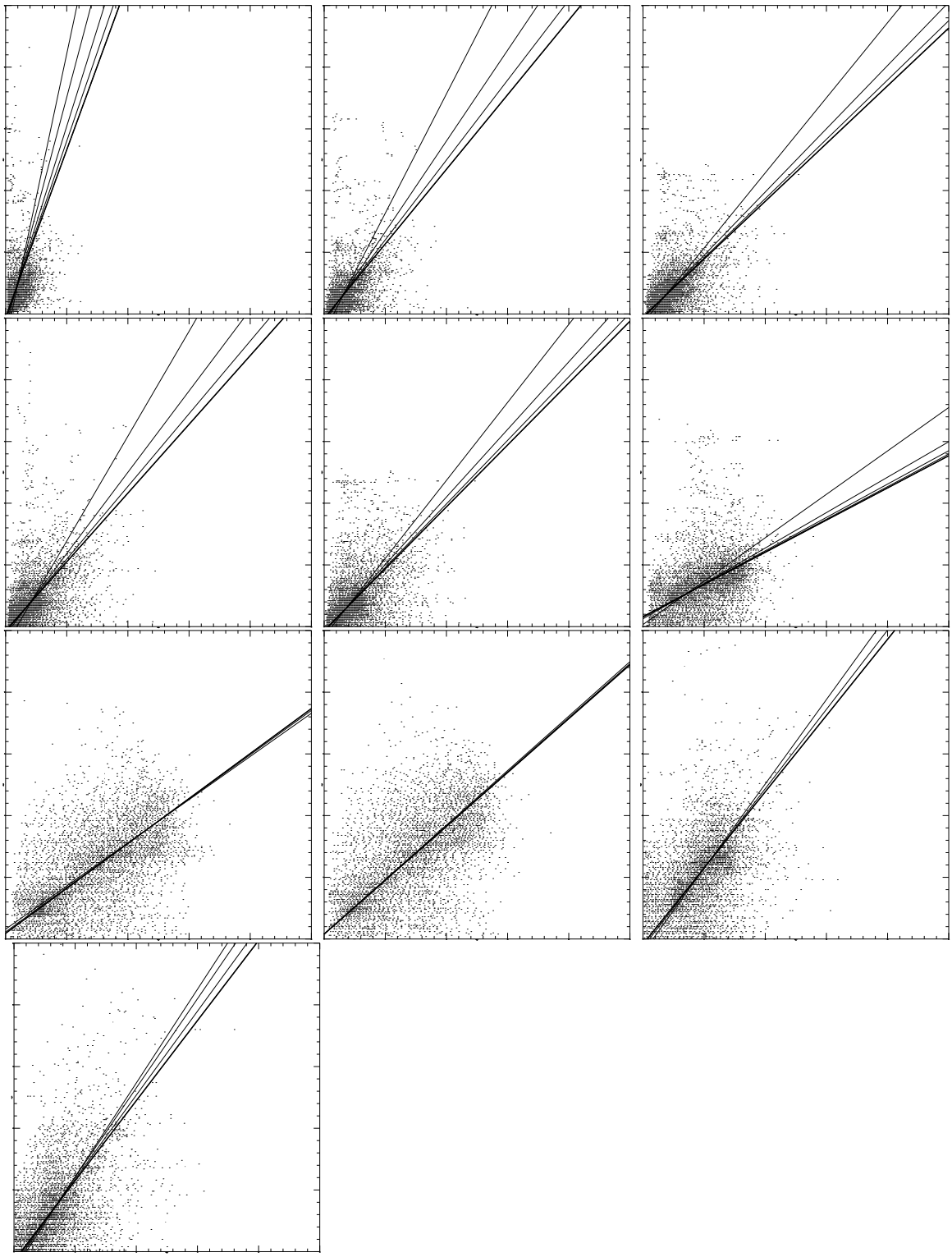


Abbildung 5.24: *Die 10 Hauptachsen der HAT-Transformation angewendet auf das komplette Stadtgebiet. Die dicke Linie ist jeweils die resultierende Hauptachse.*

5.6 Großer Vegetationsanteil

Die Vegetation kann zu Schwierigkeiten bei der Änderungsdetektion führen. (s. Kap. 5.2.3), wenn sehr viel Vegetationspixel in einer Bildszene vorhanden sind. Sind allerdings in den Nichtvegetationspixeln relativ viele Änderungspixel, so hat die Benutzung einer NDVI-Maske (s. Abb. 5.26) fatale Folgen, denn durch das Ausblenden der Vegetation kommt die Hauptachse falsch zu liegen. In einem solchen Fall ist es ratsamer die Vegetation nicht auszublenden, da sich in der Vegetation prozentual weniger geändert hat, als in den Nichtvegetationsbereichen. In diesem Fall stabilisiert die Vegetation die Hauptachse.
In dem folgenden Auschnitt beträgt der Vegetationsanteil 88% des Gesamtbildes. Diese Ausschnitte sind am 18.10.1994 um 11:16 und 26.08.1997 um 11:11 aufgenommen worden. Es handelt sich um 300m-Aufnahmen.
Im wesentlichen haben sich zwischen diesen beiden Bildern die Felder und die Wiesen verändert. Der See ist im Jahr 1994 klar und dunkel und wirkt im Jahre 1997 grünlich. In diesem Jahr waren viele Algen im See vorhanden. Die Sandwege haben sich nicht geändert. In der Kleingartensiedlung sind Registrierfehler vorhanden, die aufgrund von Schatten und Projektionseffekten nicht entfernt werden konnten.
Oben links von dem Teich ist im Bild von 1997 ein etwas heller Bereich auf der Rasenfläche zu erkennen. Es handelt sich um eine Schafherde, welche auch eine Änderung darstellt.

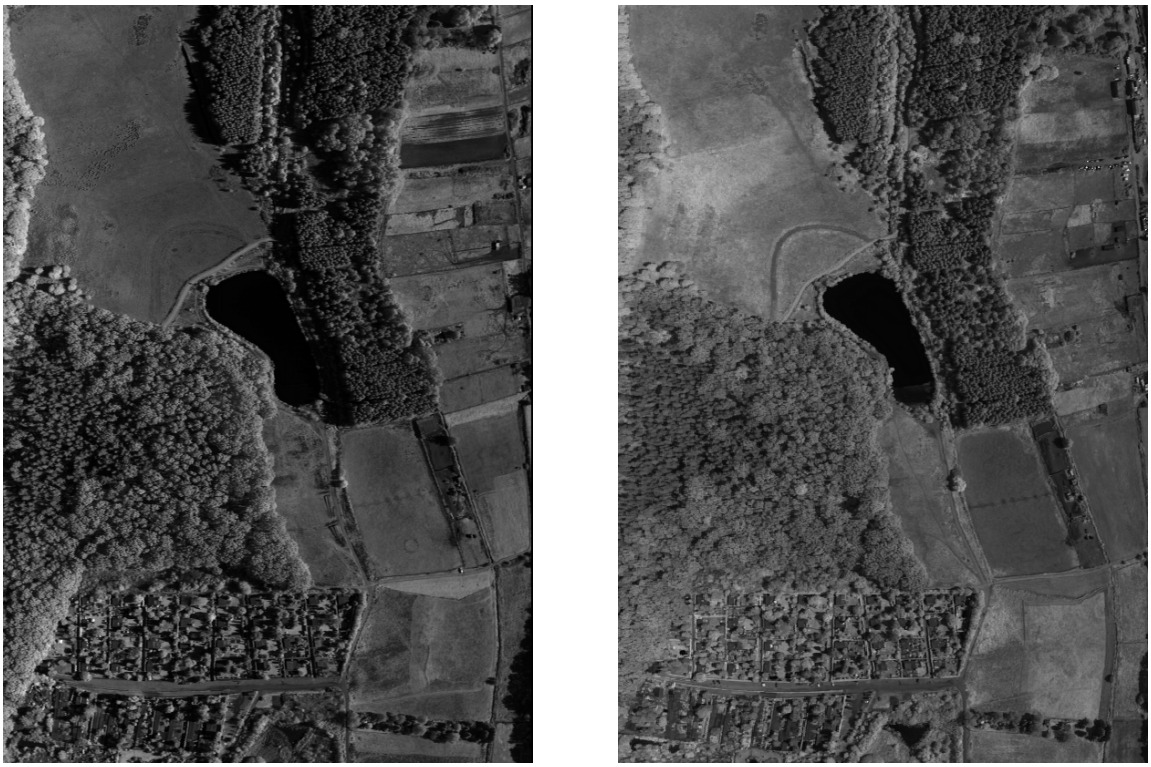


Abbildung 5.25: *Ein Beispiel für eine Szene mit sehr viel Vegetation. Dies sind Ausschnitte aus den Jahren 1994 (links) und 1997 (rechts) von Nürnberg.*

5.6.1 Varianzmethode

Diese Methode liefert ein akzeptables Ergebnis (s. Abb. 5.27). Es werden alle wesentlichen Änderungen gefunden. Es darf aber keine kleine Fenstergröße verwendet werden, da sonst nur die Kanten der geänderten Flächen gefunden werden.

Abbildung 5.26: *Ein Beispiel für eine Szene mit sehr viel Vegetation. An dieser NDVI-Maske sieht man, wieviel Vegetation in beiden Bildern vorhanden ist. Alle schwarzen Pixel sind Nichtvegetationspixel. Die Vegetationspixel machen 88% des Gesamtbildes aus.*

Abbildung 5.27: *Die Vegetationsszene mit der Varianzbildungsmethode. Mit einer Fenstergröße von 11x11 kommen mit diesem Algorithmus die von mir angedeuteten Änderungen hervor.*

5.6.2 Hauptachsentransformation

Die Änderungsdetektion mit der Hauptachsentransformation erfolgte bei diesem Ausschnitt ebenfalls mit und ohne Normierung auf lokale Varianz. Die Bestimmung der Änderung erfolgte sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der NDVI-Maske. An dieser Vegetationsszene möchte ich verdeutlichen, welchen Einfluss die Vegetation auf die Änderungsdetektion hat. Eine Groundtruthkarte habe ich nicht erstellt, da es mehr als zweifelhaft ist, eine richtige Beurteilung über die Änderungen in der Vegetation zu geben.
In Abb. 5.28 sind die Ergebnisse der HAT mit und ohne Normierung auf lokale Varianz dargestellt. Mit Normierung ist wesentlich mehr Änderung detektiert worden,

als ohne.
In dem Stadtgebiet war es genau umgekehrt. Das liegt an der Lage der Hauptachse. Die Rasenflächen in dieser Vegetationsszene haben sich kaum verändert. Die entsprechenden Pixel im Merkmalsraum liegen in der Nähe der idealen 1. Hauptachse. In Wirklichkeit liegt die gefundene 1. Hauptachse weit abseits. So werden Pixel, die sich kaum geändert haben als Änderung angesehen.
In dem Endergebnis ohne NDVI-Maske und ohne Normierung (s. Abb. **??** r.) fallen die Sandwege sofort ins Auge. Hierbei handelt es sich zum einen um Registrierfehler und zum anderen kommt hier der Effekt der falschliegenden Hauptachse zum hinzu. Die Sandwege haben sich spektral nicht geändert; die Vegetationsflächen schon, deshalb liegen die Sandpixel etwas weiter von der 1. Hauptachse ab und stellen somit eine Änderung dar.
Eine farbige Darstellung ohne NDVI-Maske ist im Anhang in Abb. G.1 dargestellt. Links ohne Normierung und rechts mit Normierung auf lokale Varianz.

Abbildung 5.28: *Hauptachsentransformation mit Normierung auf lokale Varianz (links). Im Gegensatz zur Zirkusszene findet der Algorithmus jetzt mehr Änderungen. Das Ergebnis ohne Normierung (rechts) ist auch hier besser.*

5.6.3 Hauptachsentransformation mit NDVI-Maske

Wie in Kap. 5.2.3 wurde auch für diesn Ausschnitt die HAT mit NDVI-Maske angewendet, sowohl mit Normierung auf lokale Varianz (s. Abb. 5.29) und ohne Normierung (s. Abb. **??**). Es ist ein deutlicher Unterschied zu sehen zwischen der HAT

mit NDVI-Maske und ohne NDVI-Maske. Während bei der HAT ohne NDVI-Maske die Ergebnisse nahezu identisch sind, was auch nicht verwunderlich ist, sind die Ergebnisse mit NDVI-Maske nicht sehr zufriedenstellend. Nur das Ergebnis mit Normierung kommt den wahren Änderungen am nächsten. Schaut man sich die Hauptachsen an (ohne NDVI-Maske Abb. **??**, mit NDVI-Maske 5.29), so ist schon dort ein Unterschied zu erkennen. Unter Berücksichtigung der Vegetation (HAT ohne NDVI-Maske) beeinflusst die Vegetation das Ergebnis trotzdem nur gering. Das liegt daran, daß die Vegetation mit ihren 88% Anteil nicht viel in dem Bild übrig läßt. Der markanteste Unterschied ist der Teich und die Sandwege, bzw. die Kleingartensiedlung. Durch den Einfluss der Vegetation wird der Sandweg als Änderung erkannt. Ohne Vegetationspixel macht der Sandweg einen großen Teil der Szene aus und beeinflusst somit seinerseits die Hauptachse. Der Teich weist höhere Varianzen auf und erscheint deshalb in den Ergebnissen mit Normierung wesentlich stärker.

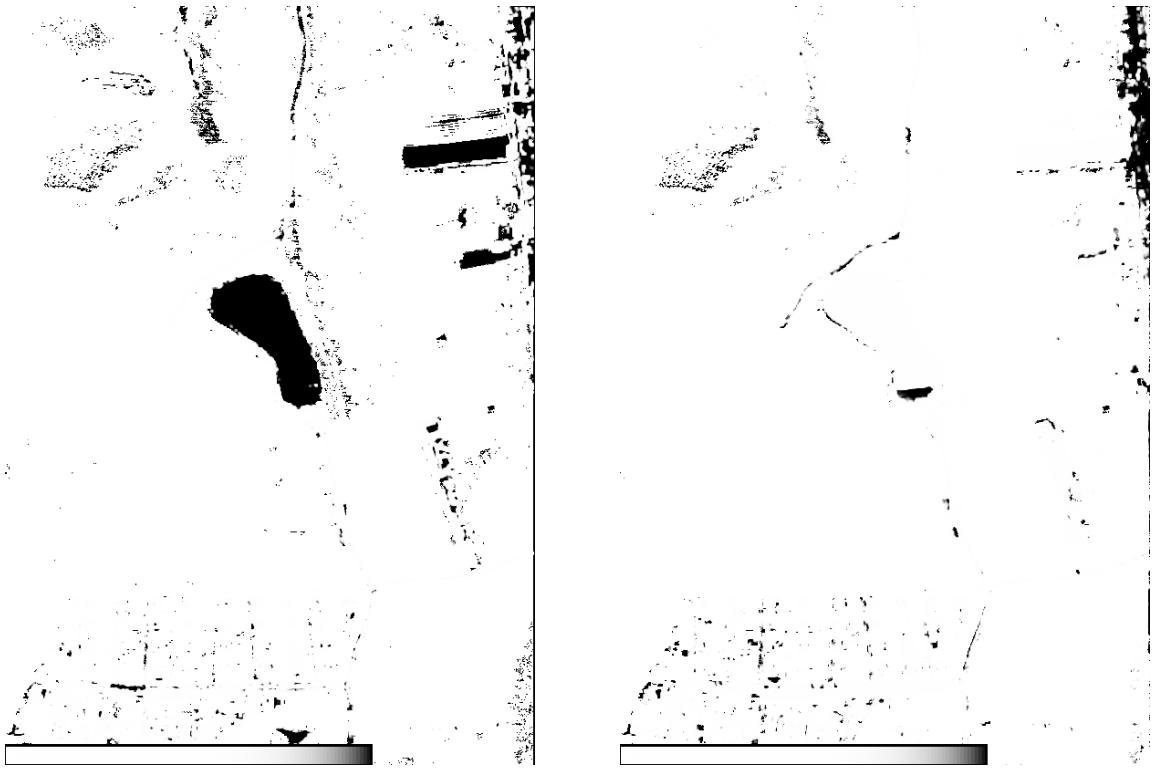


Abbildung 5.29: *Endergebnis der Änderungsdetektion mit HAT mit NDVI-Maske und mit Normierung aus lokale Varianz (links) und ohne Normierung (rechts).*

Der Teich beeinflusst seinerseits auch die Hauptachse, deshalb ist er mit NDVI-Maske und ohne Normierung (s. Abb. 5.29 rechts) nicht als Änderung gefunden worden. Genauso wie das Feld an der rechten Seite, welches ins Bild hineinragt.

Abbildung 5.30: *Endergebnis der Änderungsdetektion mit Hauptachsentransformation ohne NDVI-Maske und mit Normierung auf lokale Varianz (links) und ohne Normierung (rechts). Anschließend wurden die Ergebnisse mit der NDVI-Maske multipliziert.*

5.6.4 MAD

Wie verhält sich dieses Verfahren jetzt bei so viel Vegetation?
Auch hier wurde wieder das MAD-Verfahren angewandt und es wurden die 10 Komponentenbilder mit dem Schwellwert 70 zusammengefasst. Um den Unterschied zwischen dem geglätten und dem ungeglätteten Endbild darzustellen wurden hier beide Ergebnisbilder dargestellt (s. Abb. 5.31). Im Anhang sind die ersten drei Komponenten farbig abgebildet.
Es werden auch hier wieder ohne Verwendung einer NDVI-Maske die Wege gefunden. Der Teich kommt kaum zum Vorschein. In der Kleingartensiedlung machen sich die Registrierfehler stark bemerkbar. Trotz des Glättens des Endergebnisses kommen die leichten Missregistrierungen an den Sandwegen zum Vorschein. Die gefundenen Sandwege haben in den Bildern einen Versatz von rund drei Pixeln. Diese Registrierfehler konten nicht entfernt werden.

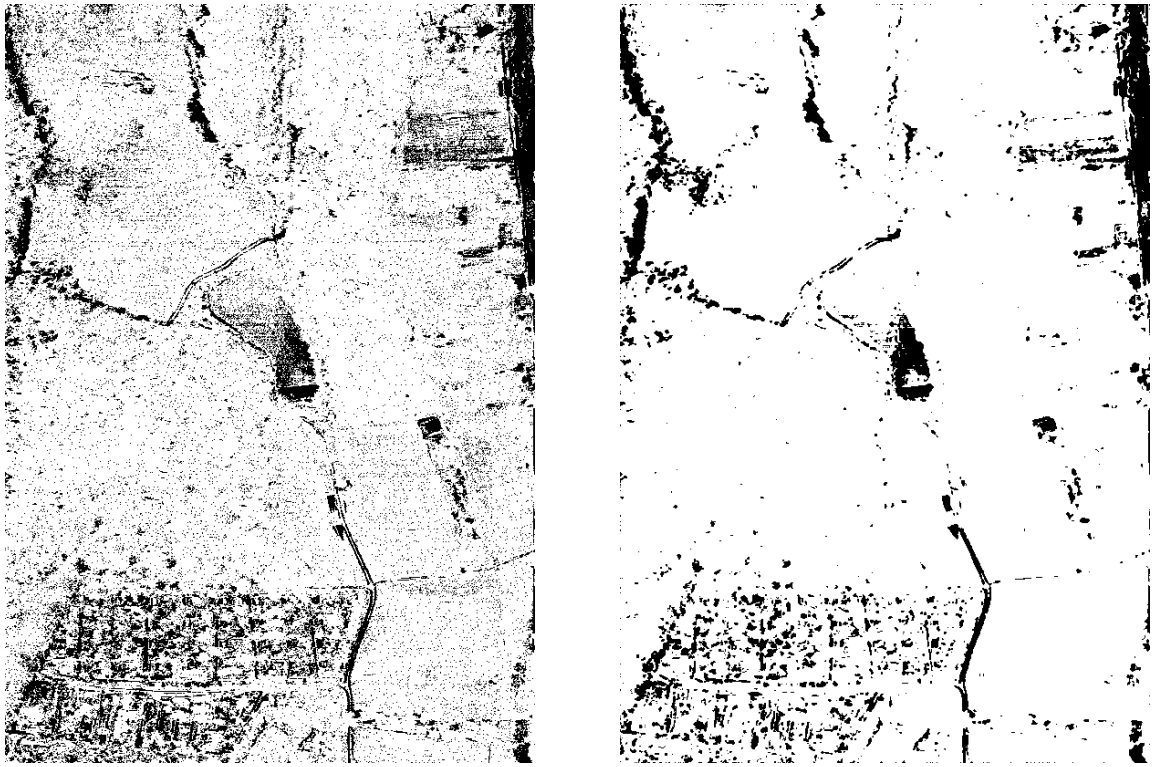


Abbildung 5.31: *Endergebnis der Änderungsdetektion mit der MAD-Methode ohne Glättung (links) und mit Glättung (rechts). Die Glättung wurde mit einem 3x3-Fenster durchgeführt.*

5.7 Empfehlung für Parameter und Algorithmen (HAT, Varianz)

Bei einer Registriergenauigkeit von einem Pixel kann grundsätzlich eine Fenstergröße von 3x3 Pixeln verwendet werden. Wird eine Änderungsdetektion mit der Varianzmethode durchgeführt, so empfiehlt sich eine Fenstergröße von 11x11 Pixeln, da ein zu kleines Fenster nur die Kanten der Änderungsgebiete hervorhebt.
Die Grundeinstellungen sind bei der Hauptachsentransformation:

- **5** Iterationen
- Fenstergröße von **3x3**
- **keine** Normierung auf lokale Varianz
- Varianzschwelle **1.0** (s. Kap. 4.6.2)

Die Normierung auf lokale Varianz hat sich in keiner der behandelten Szenen als besser erwiesen, deshalb ist meine Empfehlung diesen Parameter nicht zu ändern.

Für die Varianzmethode ist eine Fenstergröße von 11x11 Pixel zu empfehlen. Ein kleinere Fenstergröße ist für das verwendete Bildmaterial nicht zu empfehlen. Es würden nur Kanten der Änderungsflächen gefunden werden. Durch eine große Fenstergröße verwischen die gefundenen *Kanten* und erscheinen somit als Flächen.

Bei dem anschließenden Klassifizieren mit dem Maximum-Likelihood- Classifier sollte die selbe Fenstergröße verwendet werden, wie in dem Änderungsalgorithmus. Der Standardwert ist hier ebenfalls 3x3.
Im folgenden kommt eine tabellarische Übersicht, in der Vorschläge für die Verwendung der Algorithmen und deren Parameter bei verschiedenen Bildinhalten gemacht werden. Die folgende Unterteilung in mehr und weniger als 50% ist eine Annahme, die ich dem Stadtgebiet entnommen habe. In dem Stadtgebiet sind 44% Vegetation und es macht kaum einen Unterschied, ob mit ohne NDVI-Maske gearbeitet wird. Deshalb hier der mehr oder weniger willkürlich genommene Wert von 50%.

weniger als 50% Vegetation					
	Änderung in Stadt	Veg	Methode	NDVI-Maske	Kommentar
1	wenig	wenig	HAT	nein	Hier können die Standardeinstellungen verwendet werden. Es werden alle kleinen Änderungen, wie z.B. Autos, gefunden.
2	viel	wenig	HAT	nein	Die NDVI-Maske sollte nicht eingeschaltet werden. Zuviel Änderung beeinflußt die Hauptachse zu sehr (s. Kap. 4.7).
3	wenig	viel	HAT	ja	Die HAT sollte mit der NDVI-Maske verwendet werden, da die Vegetationspixel die Lage der Hauptachse stark beeinflussen.
4	viel	viel	Varianz	-	Die HAT-Methode ist nicht zu empfehlen, da hier keine Aussage mehr über die Lage der Hauptachse gemacht werden kann. Es ist nicht bekannt ist, welche Änderungen die Hauptachse stärker beeinflußen. Deshalb empfiehlt sich hier die Varianzbildungsmethode, welche unabhängig vom gesamten Bildinhalt arbeitet (s. Kap. 4.5).

mehr als 50% Vegetation					
	Änderung in Stadt	Veg	Methode	NDVI-Maske	Kommentar
1	wenig	wenig	HAT	ja	Siehe: weniger als 50% 3)
2	viel	wenig	Varianz	-	Siehe: weniger als 50% 4)
3	-	viel	Varianz	-	Siehe: weniger als 50% 4)

5.8 Empfehlung für MAD

Dieses Verfahren kann nach dem Stand der derzeitigen Untersuchungen für jede Szene verwendet werden. Es gibt allerdings *noch* keine Parameter einzustellen. Eine Empfehlung kann ich derzeit noch nicht zu der MAD-Methode abgeben. Das MAD-Programm ist noch in der Entwicklung und somit noch nicht voll einsatzbereit.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Ziel dieser Diplomarbeit war es, die vorhandenen Algorithmen zur Änderungsdetektion zu Erweitern und quatitativ zu bewerten. Das verwendete Bildmaterial wurde mit einem Multispektralscanner aufgenommen, welcher in einem Flugzeug der DLR installiert ist. Aus diesen Flugstreifen wurden verschiedene Ausschnitt zur Untersuchung verwendet. Durch Turbolenzen während der Aufzeichnung sind Verzerrungen in den Daten des Bildmaterials entstanden. Diese mußten ebenfalls untersucht und nach Möglichkeit entfernt (Registrierung) werden.
Im ersten Teil dieser Diplomarbeit wurde die Registriergenauigkeit behandelt. Ich habe eine Methode der Bewertung entwickelt und bin zu dem Ergebnis gekommen, dass mit dem Setzen von ca. 150 Paßpunkten auf einem Flugstreifen (3000x730 Pixel) mit dem Akima-Entzerrungsverfahren eine Genauigkeit (Standardabweichung) von ca. 1.4 Pixeln erreicht wird. Diese Genauigkeit ist für die Änderungsdetektion ausreichend.
In dem Hauptteil der Diplomarbeit wurde an verschiedenen Testszenen drei Änderungsdetektionsalgorithmen angewendet, die Vor- und Nachteile dargestellt und eine Empfehlung gegeben, welche Parameter für verschiedene Bildinhalte verwendet werden sollten. Ich habe dafür die Endergebnisse mit einer Groundtruthkarte, welche ich mit meiner *eigenen* Sichtweise erstellt habe, verglichen.
Inwiefern ist es möglich, eine Aussage über die Änderungsergebnisse zu machen? Wird von der Annahme ausgegangen, dass alles was der Algorithmus findet, Änderung ist, so stellt sich die Frage, wie gut das Ausgangsbildmaterial ist. An vielen Stellen, in denen Änderungen gefunden worden sind, sind es nicht ausreichend korrigierte Strahlungsintensitäten (Metalldächer, Schatten, Hausdächer, etc). Vegetationspixel sind ebenfalls schwer zu interpretieren. Für künstliche Flächen kann auf die Frage der Änderung mit ja oder nein geantwortet werden. Bei der Vegetation ist das nicht möglich. Vegetation ändert sich immer und hat bei der Hauptachsentransformation deshalb immer einen mehr oder weniger starken Einfluss.
Es ist gar nicht so einfach zu sagen, ob das Ergebnis stimmt oder nicht.
Möchte man keine Vegetation untersuchen, so sollte sie mit einer NDVI-Maske ausgeblendet werden (s. Kap. 5.7).
Hier die drei Verfahrem im einzelnen:

- **Varianzbildung:**
  Dieses Verfahren ist ein Kantendetektor und nicht für große Flächen geeignet. Für Ausschnitte mit sehr viel Änderung, ist diese Methode verwendbar. Aber wenn schon bekannt ist, das sehr viel Änderung vorhanden ist, dann ist es fraglich, ob es überhaupt sinnvoll, ist ein Änderungsdetektionsprogramm zu starten. Für größere Szenen sollte grundsätzlich eine große Fenstergröße (Empfehlung: 11x11) verwendet werden.
  Die Ergebnisse sind überwiegend mit schlecht eingestuft worden.

- **Hauptachsentransformation:**
  Dieses Verfahren erweist sich als ein robustes Verfahren. Für eine Registrierungsgenauigkeit von ca. einem Pixel kann eine Fenstergröße von 3x3 verwendet werden. Die Normierung sollte ausgeschaltet werden. Das Problem dieser Methode ist, dass nicht zuviel Änderung stattgefunden haben darf.
  Mit Normierung sind alle Ergebnisse mit schlecht eingestuft worden. Ohne Normierung mit gut bis befriedigend.

- **MAD:**
  Auch dieses Verfahren erweist sich als sehr robust. Allerdings schlagen hier Registrierungsfehler sofort durch, da keine interne Glättung der Bilddaten stattfindet. Die in dieser Diplomarbeit dargestellten Änderungsergebnisse sind mit einem eigens entwickelten Programm visualisiert worden. Ein Verfahren zur Zusammenfassung aller Komponenten soll in dem MAD-Programm integriert werden.
  Nach meiner Einschätzung können die Änderungsdetektionsergebnisse mit befriedigend eingestuft.
  Dieses Verfahren befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

Alles in allem bleibt aber immer noch ein wenig Handarbeit übrig. Das aufgenommene Bildmaterial wird durch die Aufnahmetechnik verfälscht und z.B. atmosphärische Effekte müssten anschliessend herausgerechnet werden, um auf die Materialeigenschaften der Objekte im Bild schliessen zu können. Denn nur mit diesen Eigenschaften ist es sinnvoll eine Änderungsdetektion durchzuführen. Aus diesem Grund muß der Anwender anschliessend das Ergebnis selber untersuchen.
Deshalb ist ein solches Verfahren auch noch nicht dazu geeignet, Änderungen unüberwacht zu finden. Solche Programme dienen lediglich dazu, dem Benutzer einen Hinweis zu geben, wo sich etwas verändert haben könnte.
Hier jetzt noch alle Ergebnisse kurz und knapp im Überblick. Die letzte Spalte (*Meinung*) beinhaltet die Prozentangabe meiner eigenen Meinung (s. Kap. 5).

Szene	Methode	Norm.	NDVI	Fenster	Kanalart	Kappa	Meinung %
Stadt	HAT	ja	ja	3x3	Daed. (10)	0.30	32.49
	"	ja	nein		"	0.32	32.95
	"	ja	nein	3x3	Land. (6)	0.27	31.16
	"	nein	nein		"	0.45	65.20
	"	ja	nein		Ikon. (4)	0.26	31.76
	"	nein	nein		"	0.47	62.45
	"	nein	nein	11x11	Daed. (10)	0.45	47.01
	"	nein	ja		"	0.38	65.80
	"	nein	nein		"	0.44	62.78
	Varianz	-	-	11x11	Daed. (10)	0.27	39.72
	"	-	-	11x11	Land. (6)	0.30	42.39
	"	-	-	11x11	Ikon. (4)	0.34	44.23
	MAD	-	-	3x3	Daed. (10)	0.26	48.08
	"	-	-	3x3	Land. (6)	0.25	46.03
	"	-	-	3x3	Ikon. (4)	0.28	46.37
Flug-hafen	HAT	ja	nein	3x3	Daed. (10)	0.31	34.97
	"	nein	nein	3x3	"	0.51	56.89
	"	ja	nein	3x3	Land. (6)	0.34	36.95
	"	nein	nein	3x3	"	0.57	60.95
	"	ja	nein	3x3	Ikon. (4)	0.25	29.79
	"	nein	nein	3x3	"	0.44	50.30
	Varianz	-	-	11x11	Daed. (10)	0.33	36.28
	"	-	-	11x11	Land. (6)	0.36	39.47
	"	-	-	11x11	Ikon. (4)	0.26	30.40
	MAD	-	-	3x3	Daed. (10)	0.42	50.81
	"	-	-	3x3	Land. (6)	0.47	56.35
	"	-	-	3x3	Ikon. (4)	0.42	50.29

Als weiterer Punkt kann z.B. die Art und Weise, wie die verschiedenen Kanäle/Komponentenbilder, in denen die Änderungswahrscheinlichkeiten stehen, weiterverarbeitet werden können.
In den hier beschriebenen Verfahren wurden nur die Längen der Abstandsvektoren der Pixel von der 1. Hauptachse (HAT-Verfahren) bestimmt. Das Längenmaß wurde anschließend klassifiziert. Bei diesem Verfahren geht jedoch die Information der Richtungsänderung verloren. Vieleicht wäre es auch noch möglich, den N-dimensionalen Vektor mit all seinen Komponenten auf eine andere Art und Weise zu klassifizieren, so dass eine Tabelle erstellt werden kann, in der steht, wie sich etwas geändert hat. Die in dieser Diplomarbeit beschrieben Algorithmen zur Änderungsdetektion stellen nur einen Ausschnitt der Möglichkeiten dar. Eine weitere Möglichkeit wäre eine Klassifizierung vor der eigentlichen Änderungsdetektion. Wenn die einzelnen Pixelspektren einer Klasse zugeordnet werden können, dann würde sich ein ganz anderer Weg der Änderungsdetektion eröffnen.

Kapitel 7

Ausblick

7.1 Andere Arbeiten zur Änderungsdetektion

Irmgard Niemeyer beschäftigt sich im Forschungszentrum Jülich ebenfalls mit der iterativen Hauptachsentransformation. Sie verwendet das Verfahren von Rafael Wiemker, nur nimmt sie ein einfacheres Gewichtungsverfahren als Rafael. Während Rafael die Gewichtung der Änderungspixel von ihrem Abstandsvektor abhängig gemacht hat, betrachtet I. Niemeyer nur die Pixel, die innerhalb von drei Standardabweichungen liegen.

R. D. Macleod und **R. G. Congalton** [6] beobachten die Population einer Grasart in Great Bay, New Hampshire. Hier haben in den letzten Jahrzehnten starke Veränderungen stattgefunden. Macleod und Congalton verwenden drei Techniken, die sie auf Landsatbilder anwenden: Klassifizierung, Differenzbildung und Hauptachsentransformation.
Vor der Änderungsdetektion wurden beide Bilder auf Karte georeferenziert mit einer Registriergenauigkeit von unter einem halben Pixel. Anschließend wurde u. a. aus Rechenzeitgründen die Landmasse ausgeblendet.
Die **Klassifikation** wurde mit drei Klassen[1] für beide Bilder jeweils überwacht[2] und unüberwacht[3] durchgeführt. Anschließend wurde pixelweise die Differenz der Klassenkarten für die Bildpixel gebildet. Bei der **Differenzbildung** wird pixelweise die Differenz der Pulshöhen der Bildpixel gebildet und anschließend wird eine Konstante hinzuaddiert. Durch die Wahl einer unteren und einer oberen Schwelle kann die Änderung gefunden werden. Die **Hauptachsentransformation** ist das selbe Verfahren, wie dass von R. Wiemker implementierte Verfahren. Anschließend werden auch hier Schwellen benutzt, um eine Änderungskarte zu erstellen. Die drei Verfahren wurden mit Hilfe des Kappawertes verglichen. In dieser Studie hat sich die Differenzbildung als beste Methode erwiesen.

[1] Gras, Wasser und eine Mischung aus beiden
[2] Maxium Likelihood
[3] ISODATA Algorithmus

X. L. Dai und **S. Khorram** [7] beschäftigen sich mit Änderungsdetektion auf Landsatbildern unter Verwendung künstlicher neuronalen Netzen. Das verwendete Bildmaterial stellt Wilmington, North Carolina dar. Es findet eine Klassifikation mit dem Backpropagation-Verfahren statt. Mit einer Trefferwahrscheinlichkeit von 95.6% wurde dieses Verfahren von X. L. Dai und S. Khorram als besser emfunden als das Maximum Likelihoodverfahren mit 86.5%. Eine Erklärung ist der Bildinhalt der verwendeten Daten.

7.2 Konturregistrierung

In Kapitel 3 dieser Diplomarbeit wurde auf die Registrierung eingegangen. Dort wurde gezeigt, welche Probleme auftreten und welche Punkte in einem Bild als Paßpunkte verwendet werden dürfen. Das ganze beschriebene Verfahren läuft bis auf die eigentliche Entzerrung manuell ab, d.h. der Benutzer muß in mühsamer Arbeit alle Paßpunkte von Hand setzen.
Dieses Verfahren zu automatisieren wäre ein wesentlicher Schritt in der Registrierung. Für stark verzerrte Bilder, wie es bei Flugzeugscanneraufnahmen normal ist, wird es kaum möglich sein, ein automatisiertes Verfahren zu entwickeln. Zumal auch speziell in städtischen Gebieten durch hohe Objekte Projektionsprobleme hinzukommen.
Aber wie sieht es bei Satellitenbildern aus, deren Aufnahme schwach verzerrt sind? Hier wird es schon deutlich einfacher.
Wie könnte so ein automatisiertes Verfahren abeiten? Eine einfache Möglichkeit wäre, von den Objekten im Bild eine Konturkarte zu erstellen. Eine solche Karte bekommt man einfach, indem man einen LaPlace-Operator[4] über das Bild laufen läßt. Dann sucht man sich die Kanten heraus, deren zweite Ableitung innerhalb eines bestimmten Bereiches liegt, und ignoriert alle anderen. Da sich in beiden Bildern nur schwache Verzerrungen befinden werden ähnliche Konturverläufe in beiden Bildern zu finden sein. Hat man zwei nahezu identische Konturen mit dem Chain-Code-Kreterium gefunden, so bestimmt man von denen jeweils den Schwerpunkt und definiert diesen als Paßpunkt.
Dieses Verfahren wurde bereits 1995 von Hui Li, B. S. Manjunath und Sanjit K. Mitra entwickelt [15]. Das in dem Paper beschriebene Verfahren behandelt auch offene Konturen.
Dr. M. Canty vom Forschungszentrum Jülich hat dieses Verfahren im ersten Schritt zur automatischen Registrierung von Satellitenbildern umgesetzt. Sein Verfahren betrachtet derzeit nur geschlossene Konturen.

[4] richtungsunabhängiger Kantendetektor

Anhang A

Registrierter Flugstreifen

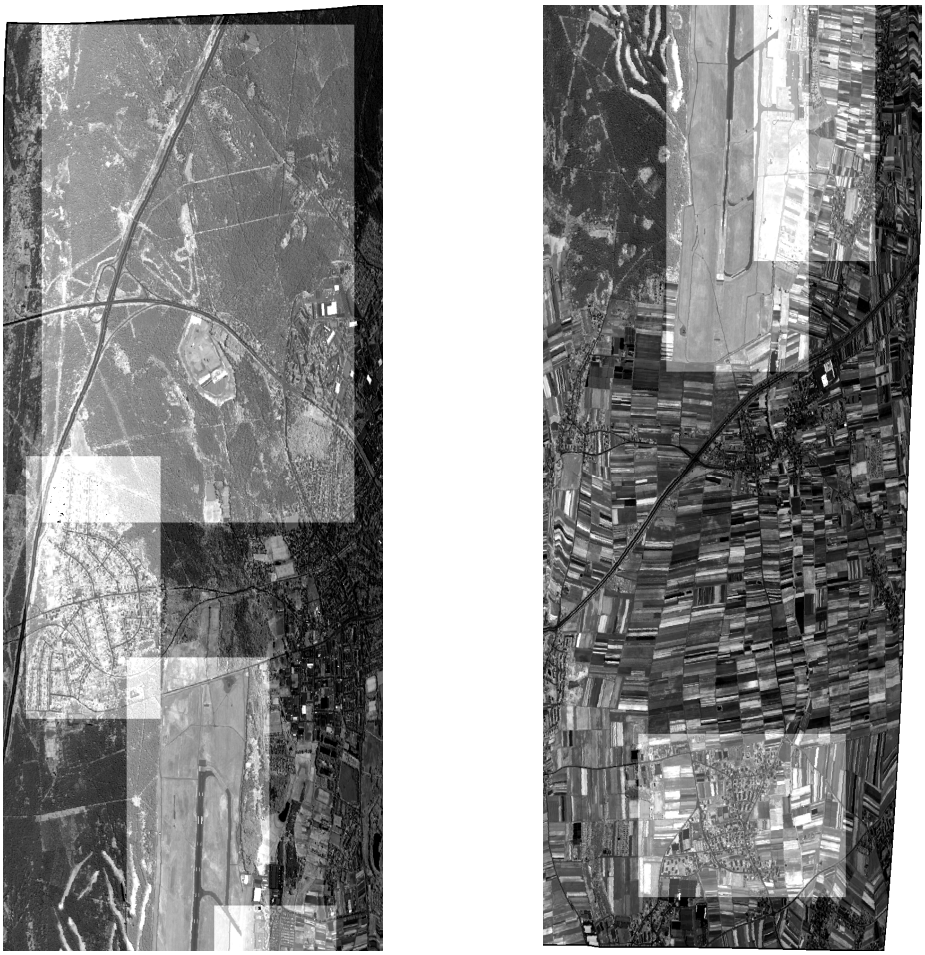


Abbildung A.1: *Kanal 7 des registrierten Flugstreifens 1995. Die Hervorhebungen zeigen die Ausschnitte, welche näher untersucht wurden. Die Ausschnitte sind im Anhang B abgebildet.*

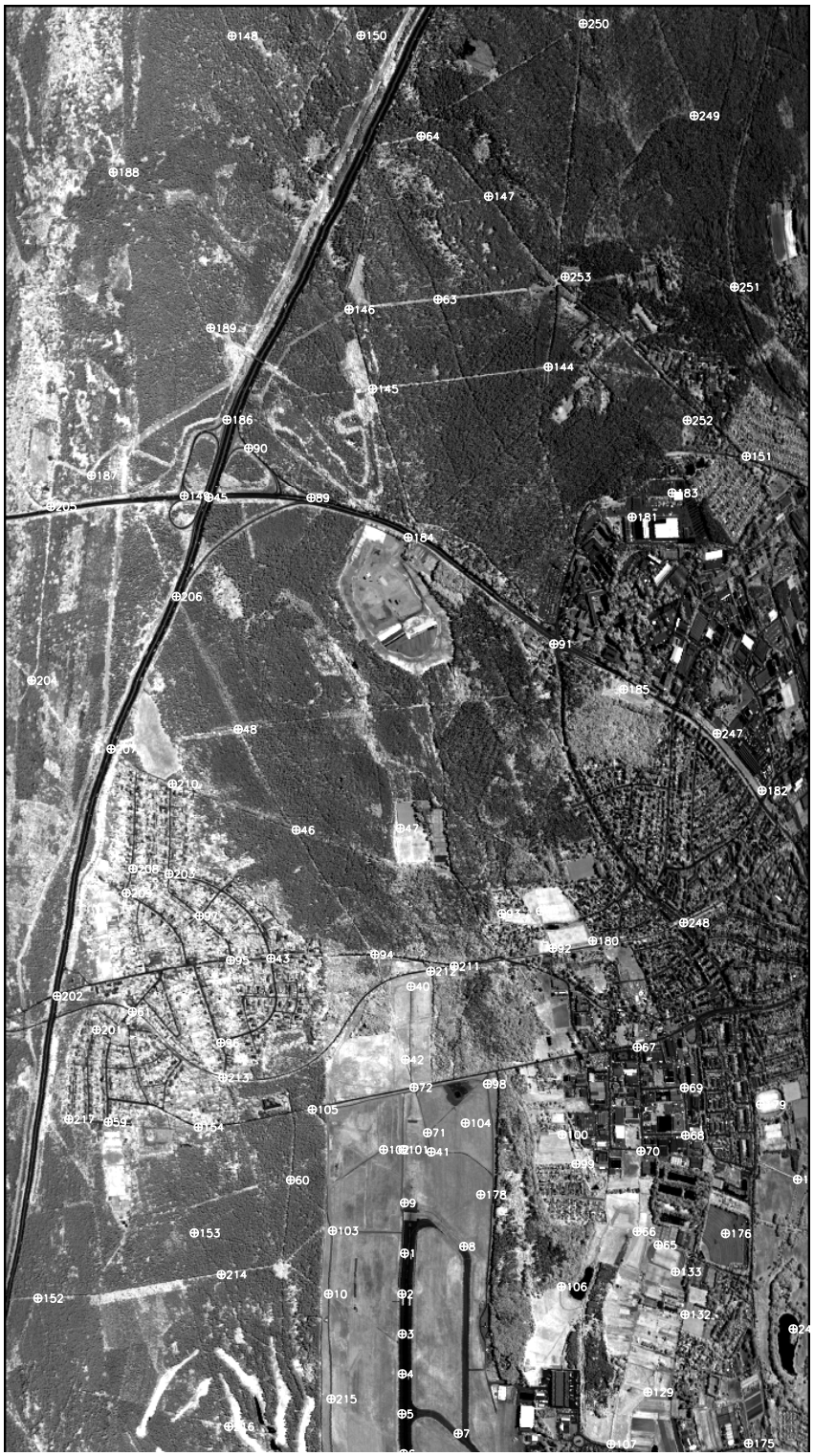


Abbildung A.2: *Kanal 7 des registrierten Flugstreifens 1995 (1800m) mit allen Paßpunkten (obere Hälfte)*

Abbildung A.3: *Kanal 7 des registrierten Flugstreifens 1995 (1800m) mit allen Paßpunkten (untere Hälfte)*

Anhang B

Bildausschnitte mit Kontrollpunkten

Abbildung B.1: *Ausschnitt Stadt 2 von 1995 mit 15 Kontrollpunkten. Dieser Ausschnitt liegt im Nadir-Bereich der Aufnahme, d.h. Verzerrungen an den Außenkanten haben hier keinen Einfluss*

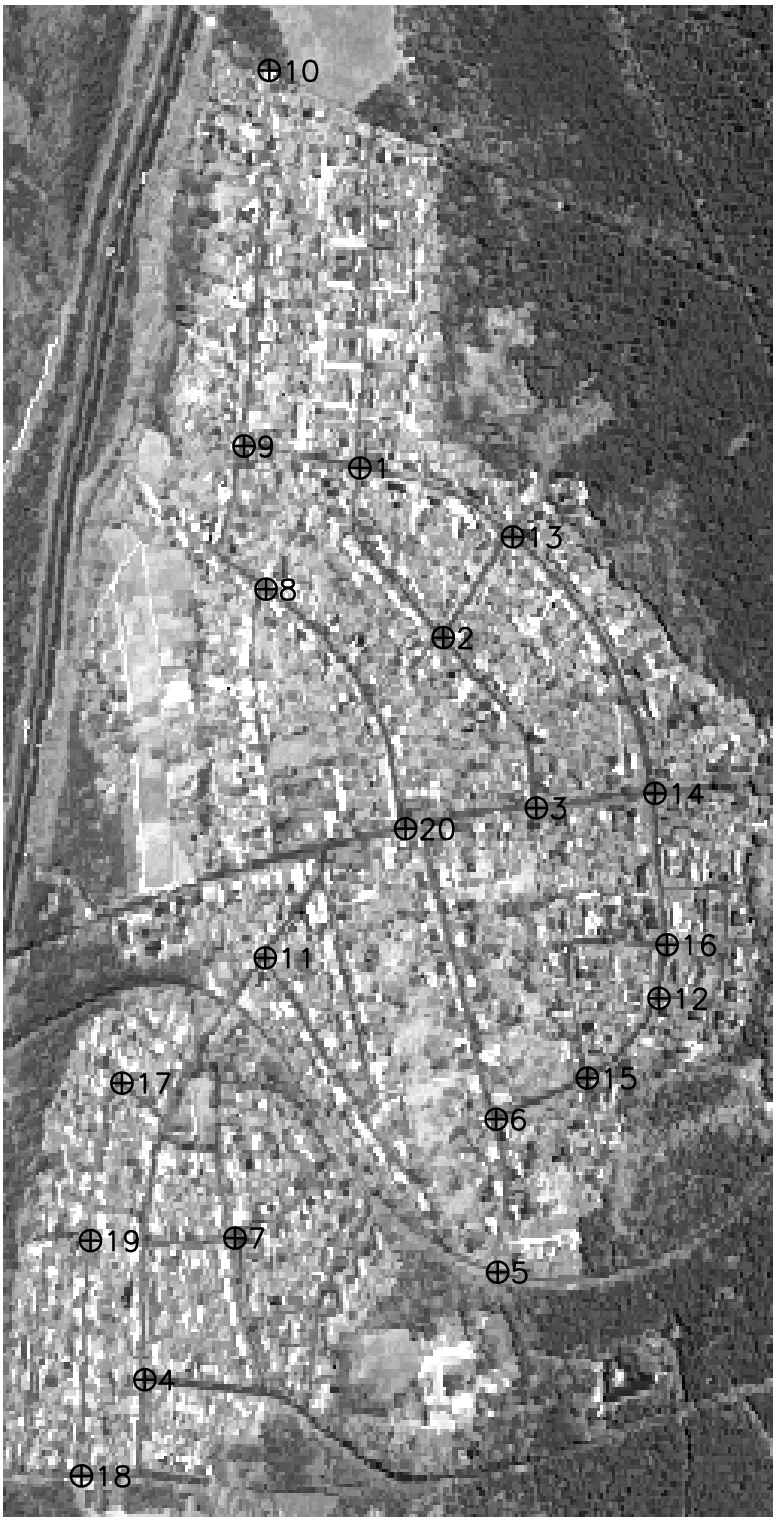


Abbildung B.2: *Ausschnitt Stadt 1 von 1995 mit 20 Kontrollpunkten. Dieser Ausschnitt liegt im Off-Nadir. Hier machen sich Verzerrungen am Bildrand schon bemerkbar.*

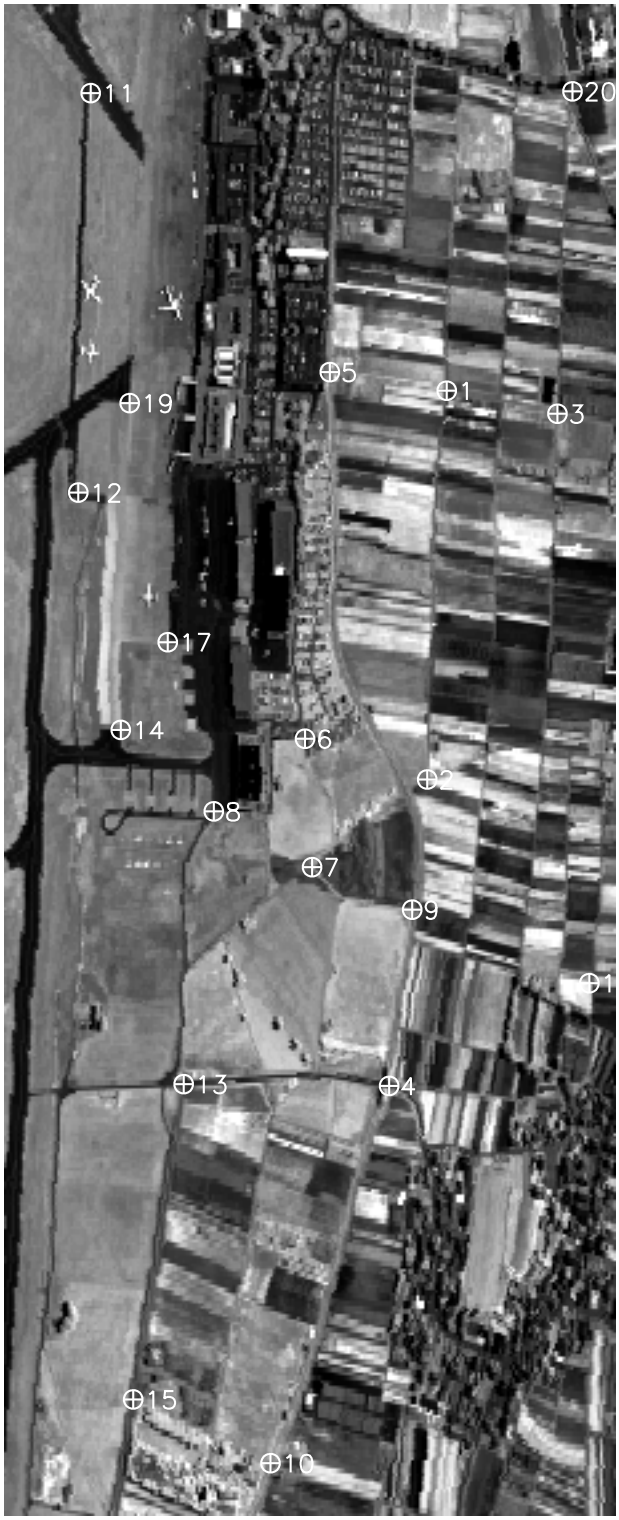


Abbildung B.3: *Ausschnitt Stadt 3 von 1995 mit 20 Kontrollpunkten. Ebenfalls ein Ausschnitt im Off-Nadir. Hier sind teilweise große Verzerrungen im '95er Bild vorhanden. An dieser Stelle wurden besonders viele Paßpunkte gesetzt.*

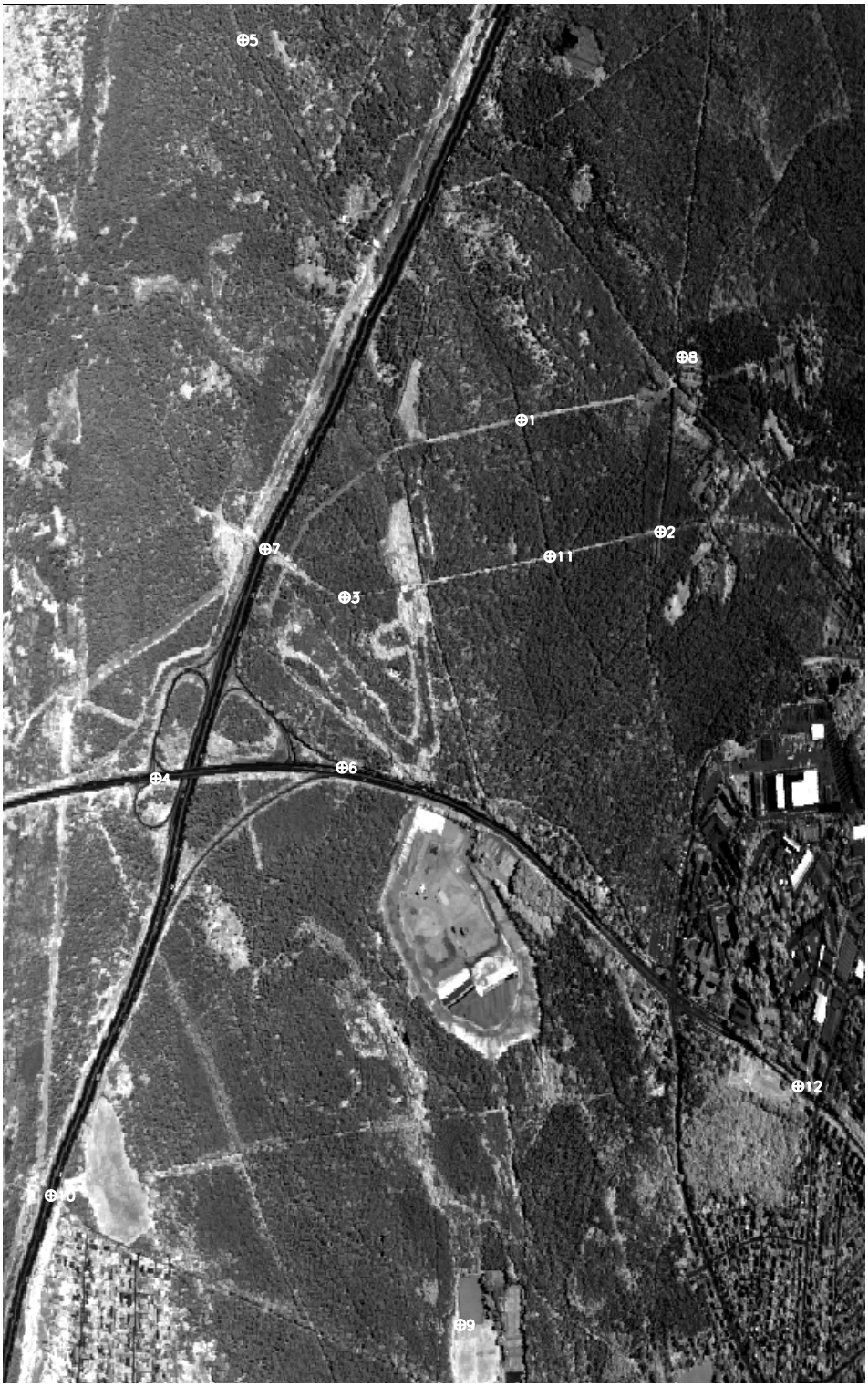


Abbildung B.4: *Ausschnitt der Vegetation aus dem Jahre 1995 mit 12 Kontrollpunkten. Es wird der Nadir- sowie der Off-Nadirbereich abgedeckt.*

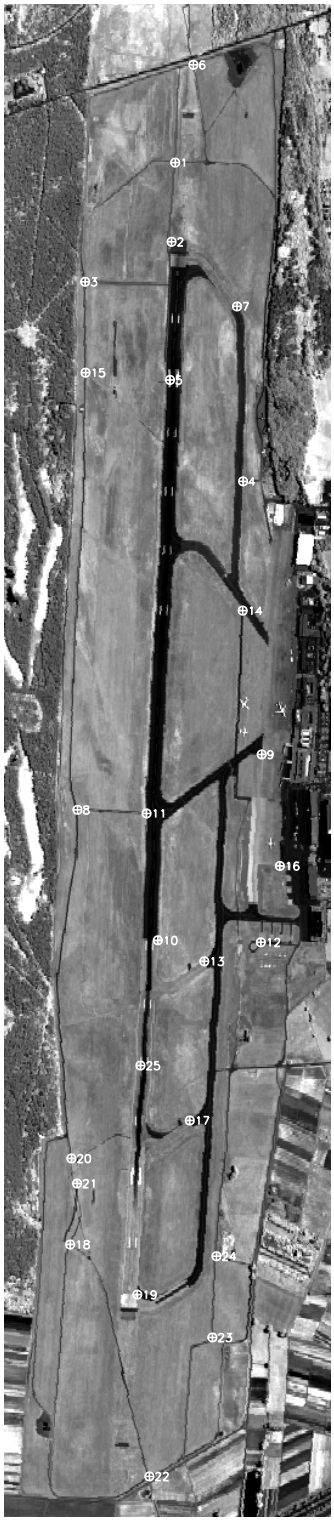


Abbildung B.5: *Ausschnitt des Flughafens von 1995 mit 25 Kontrollpunkten. Hier sind die lokalen Verzerrungen entlang der Asphaltflächen besonders gut zu erkennen.*

Anhang C

Vergleich der beiden Registrierungsverfahren

In Kap. 3.3 wurden zwei Arten der Registrierung angesprochen. Einmal die Registerierung der Bilder aufeinander und die Registrierung der beiden Bilder auf eine Karte[1]. An den folgenden 900m Bildauschnitten des Gewerbegebietes (s.Abb. C.1) von Nürnberg aus den Jahren 1991 und 1995 wird die Registriergenauigkeit dargestellt.

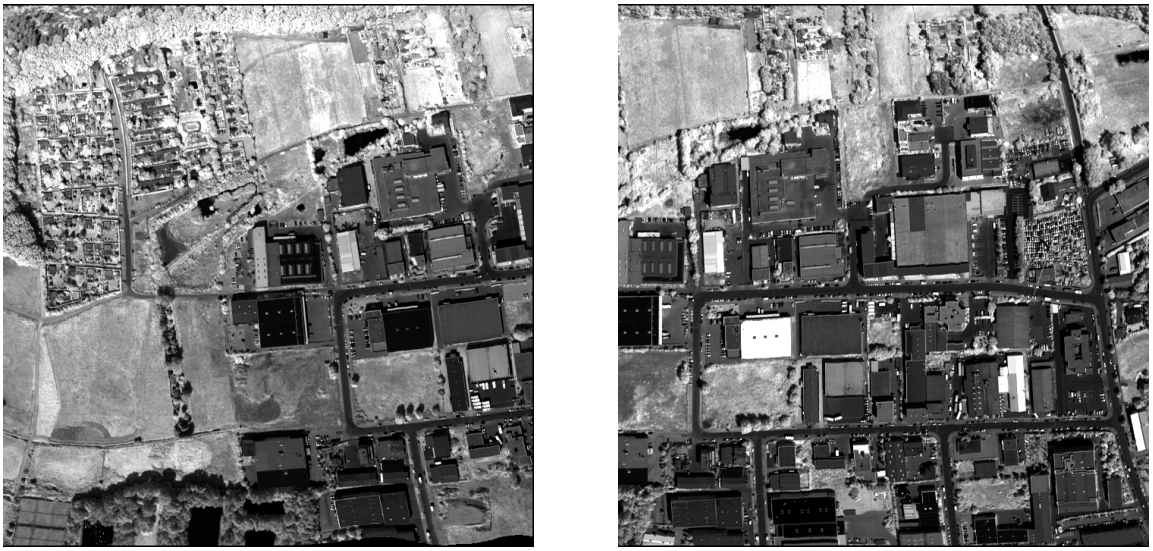


Abbildung C.1: *An diesen beiden Ausschnitten des Gewerbegebietes von Nürnberg (1991 links, 1995 rechts).*

Zuerst wurde wurden die Bilder einzeln mit jeweils 12 Paßpunkten auf die Karte registriert. Anschließend wurde die Registriergenauigkeit geprüft, indem acht korrespondierende Kontrollpunkte gesetzt wurden. Aus diesen Kontrollpunkten hat sich eine Genauigkeit von 2.14 Pixel ergeben.
Danach wurden beide Bildausschnitte mit 12 Paßpunkten direkt aufeinander regi-

[1]Der Kartenausschnitt darf aus urheberrechtlichen Gründen nicht abgebildet werden

striert und ebenfalls mit acht Kontrollpunkten geprüft. Hier hat sich eine Genauigkeit von 0.99 Pixel ergeben.

Bild 1	Bild 2	Passpunkte	GCP's	Reg.-Genauigkeit
Karte	1991	12	8	2.140
Karte	1995	12		
1991	1995	12	8	0.992

Wie nicht anders zu erwarten war, ist die Registrierung der Bilder direkt aufeinander besser, als über eine Karte. Das hat verschiedene Ursachen:

- Eine Karte ist nie so genau wie es gerne erwünscht wäre. Die Fußwege sind auf der Karte breiter, als auf den Bildern. Grundstückskanten können nur schwer ausgemacht werden.
- Durch das zweimalige Registrieren sind beide registrierten Bilder transformationsbedingt in ihrer Auflösung schlechter.
- Der Fehler der beim setzen der Paßpunkte gemacht wird, wird zweimal gemacht.

Bei der direkten Registrierung wird der Setztfehler der Paßpunkte nur einmal gemacht und es können leichter korrespondierende Punkte gefunden werden.
Ein Nachteil der direkten Registrierung und somit ein Vorteil der Kartenregistrierung ist die nicht vorhandene Ortstreue der Direktregistrierung, d.h. Die Positionen der Objekte des registrierten Bildes stimmen nicht mit denen auf der Karte überein.

C.1 CD-Sat - Das MAD-Programm

In diesem Programm ist die MAD-Methode unter Windows implementiert. Eine Beschreibung des Programms folgt in diesem Kapitel.

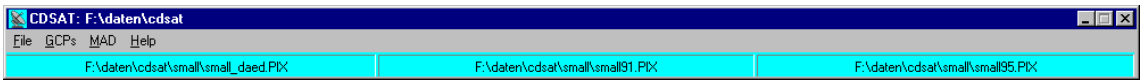


Abbildung C.2: *Das CDSAT-Programm*

Importieren von Daedalusbilder

Als erstes müssen unter IDL die Daedalusbilder (oder auch andere Tiff-Bilder) mit *TIFFREAD* geladen werden. Anschließend werden sie mit Hilfe des IDL-Programms *DAED2BMP* in N Windows-Bitmap-Bilder[2] zerlegt und gespeichert. Die Syntax lautet:

DAED2BMP,Filename,image

Es entstehen dabei N Bitmap-Bilder welche von 0 bis $(N-1)$ durchnummeriert sind.
Diese Bilder werden unter CDSAT mit *File/Import* importiert (s. Abb. C.3). Mit dem Button *Add-Channels* können die BMP-Bilder geladen werden. Mit OK wird eine PCI[3]-Datenbank mit den Bilddaten erstellt. Sind alle PCI-Datenbanken erstellt, so können diese jetzt mit *File/Open* geöffnet werden.

MAD

Als erstes müssen Bild 1 und Bild 2 zugeordnet werden. Es kann auch sein, dass mehrere Bilder geöffnet worden sind. Der Menupunkt *Status* im Bildfenster ermöglicht diese Festlegung. Bild 1 ist *Master* und Bild 2 ist *Slave* (s. Abb. C.4).
Jetzt kann das MAD-Programm mit *MAD/Run* gestartet werden. Hier können jetzt alle Kanäle ausgewählt werden, welche berücksichtigt werden sollen. Es muß in beiden Bilder die selbe Kanalanzahl ausgewählt sein. Nur dann kann der *Accept*-Button gedrückt werden.
Nach einer Abfrage des Zieldateinamens startet das Programm. In dem Protokollfenster steht der Programmfortschritt, welcher am Ende mit dem daneben stehenden Button gespeichert werden kann.
Nach Beendigung muß das Ergebnisbild ebenfalls mit *File/Open* geöffnet werden.

[2] BMP-Format

[3] PCI ist ein Bildverarbeitungspaket (ähnlich wie ENVI) mit Datenbankunterstützung von CGI Systems GmbH

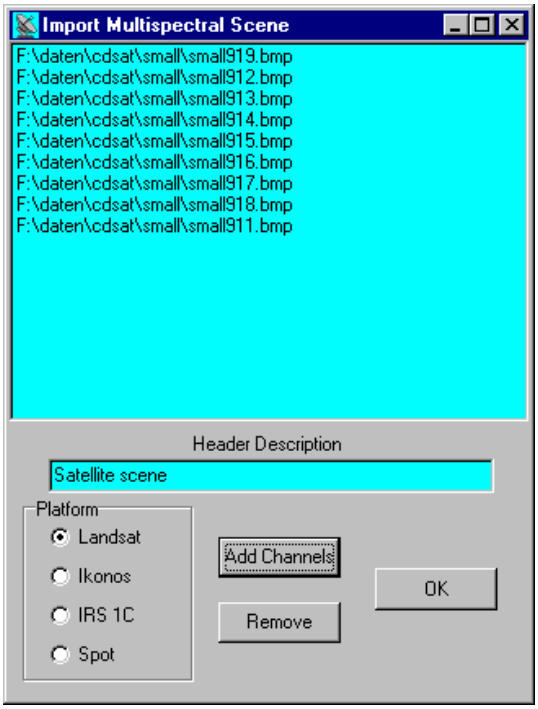


Abbildung C.3: *Importieren eines multispektralen Bildes*

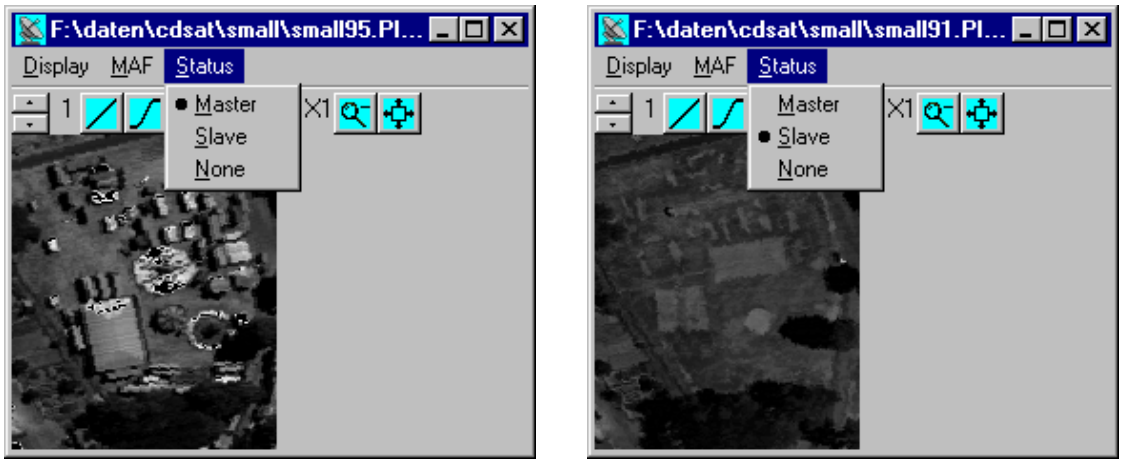


Abbildung C.4: *Master- und Slaveeinstellung für das MAD-Programm*

C.1.1 Darstellung

Über die kleinen Buttons im Bildfenster unter der Menuzeile links kann der dargestellte Kanal gewechselt werden. Mit *Display/RGB-Composite* (s. Abb. C.5 r.) können die einzelnen Komponenten dargestellt und eingefärbt werden. Wegen der RGB-Darstellung können aber nur drei Komponenten auf einmal angezeigt werden. Hier können jetzt die drei Komponenten ausgewählt werden und deren Schwellen eingestellt werden. Während der MAD-Berechnung werden schon die Schwellen automatisch bestimmt.

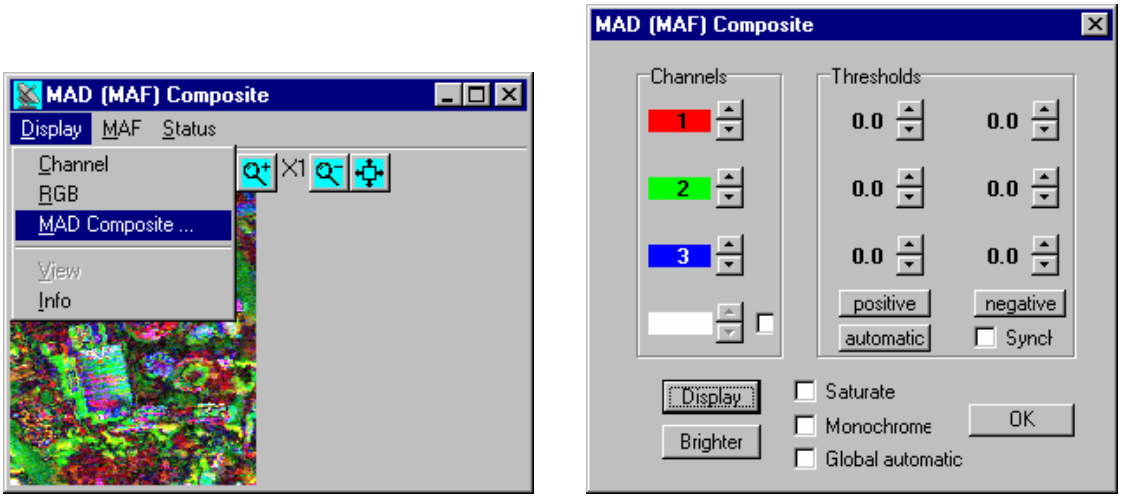


Abbildung C.5: *Links das Ergebnisbild. rechts der Dialog, mit dem die Kanäle eingefärbt werden können*

- Das **weisse Feld** unter den drei Channel-Buttons ermöglicht es einen Originalkanal unter die MAD-Komponenten zu legen.
- Der **Brighter**-Button macht das Bild heller.
- **Saturate** erstellt mit Hilfe der Schwellen ein Binärbild
- Der Schalter **Monochrome** stellt alle Komponenten in einer Farbe dar.
- **Global automatic** stellt *alle* Komponenten einfarbig
- **3x3 Smooth** glättet die Komponentenbilder mit einem 3x3-Fenster. Hier werden alle Komponten zusammengefasst.
- Der **automatic**-Schalter setzt die Schwellen automatisch.
- Der **positiv**- und **negativ** Button setzt die positiven und negativen Schwellen abwechselnt auf 0.0 und 8.0[4]
- **Synchronize** synchronisiert die Schwellwertschalter, d.h. das alle Schwellen fest verbunden werden. Wird die erste Schwelle erhöht, so werden auch alle anderen Schwellen erhöht

Nach dem der OK-Button gedrückt wurde kann das Bild gespeichert werden. Dazu bewegt man den Cursor auf die Bildfläche und drückt die rechte Maustaste.

[4]Die Schwellen sind das Vielfache einer Standardabweichung

MAD - Threshold

Eine weitere Möglichkeit die MAD-Komponentenbilder darzustellen ist der Dialog *Display/Mad-Threshold*[5]. Dies ist eine einfache Darstellungsmethode mit manueller Schwelle. Das Ergebnisbild ist eine ODER-Verknüpfung aller Komponentenbilder. Anschliessend wird eine Schwelle gesetzt, mit der die Änderungspixel markiert werden. Der Standardwert der Schwelle 1.375 Standardabweichungen[6]. Der Bereich erstreckt sich von -8 bis 8 σ.
Mit der oberen Checkbox im Channel-Feld kann ein Kanal unter das Ergebnisbild gelegt werden. Da das MAD-Verfahren jeden Pixelversatz als Änderung findet ist es u. U. sinnvoll eine Glättung des Bildes vorzunehmen. Mit dem Checkbutton *3x3 Smooth* findet eine Glättung mit einem 3x3-Fenster statt.

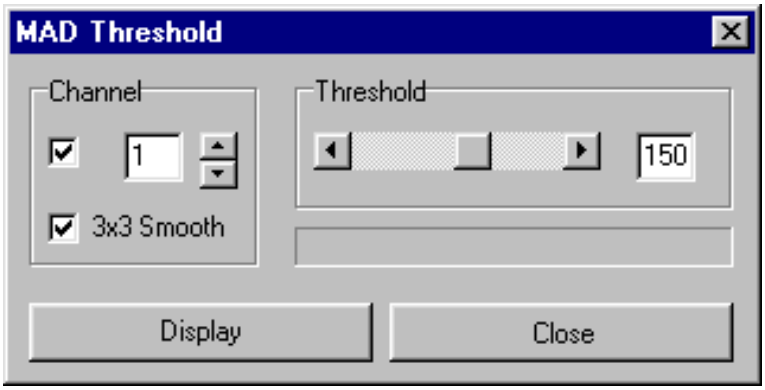


Abbildung C.6: *Darstellung der MAD-Komponenten mit Hilfe einer Schwelle.*

Hinweis

Die Endergebnisse dieses Schwellwertverfahrens stimmen nicht mit den Ergebnissen des IDL-Programms (s. Kap. 4.15) überein. Es findet offenbar bei der Darstellung des Bildes eine Anpassung der Farbpalette o. ä. statt. Das abgespeicherte Bild stimmt mit den Daten im Programm nicht überein. Deshalb die Unterschiede in den Ergebnisbildern.
Die Darstellung ist, wie bereits erwähnt, noch im Entwicklungsstadium. Ebenso das finden von Schwellen, die die NoChange-Pixel ausblenden sollen.

[5]Dieser Dialog ist nachträglich von mir eingefügt worden. Änderungsergebnisse dieses Programmteils sind in der vorliegenden Diplomarbeit nicht abgebildet.
[6]Diesen Wert habe ich experimentell ermitteln

Anhang D

Source-Code

Die beiden Programme zur Bestimmung des Fehlers. RPTS.PRO liest die Paßpunktkoordinaten aus der Paßpunktdatei, welche von ENVI erzeugt wird, in ein Array ein.

```
;RPTS.PRO

function rpts, filename

filename=filename+'.pts'
title=''
dummy=fltarr(4,5000)-1
openr,1,filename          ; Daten lesen
for i=0,4 do begin        ;titel 'ueberlesen'
readf,1,title
endfor
i=-1                      ;werte einlesen
repeat begin
  i=i+1
  readf,1,p1,p2,p3,p4
  dummy(0,i)=p1
  dummy(1,i)=p2
  dummy(2,i)=p3
  dummy(3,i)=p4
endrep until eof(1)
close,1
id=where(dummy(0,*) ne -1)
dummy=dummy(*,id)
return,dummy
end
```

Das Programm, welches den Fehler aus den Paßpunkten berechnet.

```
; Programm CALC_RMS berechnet den RMS-Wert fuer PTS-Dateien
;
; In fname wird die Liste der PTS-Dateien gespeichert (ohne Endung)
;
; Ausgegeben wird eine Liste mit RMS, Anzahl der Punkte und dem Filenamen
;
; Dieses Programm benoetigt die Funktion RPTS.PRO zum lesen der PTS-Files

pro calc_rms

path='/home/zenk/daten/Flughafen/pts/'

fname=['control_links','control_stadt2','control_flug',$
       'control_rechts','control_stadt3','control_lin',$
       'control_stadt1','controll_veg']

all=fltarr(n_elements(fname))
openw,2,'result.txt'

for i=0,n_elements(fname)-1 do begin

a=rpts(path+fname(i))
b=sqrt((a(2,*)-a(0,*))^2.+(a(3,*)-a(1,*))^2.)
c=total(b)/n_elements(b)
printf,2,c,n_elements(b),'   ',fname(i)
all(i)=c
endfor
close,2
end
```

Die Bestimmung des Kappawertes.
*Bild*1 ist das Änderungsbild ohne Kanalhinterlegung. *Bild*2 ist die Groundtruthmap. *thres* ist eine Schwelle mit der aus dem Graustufenänderungsbild ein binärbild gemacht wird. Der Standardwert ist 100.

```
function kappa,bild1,bild2,thres

; Beide Bilder gleichgross?
if (n_elements(bild1) ne n_elements(bild2)) then return,-1

; Bestimmung der Konfusionsmatrixelemente
km=fltarr(2,2) ; Fuer zwei Klassen
km(0,0)=n_elements(where((bild1 le thres) and (bild2 le thres)))
km(0,1)=n_elements(where((bild1 gt thres) and (bild2 le thres)))
km(1,0)=n_elements(where((bild1 le thres) and (bild2 gt thres)))
km(1,1)=n_elements(where((bild1 gt thres) and (bild2 gt thres)))
k=fltarr(5)
k(1)=km(0,0)
k(2)=km(0,1)
k(3)=km(1,0)
k(4)=km(1,1)

; Gesamtzahl aller Pixel
n=n_elements(bild1)

;          p0-pz
; kappa = -------
;          1-pz

; Bestimmung von p0
p0=(km(0,0)+km(1,1))/n

; Bestimmung von pz
pz=((km(0,0)+km(0,1))/n)*((km(0,0)+km(1,0))/n)+((km(1,0)
+km(1,1))/n)*((km(0,1)+km(1,1))/n)

; Bestimmung von Kappa
k(0)=(p0-pz)/(1-pz)

return,k

end
```

Zusammenfassung der MAD-Komponenten unter benutzung einer Schwelle.
aa ist das N-kanalige Komponentenbild. *thres* die Schwelle, die in der Praxis auf 70 gesetzt wurde und *smooth* ist die Fenstergröße mit der geglättet wird.

```
function showmad,aa,thres,smooth

a=aa

; Anzahl der Kanaele
chans=n_elements(a(0,0,*))

; Glaetten
if (smooth gt 0) then for i=0,chans-1 do a(*,*,i)=smooth(a(*,*,i),3)

; Komponenten ODER-Verknuepfen
b=a(*,*,0)
for i=1,chans-1 do b=b>a(*,*,i)

x=n_elements(a(*,0,0))
y=n_elements(a(0,*,0))

; Schwelle auf Ergebnis anwenden
c=where(b ge thres)

d=bytarr(x,y)
d(c)=255

; Invertieren (fuer bessere Darstellung)
d=255-d

return,d

end
```

Anhang E

Mathematische Definitionen

Erwartungswert. Bei einem endlichen Zufallsversuch sei $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_n\}$ die Menge der möglichen Ausfälle und $X : \Omega \to \mathbf{R}$ eine Zufallsgröße. Dann heißt

$$E(X) = \sum_{i=1}^{n} X(\omega_i) P(\omega_i) \tag{E.1}$$

der Erwartungswert von X. Wiederholt man das zugrundelegende Zufallsexperiment sehr oft und stellt jedesmal den Wert von X fest, so erwartet man als Mittelwert von X den Wert $E(X)$. Deshalb nennt man $E(X)$ auch den *Mittelwert* der Zufallsgröße X.

Kovarianz zweier Zufallsgrößen X, Y nennt man die Zahl

$$\begin{aligned} Cov(X,Y) &= E((X - E(X))(Y - E(Y))) \\ &= E(XY) - E(X)E(Y) \end{aligned} \tag{E.2}$$

wobei $E(U)$ der Erwartungswert der Zufallsgröße U ist. Es gilt die Beziehung

$$Cov(X,X) = V(X) \tag{E.3}$$

Korrelation nennt man die Abhängigkeit zweier Zufallsgrößen voneinander. Als Maß für die Korrelation dient der *Korrelationkoeffizient*

$$\varrho(X,Y) = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{V(X)V(Y)}} \tag{E.4}$$

wobei $V(U)$ die Varianz der Zufallsgröße U ist. Dabei muß $V(X)V(Y) \neq 0$ sein, keine der beiden Zufallsgrößen X, Y darf konstant sein. Die im Zähler stehende Zahl $E(XY) - E(X)E(Y)$ ist die Kovarianz. Es gilt:

$$-1 \leq \varrho(X,Y) \leq 1 \tag{E.5}$$

Zufallsgrößen mit $\varrho(X,Y) = 0$ heißen *unkorreliert*; insbesondere sind unabhängige Zufallsgrößen unkorreliert. Jedoch müssen unkorrelierte Zufallsgrößen nicht unabhangig sein. In der Praxis schließt man auf einen kausalen Zusammenhang, wenn mit statistischen Methoden ein hoher Korrelationskoeffizient ermittelt worden ist.

Varianz. Die Varianz ist ein Maß für die Abweichung einer Zufallsgröße von ihrem Erwartungswert bzw. der Werte einer Meßreihe von ihrem arithmetischen Mittel. Sie ist also ein Streumaß. Ist $\Omega = \{\omega_1, ..., \omega_n\}$ die Menge der möglichen Ausfälle eines Zufallsversuchs und X eine Zufallsgröße auf diesem Zufallsversuch, dann ist die Varianz von X durch

$$V(X) = \sum_{i=1}^{n} (X(\omega_i) - \mu)^2 P(\omega_i) \tag{E.6}$$

definiert; dabei ist $\mu = E(X)$ der Erwartungswert von X. Setzt man

$$P(X = x) = P(\{\omega_i \in \Omega \mid X(\omega_i) = x\}), \tag{E.7}$$

so kann man die Varianz auch folgendermaßen ausdrücken:

$$V(X) = \sum_{x \in X(\Omega)} (x - \mu)^2 P(X = x); \tag{E.8}$$

dabei ist $X(\Omega)$ die (endliche) Wertemenge der Funktion X. Die Größe $\sigma(X) = \sqrt{V(X)}$ heißt Standardabweichung von X; sie hat die gleiche (physikalische) Dimension wie die Werte von X.

Anhang F

Canonical Correlation Analysis

Wir gehen von zwei Bildern mit unterschiedlicher Kanalzahl p und q aus, mit $(p < q)$.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix} \in N(\mu, \Sigma) = N\left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{bmatrix}\right) \tag{F.1}$$

Σ_{11} und Σ_{22} (und Σ) sollen nicht singulär sein. $\mathbf{X}$ und $\mathbf{Y}$ sind multivariate Bilder, deren einzelne Kanäle als Vektor angegeben werden.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_p \end{bmatrix} \quad \text{bzw} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_q \end{bmatrix}. \tag{F.2}$$

Wir nehmen an, das die konjugierten Eigenvektoren $\mathbf{a}_1, \cdots, \mathbf{a}_p$ ($\mathbf{a}_i$ ist $p \times 1$) entsprechend zu den Eigenvektoren $\lambda_1 \geq \cdots \geq \lambda_p$ of $\Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21}$ mit Hinsicht auf Σ_{11}, z.B.:

$$\left(\Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21} - \lambda\Sigma_{11}\right)\mathbf{a}_i = \mathbf{0}. \tag{F.3}$$

Wenn wir

$$\mathbf{b}_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21}\mathbf{a}_i \tag{F.4}$$

setzen ($\mathbf{b}_i$ ist $q \times 1$), bekommen wir

$$\begin{aligned} \Sigma_{21}\Sigma_{11}^{-1}\Sigma_{12}\mathbf{b}_i &= \tfrac{1}{\sqrt{\lambda_i}}\Sigma_{21}\Sigma_{11}^{-1}\Sigma_{12}\Sigma_{22}^{-1}\Sigma_{21}\mathbf{a}_i \\ &= \sqrt{\lambda_i}\Sigma_{21}\mathbf{a}_i \\ &= \lambda_i\Sigma_{22}\mathbf{b}_i \end{aligned} \tag{F.5}$$

$\mathbf{b}_i$ ist ein Eigenvektor von $\Sigma_{21}\Sigma_{11}^{-1}\Sigma_{12}$ in Bezug auf Σ_{22} entsprechend zu den Eigenwerten λ_i. Wenn $q = p$ dann sind das alle Eigenwerte und -Vektoren von $\Sigma_{21}\Sigma_{11}^{-1}\Sigma_{12}$. Wenn $p > q$ ist, sind die letzten Eigenwerte gleich 0.

Anhang G

Eingefärbte Ergebnisbilder der HAT-Methode

Diese Bilder sind mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren von Rafael Wiemker entstanden. Die rote Flächen stellen Gebiete mit einer großen Wahrscheinlichkeit von Änderung dar.

G.1 Vegetationsgebiet

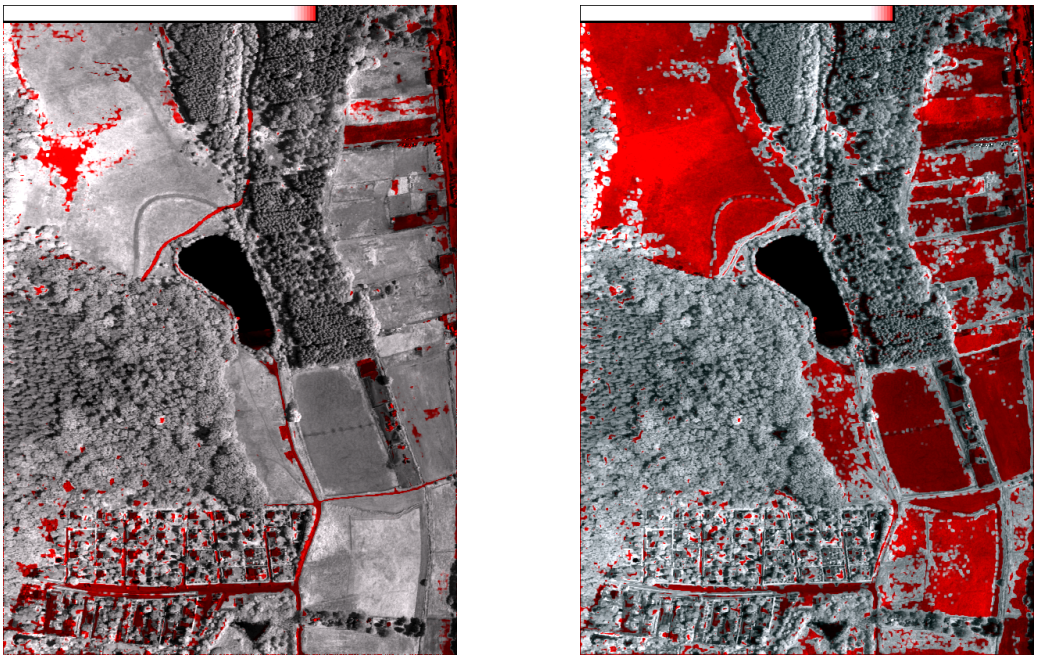


Abbildung G.1: *Ergebnisbild der Hauptachsentransformation auf das Vegetationsgebiet ohne Normierung auf lokale Varianz (links) und mit Normierung (rechts). Es wurde eine Fenstergröße von 3x3 verwendet. Das Ergebnis wurde mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren eingefärbt. Intensives rot bedeutet große Änderungswahrscheinlichkeit.*

G.2 Stadtgebiet

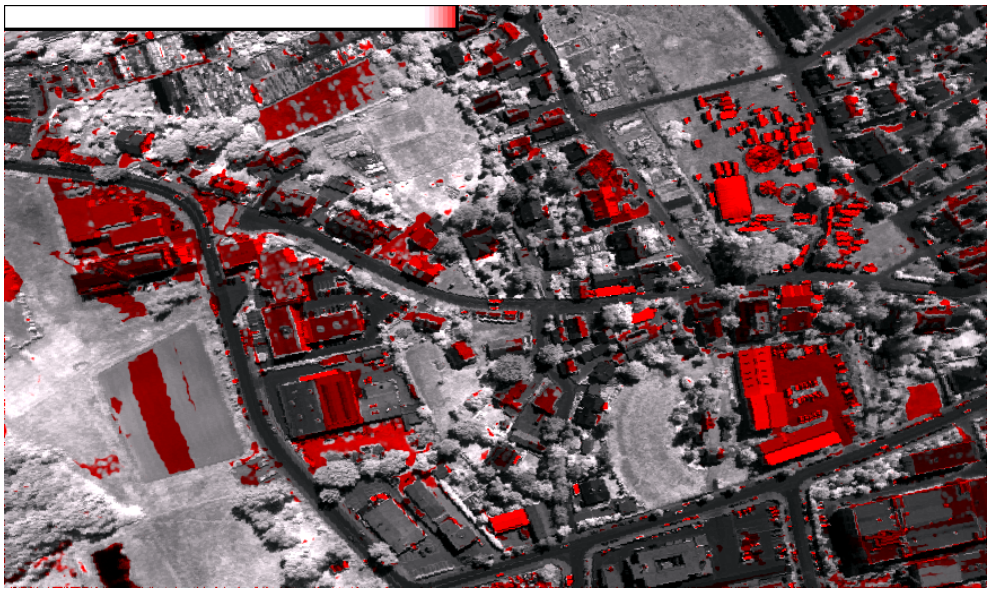


Abbildung G.2: *Ergebnisbild der Hauptachsentransformation auf das Stadtgebiet ohne Normierung auf lokale Varianz mit einer Fenstergröße von 3x3. Das Ergebnis wurde mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren eingefärbt. Intensives rot bedeutet große Änderungswahrscheinlichkeit.*

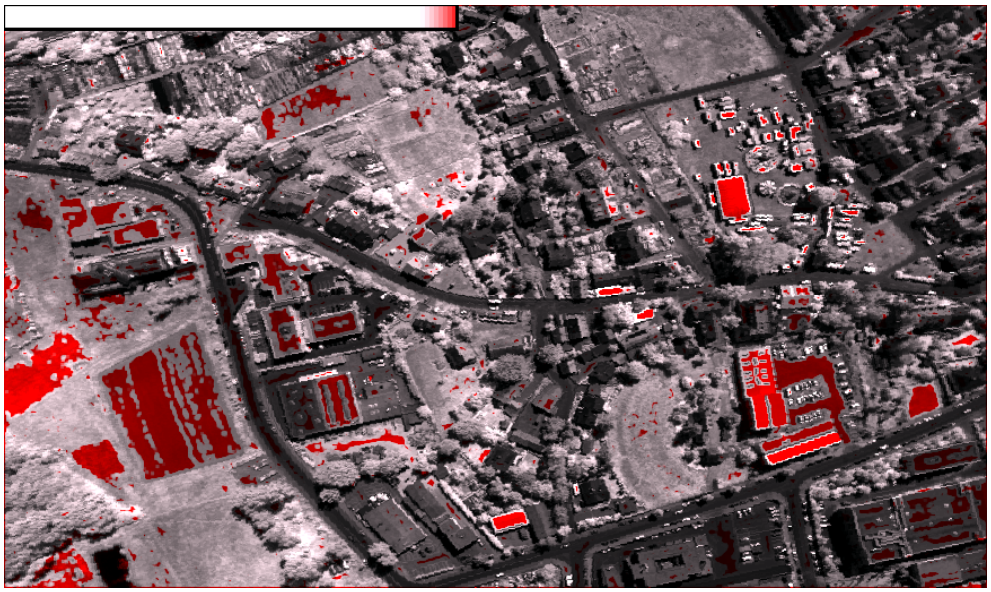


Abbildung G.3: *Ergebnisbild der Hauptachsentransformation auf das Stadtgebiet mit Normierung auf lokale Varianz mit einer Fenstergröße von 3x3. Das Ergebnis wurde mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren eingefärbt. Intensives rot bedeutet große Änderungswahrscheinlichkeit.*

G.3 Flughafengebiet

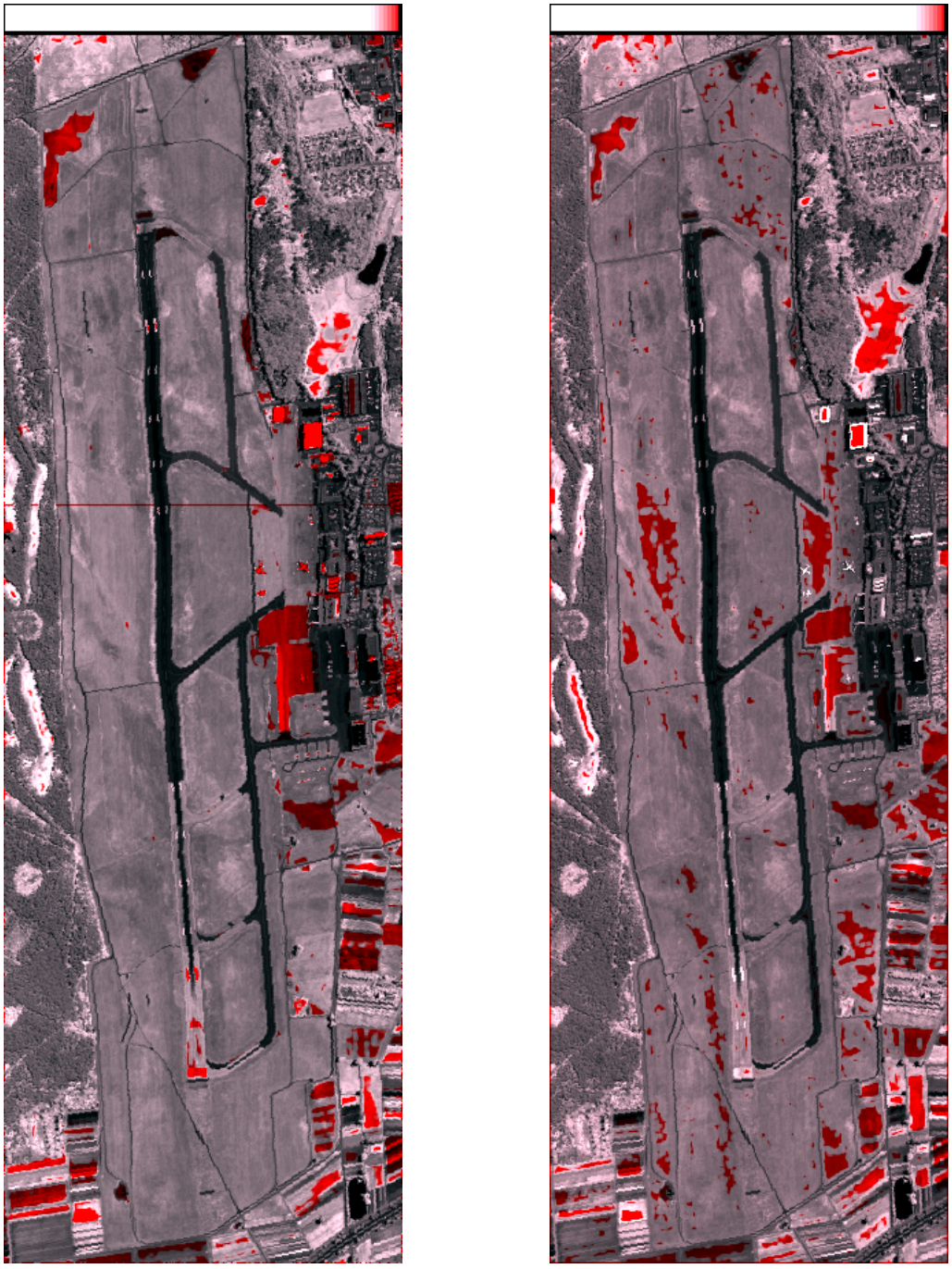


Abbildung G.4: *Ergebnisbild der Hauptachsentransformation auf das Flughafengebiet ohne Normierung auf lokale Varianz (links) und mit Normierung (rechts). Es wurde eine Fenstergröße von 3x3 verwendet. Das Ergebnis wurde mit dem Maximum-Likelihood-Verfahren eingefärbt. Intensives rot bedeutet große Änderungswahrscheinlichkeit.*

Anhang H

Eingefärbte Ergebnisbilder des MAD-Verfahrens

Diese Bilder sind mit dem CDSAT-Programm entstanden, in welchem das MAD-Verfahren von Dr. Canty implementiert worden ist. Die farbigen Flächen stellen Gebiete mit einer Änderungswahrscheinlichkeit dar. Es wird jeweils eine RGB-Darstellung gezeigt, d.h. drei Komponenten denen je eine Farbe (rot, grün oder blau) zugewiesen wird. Die selben Komponenten werden in einer anderen Darstellung mit der Farbe (rot) dargestellt.

H.1 Vegetationsgebiet

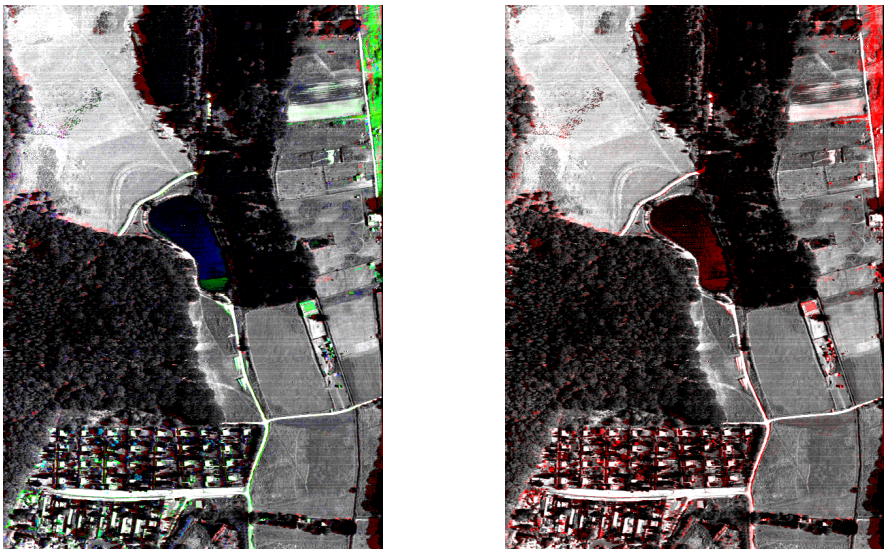


Abbildung H.1: *Die Ergebnisse des MAD-Verfahrens, angewendet auf das Vegetationsgebiet, welches von Dr. Canty implementiert wurde. Die Bilder wurden mit CDSAT erstellt. Links sind die ersten drei Komponenten mit RGB Farben dargestellt. Rot stellt die erste, grün die Zweite und blau die dritte Komponente dar. Rechts sind die gleichen Komponenten mit einer einzigen Farbe dargestellt. Kanal 1 aus dem Jahre 1994 wurde grau hintergelegt.*

H.2 Stadtgebiet

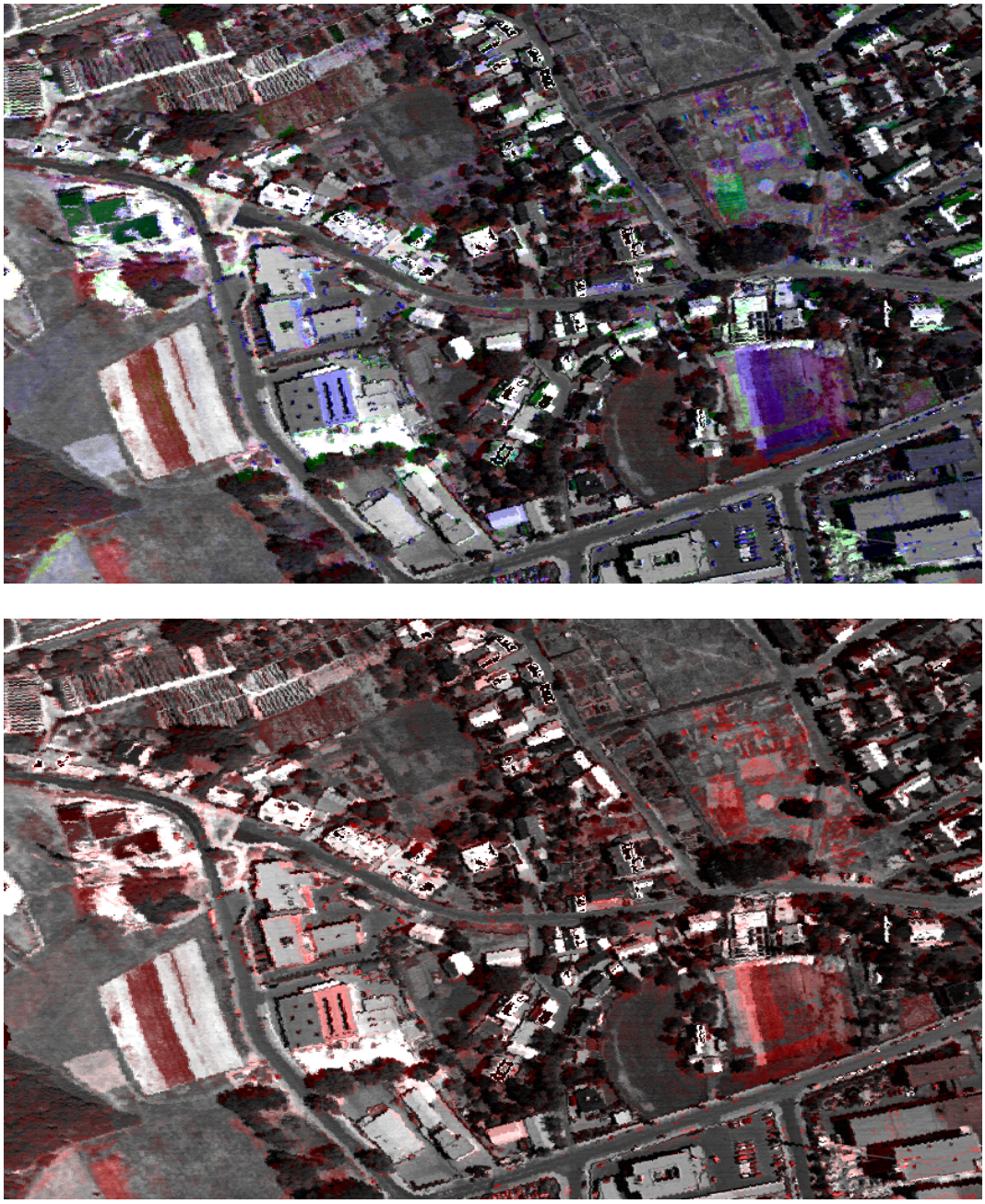


Abbildung H.2: *Die Ergebnisse des MAD-Verfahrens, angewendet auf das Stadtgebiet. Die Bilder wurden mit CDSAT erstellt. Oben sind die ersten drei Komponenten mit RGB Farben dargestellt. Rot stellt die erste, grün die Zweite und blau die dritte Komponente dar. Unten sind die gleichen Komponenten mit einer einzigen Farbe dargestellt. Kanal 1 aus dem Jahre 1991 wurde grau hintergelegt.*

H.3 Flughafengebiet

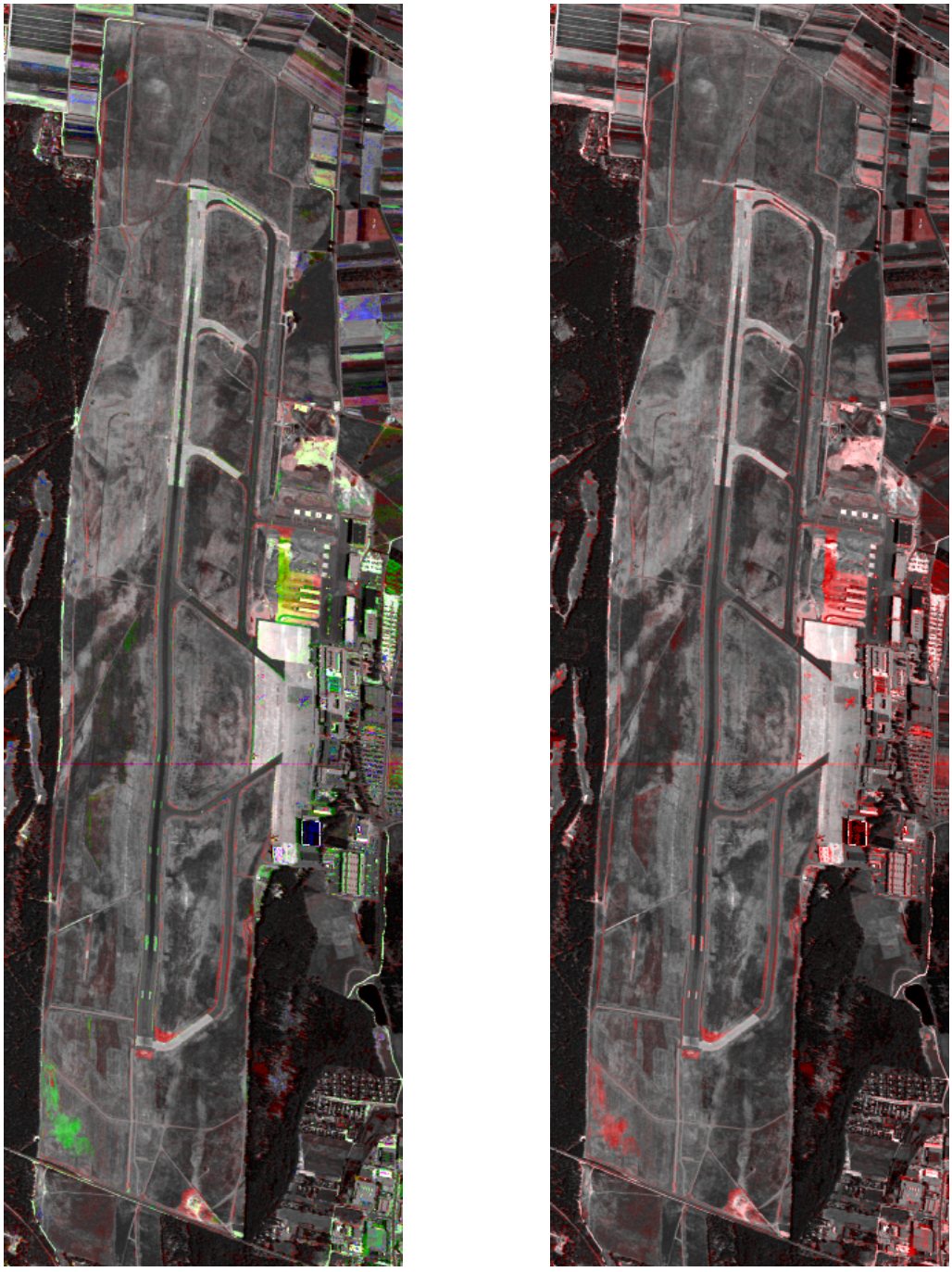


Abbildung H.3: *Die Ergebnisse des MAD-Verfahrens, angewendet auf das Flughafengebiet. Die Bilder wurden mit CDSAT erstellt. Links sind die ersten drei Komponenten mit RGB Farben dargestellt. Rot stellt die erste, grün die Zweite und blau die dritte Komponente dar. Rechts sind die gleichen Komponenten mit einer einzigen Farbe dargestellt. Kanal 1 aus dem Jahre 1991 wurde grau hintergelegt.*

H.4 Zirkus - MAD-Komponenten

H.4.1 Daedaluskanäle

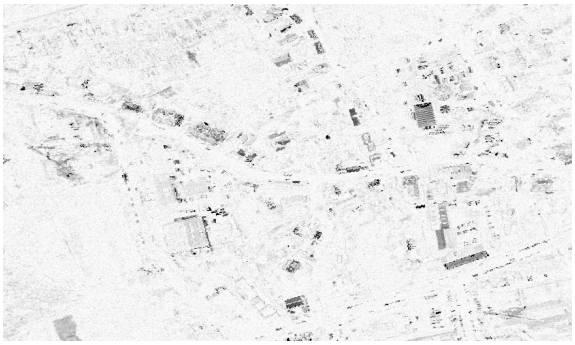
Komponente 1

Komponente 2

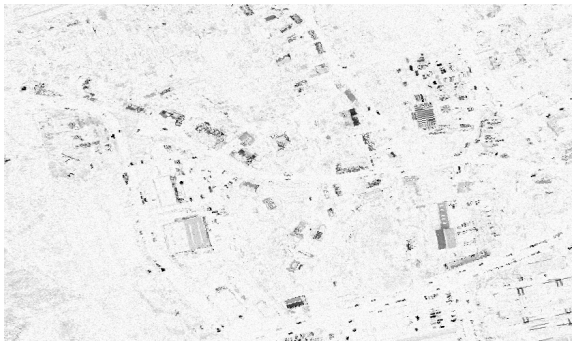
Komponente 3

Komponente 4

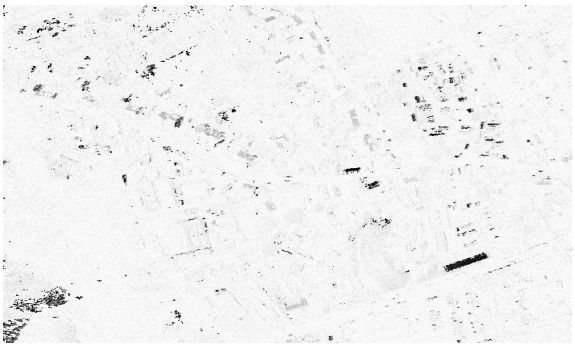
Komponente 5



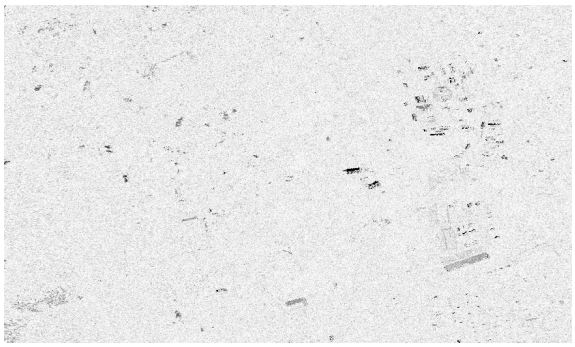
Komponente 6



Komponente 7

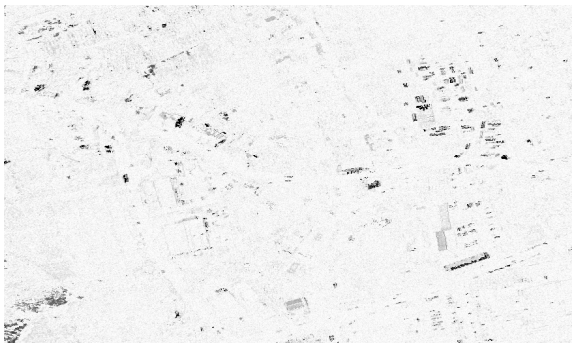


Komponente 8



Komponente 9

Komponente 10

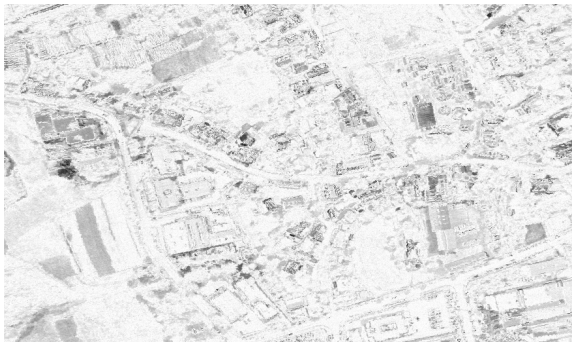


An diesen zehn Komponentenbildern kann erkannt werden, das mit zunehmender Komponentennummer die erkannten Objekte kleiner werden. Das Rauschen nimmt ebenfalls zu. Eine Interpretation ist schwierig, da immer die beiden nebeneinander abgebildeten Komponenten paarweise mit der maximalen Vatrianz korreliert sind.

H.4.2 Landsatkanäle

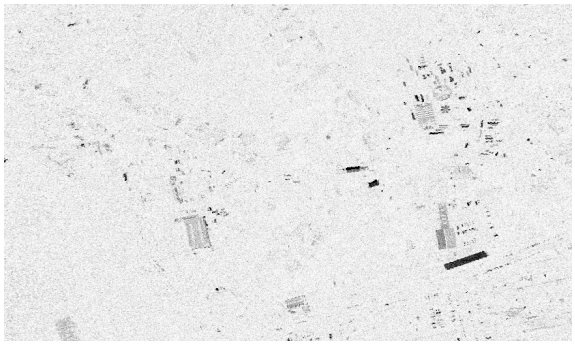
Komponente 1

Komponente 2



Komponente 3

Komponente 4

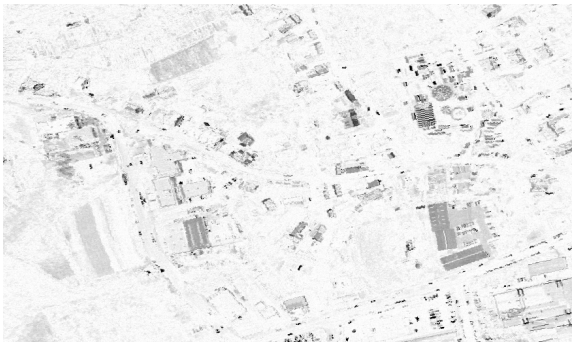


Komponente 5

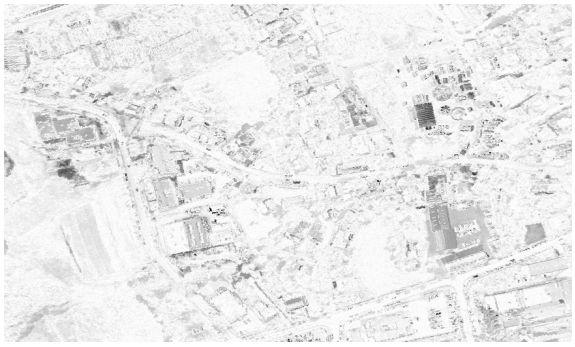
Komponente 6

H.4.3 Ikonoskanäle

Komponente 1

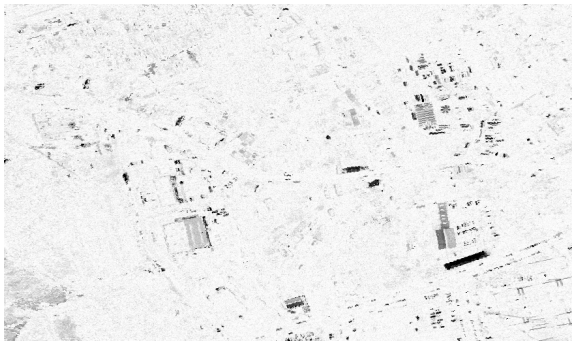


Komponente 2



Komponente 3

Komponente 4



Zwischen den Komponenten der Landsatkanäle und denen der Ikonoskanäle sind Ähnlichkeiten zu erkennen. Zufällig sind die ersten vier Komponentenbilder bei Landsat und Ikonos nahezu identisch. Es darf aber keine Verwandschaft zwischen den Ausgangskanälen und den Komponentenbildern angenommen werden. Die jeweils nebeneinander abgebildeten Komponentenbilder sind mit der maximalen Varianz korreliert. Es ist daher eher Zufall, das diese Ähnlichkeiten vorhanden sind. Im Vergleich zu den 10 Daedaluskanälen ist keine Ähnlichkeit vorhanden.
Weshalb in den verschiedenen Komponenten gerade die gefundenen Änderungen dargestellt werden, konnte Nielsen im Gespräch mit M. Canty auch nicht erklären.

Anhang I

Technische Daten

I.1 Deadaluskanäle

Kanal	Spek.-bereich [μm]	Bandbreite [μm]	Anmerkung	Landsat	Ikonos
1	0.42 - 0.45	0.03	blau	1	-
2	0.45 - 0.52	0.07	"	-	1
3	0.52 - 0.60	0.08	grün	2	2
4	0.605 - 0.625	0.02	"	-	-
5	0.63 - 0.69	0.06	rot	3	3
6	0.695 - 0.750	0.055	"	-	-
7	0.76 - 0.90	0.14	nahes IR	4	4
8	0.91 - 1.05	0.14	"	-	-
9	1.55 - 1.75	0.20	fernes IR	5	-
10	2.08 - 2.35	0.27	"	6	-
11	8.50 - 13.0	4.50	thermal	-	-

Tabelle I.1: *Spektrale Auflösung des AADS 1268 [17]. Kanal 1-6 liegen im sichtbaren Bereich, 7 bis 10 im nahen bis fernes Infrarot und Kanal 11 im thermischen Bereich. Rechts sind die entsprechenden Landsat und Ikonoskanäle der Daedaluskanäle abgebildet.*

Danksagung

Ich möchte mich bei Prof. Dr. Hartwig Spitzer für die Umfangreiche Betreuung und die Hilfe bei der Überwindung der durch den interdisziplinären Charakter dieser Arbeit aufgetretenen Probleme herzlich danken.

Ebenso möchte ich mich bei Dr. Morton Canty für das zu Testzwecken zur Verfügung gestellte Programm CDSAT und dessen Quellcode herzlichst bedanken. Ebenso für die Beantwortung meiner diesbezüglichen Fragen.

Weiterhin danke ich Rafael Wiemker, der mir mit seinen Antworten auf meine Fragen bezüglich seiner Programme geholfen hat.

Auch den übrigen, hier nicht namentlich erwähnten Mitgliedern der Arbeitsgruppe CENSIS danke ich herzlich für ihre Unterstützung.

Literaturverzeichnis

[1] Akima, Hiroshi, A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points, ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, No. 2, June 1978, Pages 148-159

[2] Bruzzone, L. and Prieto, F., A Bayesian approach to automatic change detection, IGARSS 99, Hamburg, June/July 1999

[3] Canty, Morton, Jasani, Bhupendra and Truong Bob, Remote Sensing and Change Detection for Nuclear Safeguards: The Bruce Nuclear Power Development Site , Draft Report, Januar 2000

[4] Congalton, R. C., Mead, R. A., A Quantitative Method to Test for Consistency and Correctness in Photointerpretation, Remote Sensing Thematic Accuracy Assessment: A Compendium, , American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Pages 260-265

[5] Duda, R. O., Hart, P. E., Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley, New York, 1973

[6] Congalton, R. C., Macleod, R. D., A Quantitativ Comparison of Change-Detection Algorithms for Monitoring Eelgrass from Remotely Sensed Data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 64, No. 3, March 1998, pp. 207-216

[7] Dai, X. L., Khorram, S., Remotely Sensed Change Detection Based on Artificial Neural Networks, Photogrametric Engineering and Remote Sensing, Vol. 65, No. 10, October 1999, pp. 1187-1194

[8] Hermann, Marc, Landminen-Erkennung aus der Luft, Diplomarbeit, Universität Hamburg, Februar 2000

[9] Hepp, Thomas, Erzeugung multispektraler Reflektanzbilder zur automatisierten Bildauswertung, CENSIS-Report 10-94, Diplomarbeit Universität Hamburg, 1994

[10] Hotelling, H., Relations between two sets of variates, Biometrica XXVIII, 1936, pp. 321-377

[11] Jähne, Bernd, Digitale Bildverarbeitung, 3. Auflage, Springer Verlag 1993, Seite 122f

[12] Kollewe, T. (1996), Vergleich multispektraler Flugzeugscanneraufnahmen mit Reflektanzmessungen am Boden, Diplomarbeit, Universität Hamburg, CENSIS Report-17-96

[13] Kraus, Karl, Fernerkundung - Auswertung photographischer und digitaler Bilder, Band 2, Dümmler/Bonn, 1990

[14] Kulbach, Daniel, Systematischer Vergleich von Verfahren zur überwachten Klassifikation von multispektralen Luftbildern mit Bodenauflösungen im Meterbereich, CENSIS-Report 29-97, Diplomarbeit Universität Hamburg, 1997

[15] Li, Manjunath, Mitra, A Contour-Based Approach to Multisensor Image Registration, IEEE Transaction on Image Processing, Vol. . No. 3, March 1995, pp 320-334

[16] Meister, Gerhard (1996), Messung der spektralen Reflektionsfunktion (BRDF) ausgewählter Oberflächen bei natürlicher Beleuchtung, CENSIS-Report 18-96, Diplomarbeit Universität Hamburg, 1996

[17] Neumann, Borris, Untersuchung von Strukturmaßen ausgewählter Landschaftselemente auf multispektralen Luftbildern, CENSIS-Report 22-96, Diplomarbeit Universität Hamburg, 1996

[18] Nielsen, Allan Aasbjerg, Conradsen, Knut, Multivariate alteration detection (MAD) in multispectral, bi-temporal image data: A new approach to change detection studies, IMM Technical Report 11-1997 , Universität von San Diego, Californien

[19] Schuhr, W., (1982), Geometrische Verarbeitung multispektraler Daten von Zeilenabtastern, Wissentschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Heft 115

[20] Speck, Anja, Änderungsdetektion auf multispektralen Luftbildern durch Hauptachsentransformation im bitemporalen Merkmalsraum, CENSIS-Report 27-97, Diplomarbeit Universität Hamburg, 1997

[21] Wendker, Andreas, Geometrische Verarbeitung und Entzerrung von Luftbildaufnahmen eines Multispektralscanners, CENSIS-Report 26-97, Diplomarbeit Universität Hamburg, 1997

[22] Wiemker, Rafael, An Iterative Spectral-Spatial Bayesian Labeling Approach For unsupervised Robust Change Detection On Remotely Sensed Multispectral Imagery, Proceedings of the 7th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP), Kiel 1997

[23] Wiemker, Rafael, Karl Rohr, Lutz Binder, Rainer Sprengel, H. Siegfried Stiehl, Application of elastic registration to imagery from airborne scanners, XVIII ISPRS Kongress, Wien, 1996

[24] Wiemker, Rafael, Registration of Airborne Scanner Imagery using Akima local quintic polynomial interpolation, International Airborne Remote Sensing Conference, San Franciso, California, 1996

[25] Wiemker, Rafael, Robuste unüberwachte Änderungsdetektion auf Multispektralbildern, Deutsche Gesellschaft für Photgrammetrie und Fernerkundung (DGPF), Frafurt a. M., 1997

[26] Wiemker, Rafael, Unsupervised Robust Change Detection On Multispectral Imagery Using Spectral And Spatial Features, International Airborne Remote Sensing Conference, Kopenhagen, Dänemark, 1997

[27] Wiemker, Rafael, Application of Elastic Registration to Imagery from Airborne Scanners, XVIII ISPRS Kongress, Wien, 1996

[28] Spitzer, Hartwig, Wiemker, Rafael, Speck, Anja und Bienlein, Johann, Robuste unüberwachte Änderungsdetektion auf multispektralen Luftbildern und den Open-Skies-Vertrag, Deutsche Physikalische Gesellschaft (FONAS/DPG), München, 1997

[29] Zissis, Source of Radiation, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, 1993